

Prontuario Solar de México

Adalberto Tejeda Martínez
Gabriel Gómez-Azpeitia
Compiladores

$$Sr = 0.31 + 0.48 \left(\frac{D+0.5M}{N+M+D} \right)$$



$$ESR = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(V_i - V_c)^2}{n} \right]^{1/2}$$

UNIVERSIDAD DE COLIMA

Universidad Veracruzana

Prontuario solar de México

enfoque académico

UNIVERSIDAD DE COLIMA

Mtro. José Eduardo Hernández Nava, Rector

Mtro. Christian Torres-Ortiz Zermelo, Secretario General

Licda. Ma. Guadalupe Carrillo Cárdenas, Coordinadora General de Comunicación Social

Mtra. Gloria Guillermina Araiza Torres, Directora General de Publicaciones

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

Dra. Sara Ladrón de Guevar, Rectora

Mtra. Leticia Rodríguez Audirac, Secretaria Académica

Mtra. Clementina Guerrero García, Secretaria de Administración y Finanzas

Prontuario solar de México

Adalberto Tejeda Martínez
Gabriel Gómez-Azpeitia
Compiladores



UNIVERSIDAD
DE COLIMA



Universidad Veracruzana

© UNIVERSIDAD DE COLIMA, 2015
Avenida Universidad 333
C.P. 28040, Colima, Colima, México
Dirección General de Publicaciones
Teléfonos: (312) 31 61081 y 31 61000, ext. 35004
Correo electrónico: publicac@ucol.mx
<http://www.ucol.mx>

© UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2015
Lomas del estadio s/n, Edificio "A", 3er. Piso
C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México
Teléfono: (228) 8421700 ext. 11666
<http://www.uv.mx>

ISBN: 978-607-8356-45-4

Derechos reservados conforme a la ley
Impreso en México / *Printed in Mexico*

Proceso editorial certificado con normas Iso desde 2005
Dictaminación y edición registradas en el Sistema Editorial Electrónico PRED
Registro: LI-012-14
Recibido: Julio de 2014
Publicado: Abril de 2015

Índice

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES	
Radiación	11
Geometría solar	15
Instrumentos de medición	27
<i>Irving R. Méndez-Pérez y Gabriel Gómez-Azpeitia</i>	
CAPÍTULO II. BASES FÍSICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR	
El Sol como fuente de radiación	33
Variabilidad solar	34
La naturaleza de la radiación	39
Propiedades radiativas	41
Cuerpo negro	41
Procesos de la luz	45
Absorción de gases en el espectro electromagnético	46
<i>Irving R. Méndez-Pérez</i>	
CAPÍTULO III. RADIACIÓN SOLAR EN MÉXICO	
Irradiación solar global	51
Irradiación solar directa	55
Irradiación solar difusa	59
Métodos de estimación	63
<i>Adalberto Tejeda Martínez, Ivonne M. García-Martínez, Irving R. Méndez-Pérez, Ubaldo Miranda-Miranda y José V. López-Méndez</i>	
CAPÍTULO IV. GEOMETRÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES	
Los fundamentos de la geometría solar	70
Las gráficas solares	73
Aplicaciones en el diseño arquitectónico	79
Aplicaciones en el diseño de colectores solares	94
<i>Gabriel Gómez-Azpeitia, Camilo Caicedo Moncayo, Carlos Escobar Del Pozo y Erik Eduardo Vázquez Fernández</i>	

CAPÍTULO V. PROCEDIMIENTOS SIMPLES PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR	
Solex: software para calcular radiación solar	103
Irradiación solar diaria sobre un plano horizontal	103
Irradiación solar global instantánea sobre diferentes planos	107
<i>Adalberto Tejeda Martínez, Ivonne M. García-Martínez,</i> <i>Gabriel Gómez-Azpeitia e Irving R. Méndez-Pérez</i>	
CAPÍTULO VI. MODELACIÓN ESTADÍSTICA DE LA RADIACIÓN SOLAR DIFUSA	
Antecedentes	114
El caso de Xalapa	116
Modelos resultantes	121
<i>Ernesto López Velázquez y Adalberto Tejeda Martínez</i>	
ANEXO I: MAPAS DE IRRADIACIÓN SOLAR EN MÉXICO	
Irradiación solar global	125
Irradiación solar directa	132
Irradiación solar difusa	138
<i>Ubaldo Miranda-Miranda</i>	
ANEXO II: PROGRAMAS, APLICACIONES Y BASES DE DATOS DE INTERÉS	
DISPONIBLES EN LA WEB	
Programas de cómputo	145
Aplicaciones	148
Bases de datos	149

INTRODUCCIÓN

Este *Prontuario solar de México* no es un libro para leerse necesariamente de inicio a fin, sino que el lector puede usarlo de consulta e información al nivel y detalle que lo requiera. Tiene el propósito de auxiliar a profesionales interesados en el aprovechamiento de la fuente de energía más abundante en nuestro país: la energía solar; y nos atrevemos a decir que es la más abundante porque, para fines prácticos, es inagotable.

Los incrementos abruptos del precio del petróleo ocurridos en el pasado —la ocasión más memorable es 1973, cuando pasó en un día de 4 a 40 dólares el barril— hicieron que la humanidad volteara los ojos a las fuentes alternas de energía, en particular a la solar. No obstante, la estabilización del precio en años posteriores, las reservas cuantiosas de los países desarrollados, en especial Estados Unidos, relegó el tema en la década de los ochenta. México, país petrolero, no fue la excepción.

A partir de la primera década del siglo XXI el panorama internacional ha cambiado, especialmente por las evidencias científicas sobre el cambio climático global. Ha quedado claro el papel que en el calentamiento planetario han tenido y tendrán en el futuro los gases emanados de la quema de combustibles fósiles, lo que ha hecho que resurja el interés por la energía solar. El gobierno mexicano, en la Conferencia de las Partes de Naciones Unidas sobre Cambio Climático celebrada en Cancún en 2010 —la COP 16— se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 50% para el año 2050, compromiso que ha ratificado en las conferencias posteriores. Es una meta que se antoja aun lejana en el tiempo y, además, difícil de cumplir sin el concurso de las fuentes alternas de energía.

Es de preverse, entonces, que las necesidades de profesionales diversos en cuanto a cálculos y comprensión de conceptos del ámbito solar irán en aumento en los próximos años. Para ellos es este *Prontuario solar de México*. El capítulo I enumera, alfabéticamente, los conceptos generales en el estudio de la radiación y de la geometría solar, y describe los principales instrumentos de medición. Las bases físicas de la radiación solar se describen en el capítulo II que, sin llegar a ser un tratado a fondo, sí es un recuento de los conceptos físicos básicos sobre el tema. En el capítulo III se presentan unos métodos prácticos de estimación de la irradiación solar global, difusa y directa para México, así como mapas de los meses representativos de las estaciones del año (enero, abril, julio y octubre), obtenidos precisamente con esos métodos simples. Al respecto debe aceptarse que son unos métodos sencillos, pero que logran reproducir la variabilidad anual de la irradiación en el país con una aproximación suficiente para efectos de planeación de su aprovechamiento como recurso energético; de ninguna manera sustituyen al dato medido con una estación instrumental bien ubicada y calibrada. Su sencillez empieza porque usan como variables independientes datos usualmente recabados en más de dos mil estaciones climatológicas del país que tiene a su cargo el Servicio Meteorológico Nacional. Desde luego hay otros procedimientos —y otras fuentes de datos—, algunos a partir de sensores remotos como imágenes de satélite, pero son de menor accesibilidad que los datos climáticos de superficie.

Los temas del capítulo III serán retomados en el capítulo V, que detalla los procedimientos simples de estimación de la radiación solar y proporciona el software *Solex*, y en el Anexo I, que incluye los mapas de irradiación solar global, directa y difusa de México para todos los meses, lo que prácticamente constituye una climatología solar del país. El *Solex* realiza estimaciones de las tres componentes de la irradiación solar en México, para condiciones medias o días típicos nublados, parcialmente nublados o despejados, a partir de datos climáticos de fácil acceso. El software se explica por sí mismo, pues a riesgo de ser redundante contiene su propio manual en el que se rescatan varias de las definiciones presentadas en capítulos previos.

El capítulo IV vuelve a la geometría solar pero más a fondo que en los conceptos generales del capítulo I, y presenta aplicaciones al diseño arquitectónico y al aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos y colectores planos. Se cierra el *Prontuario solar de México* con un segundo anexo que enlista los softwares de fácil acceso en la Web para cálculos o representaciones gráficas de radiación o de geometría solar.

Como se puede notar, esta edición tiene una estructura en espiral: los temas abordados en los capítulos iniciales se retoman más adelante pero con mayor detalle.

Los autores y los editores escogimos el formato digital, pues consideramos que es el más adecuado para el material que aquí se presenta, y porque, con los comentarios de los usuarios, podrá irse mejorando permanentemente, posibilidad que no se presenta en el papel o se presenta pero de manera más limitada y costosa.

Esperamos que este *Prontuario solar de México* lejos de provocar dolores de cabeza, los mitigue.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS GENERALES

Irving R. Méndez-Pérez y Gabriel Gómez-Azpeitia

Radiación

Absortividad ($\alpha\lambda$)

Es la razón de la cantidad de energía radiante absorbida por una superficie entre la cantidad total de energía incidente sobre esa superficie.

Albedo

Es la fracción de la luz incidente reflejada en una longitud de onda o espectro dado.

Tabla 1.1
Albedos en fracción de algunas superficies

Tipo de superficie	Albedo (fraccional)
Tierra y atmósfera	0.30
Agua líquida	0.05 – 0.20
Nieve fresca	0.75 – 0.95
Nieve vieja	0.40 – 0.70
Nubes espesas	0.30 – 0.90
Nubes delgadas	0.20 – 0.70
Mar	0.25 – 0.40
Suelo	0.05 – 0.20
Hierba	0.16 – 0.26
Desierto	0.20 – 0.40
Bosques	0.10 – 0.25
Asfalto	0.05 – 0.20
Concreto	0.10 – 0.35
Urbano	0.10 – 0.27

Fuente: Jacobson (1999).

Cuerpo negro

Se caracteriza por la propiedad de que toda la radiación que absorbe, también la emite. Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas; sin embargo, no emiten con igual intensidad a todas las frecuencias o longitudes de onda, para ello siguen la ley de Planck.

Emisividad ($\epsilon\lambda$)

Se define como la razón de la energía emitida por una superficie a una longitud de onda y una temperatura dadas, entre la energía emitida por un cuerpo negro a la misma longitud de onda y a la misma temperatura.

Tabla 1.2
Emisividades en porcentajes de algunas superficies

Tipo	Superficie	Emisividad infrarroja (%)
Agua	Agua	92-96
	Nieva fresca caída	82-99.5
	Nieve fresca en gránulo	89
	Hielo	96
	Suelo frío o helado	93-94
Suelos pétreos	Arena seca de playa	84
	Arena seca ligera	89-90
	Arena húmeda	95
	Grava gruesa	91-92
	Piedra caliza	91-92
	Concreto seco	71-88
Suelo natural	Suelo al descubierto húmedo	95-98
	Suelo revuelto o arado seco	90
	Desierto	90-91
	Pasto o hierba seca	90
	Campo y arbusto	90
	Bosque de roble	90
	Bosque de pino	90
	Alfalfa verde obscuro	95
	Hojas tiradas de roble	91-95

Continúa en la página 13

Viene de la página 12

Tipo	Superficie	Emisividad infrarroja (%)
Misceláneo	Hoja blanca	89-95
	Hoja de vidrio	87-94
	Ladrillo rojo	92
	Yeso blanco	91
	Madera de roble	90
	Pintura blanca	91-95
	Pintura negra	88-95
	Pintura aluminio	43-55
	Hoja de aluminio	1-5
	Hierro galvanizado	13-28
	Plata altamente pulida	2
	Piel humana	95

Fuente: Jacobson (1999).

Irradiación

Es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona. Sus unidades son Joules/m² o cal/cm² (llamado también Langley y se abrevia ly) o kWatt-hora/m² día, que es una forma muy común de expresar este parámetro.

Irradiancia

Es la energía instantánea que se emite o incide en cierta superficie o zona, sus unidades son W/m².

Ley de Kirchhoff

Establece que si un cuerpo está en equilibrio termodinámico con su entorno, su emisividad es igual a su absorptividad; es decir, un buen reflector es un mal emisor.

Ley de Planck

El físico alemán Max Planck postuló que la energía emitida por un cuerpo negro a una temperatura dada es proporcional a su frecuencia ν , siendo ésta un múltiplo entero de la cantidad $h\nu$, donde h es la constante de Planck. Esta ley es expresada como:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{ch}{k\lambda T} - 1\right) \right]} \quad (1.1)$$

donde:

$B_{\lambda}(T)$ = energía por unidad de superficie por unidad de tiempo y por unidad de intervalo de longitud de onda λ , en función de la temperatura (W/m^3).

T = temperatura de la superficie del cuerpo en unidades absolutas en Kelvin (K).

h = constante de Planck, $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$.

k = constante de Boltzman, $1.38 \times 10^{-23} J/K$.

λ = longitud de onda (metros).

c = velocidad de la luz, $2.99 \times 10^8 m/s$.

Ley de Stefan-Boltzmann

Expresa la densidad de energía radiante emitida (E) por un cuerpo negro como una función de la cuarta potencia de la temperatura del citado cuerpo:

$$E = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

donde:

σ = constante de Stefan-Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$.

T = temperatura de la superficie del cuerpo en unidades absolutas (K).

Radiación difusa

Es la que se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna.

Radiación directa

Es la parte que se recibe directamente del Sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica, por lo tanto la radiación extraterrestre es radiación directa.

Radiación global

Es la suma de la radiación directa más la difusa.

Radiación terrestre

Es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo la que emite una pared, un charco, un lago, etcétera.

Radiación total

Es la suma de la radiación global más la terrestre.

Radiancia

Es la irradiancia solar en una dirección particular e involucra cierto ángulo sólido, que afecta determinada superficie y con la que forma un ángulo. Sus unidades pueden ser Watt/m² por estereoradián.

Reflectividad (ρ_λ)

Razón de la cantidad de radiación reflejada entre la cantidad total incidente sobre una superficie.

Transmitividad (τ_λ)

Razón de la radiación transmitida por un material (agua, vidrio, aire, etcétera) entre la cantidad total de la radiación incidente sobre una superficie.

Geometría solar

Altura solar (h)

Conocida también como elevación solar, es el ángulo formado por el rayo solar y el plano horizontal del sitio. Varía desde 0° cuando el Sol está en el horizonte, hasta 90° cuando éste está en el cenit (figura 1.1).

El valor de la altura solar se puede obtener mediante la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 1991; Olgyay y Olgyay, 1957):

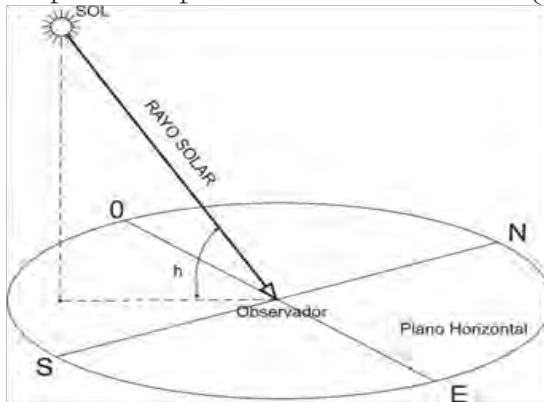
$$\text{sen } h = \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1.3)$$

donde:

h = altura solar, φ = en latitud del sitio.

δ = declinación solar para el día en cuestión, ω = ángulo horario instantáneo en grados a la hora en que se calcula la altura solar.

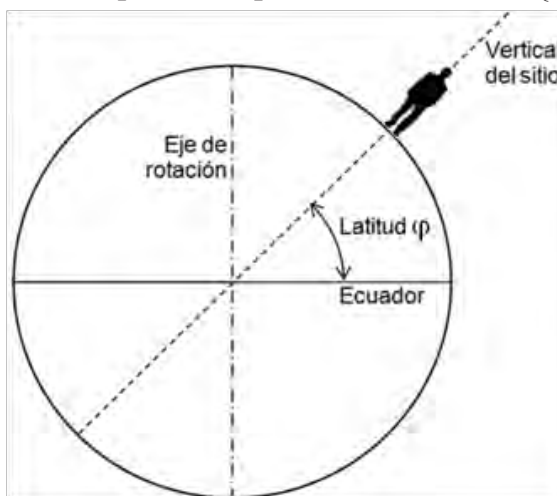
Figura 1.1
Componentes para definir la altura solar (h)



Latitud del sitio (ϕ)

Es el ángulo que forma la vertical del lugar con el plano del ecuador. Es expresada en grados, se mide de 0° (en el ecuador) a $\pm 90^\circ$ (en los polos) y se considera como positiva en el hemisferio norte y negativa en el sur (figura 1.2).

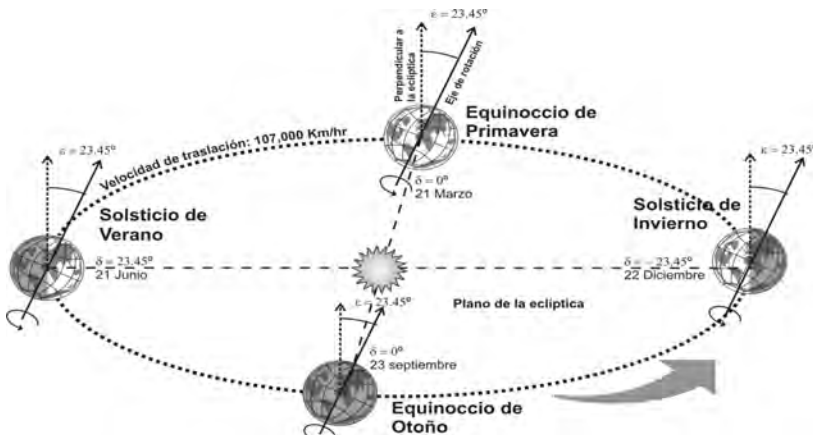
Figura 1.2
Esquema del planeta Tierra
y los componentes que definen la latitud (ϕ)



Declinación solar (δ)¹

Ángulo formado por el plano que contiene al eje de rotación terrestre y el plano perpendicular a la eclíptica. Si bien la diferencia absoluta entre el eje de rotación y la perpendicular a la eclíptica siempre es de 23.45° , el ángulo que se forma entre los planos que los contienen varía día a día porque dichos planos están siempre frontales al sol. Los valores extremos de la declinación solar ocurren cuando ambos planos se encuentran uno frente a otro con un ángulo igual a la oblicuidad absoluta. Eso corresponde a las fechas de los solsticios, el de invierno (21 de diciembre) con valor de declinación solar igual a -23.45° , y el de verano (21 de junio) con valor de declinación solar igual a 23.45° . El valor intermedio ocurre cuando ambos planos ocupan el mismo lugar, por lo que el ángulo entre ellos es igual a 0° . Eso corresponde a las fechas de los equinoccios, el de primavera (21 de marzo) y el de otoño (23 de septiembre), como se muestra en la figura 1.3.

Figura 1.3
Posición relativa del plano del ecuador
y de la eclíptica que define la declinación solar



¹ No confundir con la declinación magnética, que es el ángulo formado entre la recta que va del centro de la Tierra al Polo Norte magnético y la que va del centro de la Tierra al Polo Norte geográfico; su magnitud varía en función de la actividad solar y el campo electromagnético en la parte alta de la atmósfera terrestre, y comunmente es reportada por los observatorios astronómicos.

Existen diversas formas de obtener el valor del ángulo de declinación solar. El procedimiento simplificado se expresa mediante la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 1991; Olgyay y Olgyay, 1957):

$$\delta = \varepsilon_{ob} \operatorname{sen} \left[\frac{360(284 + n_j)}{365} \right] \quad (1.4a)$$

donde:

δ = ángulo de declinación solar, en grados.

ε_{ob} = ángulo de oblicuidad de la elíptica considerado como constante = 23.45° .

n_j = día juliano del año: $n_j=1$ el 1 de enero, $n_j=365$ el 31 de diciembre.

Existen procedimientos más exactos requeridos para cálculos astronómicos, como la serie siguiente donde $j=0.984 n_j$ (aunque para aplicaciones en ingeniería o meteorología basta con el procedimiento antes señalado):

$$\delta = 0.33281 - 22.984 \cos j - 0.6499 \cos 2j - 0.1398 \cos 3j \\ + 3.7872 \operatorname{sen} j + 0.3205 \operatorname{sen} 2j + 0.07187 \operatorname{sen} 3j \quad (1.4b)$$

Paso del Sol por el cenit

Al pasar el Sol por el cenit la altura solar es de 90° (cuyo seno es 1). Como eso ocurre al medio día, el ángulo horario también vale 90° . Por tanto, la ecuación 1.3 se reduce a

$$1 = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \varphi + \cos \delta \cos \varphi \quad (1.3b)$$

Para que se cumpla lo anterior es necesario que $\varphi = \delta$, pues así la suma de los cuadrados del seno y el coseno de un ángulo darían como resultado uno. De ahí se deduce que el Sol sólo pasará por el cenit de localidades ubicadas entre los trópicos (entre $\varphi = 23.45$ y $\varphi = -23.45$).

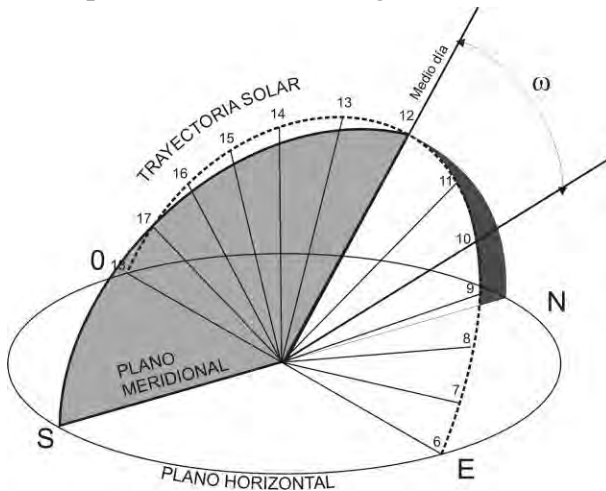
Para conocer las fechas en que el Sol pasa por el cenit de un sitio, se despeja n_j de la expresión 1.4a considerando $\delta = \varphi$. El resultado es un número negativo, lo que significa que habrá de con-

tarse de 365 hacia atrás n_j días para encontrar el primer paso del Sol por el cenit. El segundo paso se ubica considerando que ambos pasos están equidistantes del solsticio de verano ($n_j = 172$).

Ángulo horario (ω)

Es el ángulo formado por el rayo solar y el plano meridional del sitio, medido en el plano que contiene a la trayectoria solar. La medición se hace a partir del plano meridional, por lo que la posición del Sol a las 12:00 horas tiene un $\omega = 0^\circ$. Hacia el oriente la cuenta es positiva y hacia el poniente la cuenta es negativa. Así la posición del Sol a las 6:00 horas, tiene un $\omega = 90^\circ$, y a las 18:00 horas un $\omega = -90^\circ$, como se muestra en la figura 1.4.

Figura 1.4
Esquema que ilustra el procedimiento
para determinar el ángulo horario



El ángulo horario se puede obtener mediante un procedimiento analítico o bien mediante la consulta de tablas. La ecuación correspondiente es:

$$\omega = \frac{360 (12 - t)}{24} \quad (1.5)$$

donde:

t = tiempo en horas en formato decimal: 10:15 horas = 10.25;
17:30 horas = 17.50; etcétera.

Como puede observarse en la tabla 1.3, cada hora equivale a un ángulo horario de 15° . Esto es así porque el período de rotación terrestre, en el que se describe un arco de 360° , es de 24 horas y por lo tanto $360^\circ/24 = 15^\circ$.

Tabla 1.3
Relación entre la hora y el ángulo horario ω

Hora	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
w	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°	-45°	-60°	-75°	-90°

Angulo horario al amanecer (ω_1)

Este es un caso particular de ω , que indica el valor del ángulo horario en el momento del amanecer, es decir, cuando el Sol está en el horizonte (véase figura 1.4).

En el caso de los equinoccios, cuando el día y la noche son iguales, el amanecer es exactamente a las 06:00 horas y el ángulo $\omega_1 = 90^\circ$, pero en el resto del año esa relación puede variar debido al ángulo de oblicuidad del eje de rotación terrestre, respecto de la eclíptica. En el ecuador todos los días son equinocciales, pero en el resto del planeta, los días son más cortos en el invierno y, por tanto, ω_1 es menor a 90° ; por el contrario, en el verano los días son más largos y la ω_1 es mayor que 90° (figuras 1.4 y 1.5).

El ángulo horario del amanecer se expresa mediante la ecuación 1.6, que se obtiene de la 1.3 con $h=0$ (Rehman y Halawani, 1997; Duffie y Beckman, 1991):

$$\cos \omega_1 = -\tan \varphi \tan \delta \quad (1.6)$$

donde:

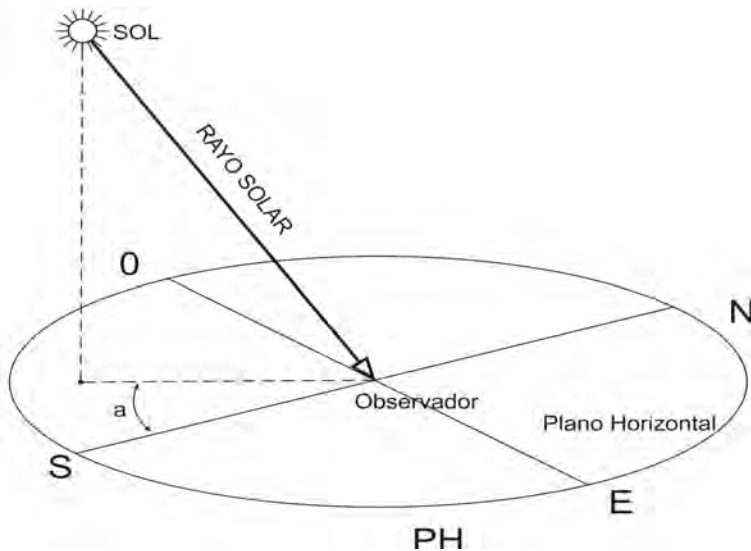
φ = latitud del sitio

δ = declinación solar para el día en cuestión

Acimut solar (a)

Es el ángulo formado por la proyección del rayo solar en el plano horizontal del sitio y la intersección de éste con el plano meridional o línea norte-sur, medido a partir de esta última, indistintamente desde el sur o desde el norte, de acuerdo al cuadrante en que se encuentre el Sol. En los cuadrantes al oeste el valor es negativo y al este positivo (véase figura 1.5).

Figura 1.5
Componentes para definir el acimut solar (a)



El valor del acimut solar se puede determinar mediante la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 1991; Olgyay y Olgyay, 1957):

$$\text{sen } a = \frac{\cos \delta \text{ sen } \omega}{\cos h} \quad (1.7)$$

donde:

δ = declinación solar para el día en cuestión

ω = ángulo horario

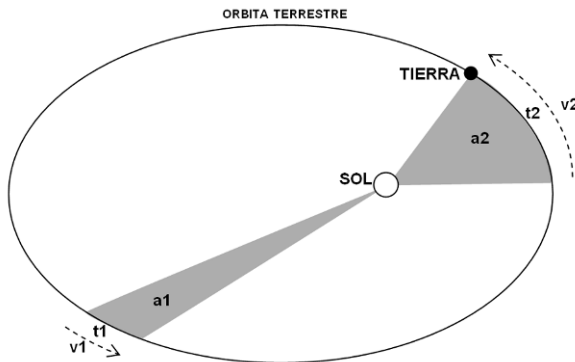
h = altura solar

Ecuación del tiempo (ET)

Los valores de altura solar (h) y acimut solar (a) que se obtienen de los procedimientos de geometría solar anteriormente descritos, están expresados en términos del tiempo solar o astronómico, que no necesariamente coincide con el tiempo civil con que se ajustan nuestros relojes. Para corregir tales valores hay que considerar las diferencias de velocidad en el movimiento de traslación terrestre, que hace que algunos días sean más cortos que otros. Así, la ET representa los minutos (y fracción) que deben sumarse o restarse a la hora solar verdadera para obtener la hora del tiempo medio. Es lo que en astronomía se conoce como el intervalo de tiempo que separa el paso por el meridiano local del *Sol verdadero* (que en su movimiento aparente recorre la eclíptica con velocidad variable), del paso del *Sol medio* (Sol ficticio que recorre la eclíptica con velocidad uniforme) (Llasat y Snyder, 1998).

Estas diferencias se explican con la Segunda Ley de Kepler (figura 1.6), que dice que la Tierra en su recorrido de traslación barre áreas iguales en tiempos iguales. Como la órbita de la Tierra es elíptica y el Sol está en uno de sus focos, depende de la posición del planeta para definir el área de barrido.

Figura 1.6
Esquema que ilustra la Segunda Ley de Kepler



Nota: Las áreas de barrido a_1 y a_2 son iguales. El tiempo en que se traslada la Tierra en ambos casos es la misma, $t_1 = t_2$. Por lo tanto, la velocidad de la Tierra en cada caso es diferente, v_1 no es igual a v_2 .

De tal suerte que cuando la Tierra está más alejada del Sol, los radios se alargan y la distancia entre los dos puntos de la órbita se acorta, entonces el movimiento de traslación es más lento. Por el contrario, cuando la Tierra está más cerca del Sol, los radios se acortan y la distancia entre los dos puntos de la órbita se alarga, por lo que el movimiento de traslación es más rápido.

El valor de la ecuación del tiempo se obtiene de los anuarios astronómicos pero también puede estimarse de forma analítica. El procedimiento simplificado se realiza mediante la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 1991):

$$ET = 9.87 \text{ sen } 2f - 7.53 \text{ cos } f - 1.5 \text{ sen } f \quad (1.8)$$

donde:

$$f = 360 (n_j - 81) / 364 \text{ (en grados).}$$

$$n_j = \text{día juliano del año: el 1 de enero } n_j = 1; \text{ el 31 de diciembre } n_j = 365.$$

Otro procedimiento para el cálculo de ET es el propuesto por Hernández *et al.* (1991):

$$ET = 0.0072 \text{ cos } j - 0.0528 \text{ cos } 2j - 0.0012 \text{ cos } 3j + \\ - 0.1229 \text{ sen } j - 0.1565 \text{ sen } 2j - 0.0041 \text{ sen } 3j \quad (1.9)$$

donde:

$$j = 0.984 n_j$$

$$n_j = \text{día juliano del año: el 1 de enero } n_j = 1; \text{ el 31 de diciembre } n_j = 365$$

Otra forma para determinar el valor de ET es mediante los gráficos construidos a partir de las ecuaciones 1.8 o 1.9, cuya curva resultante es conocida como analema. Ésta puede mostrarse en forma plegada en función del valor de la δ (figura 1.7a) o bien desplegada en función de las fechas (figura 1.7b).

Figura 1.7a

Curva que representa los minutos a restar o sumar por efecto de la ecuación del tiempo (*ET*), conocida como *analema* en función de la declinación solar

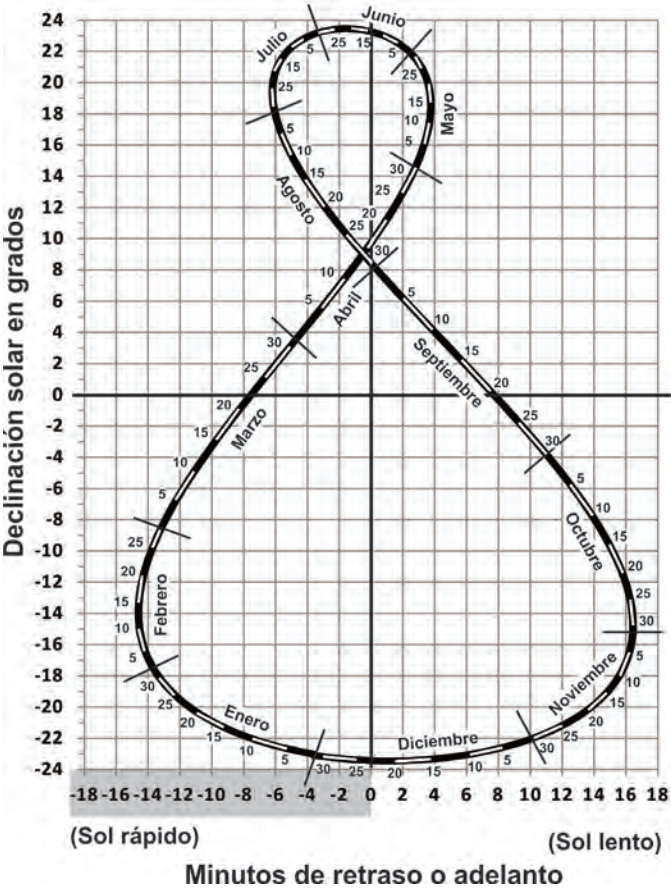
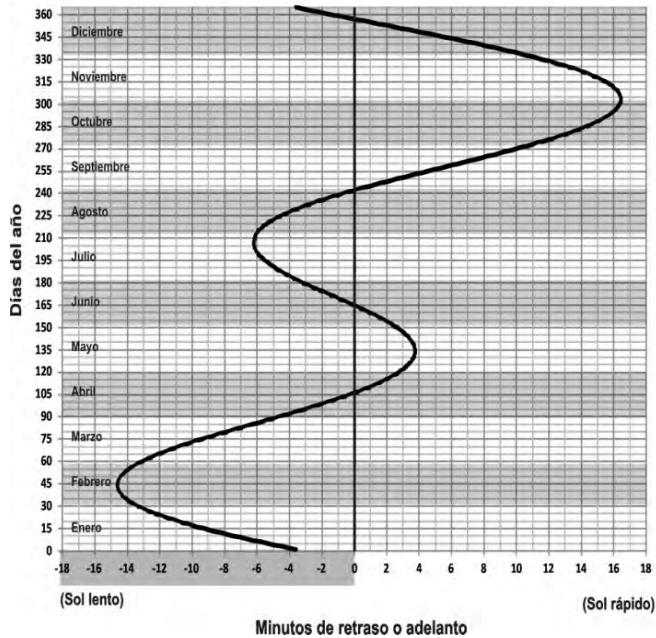


Figura 1.7b

Curva que representa los minutos a restar o sumar por efecto de la ecuación del tiempo (ET), conocida como *analema* en función del día juliano (n_j)



Nota: Arriba: en función de la declinación solar. Abajo: en función de la fecha.

Tiempo civil (TC)

La hora que marcan los relojes se ajusta de acuerdo a una convención político-económica para evitar que localidades de una misma región tengan diferencias en sus horarios, debido a su posición con respecto al Sol; o bien para ajustarse a los horarios de un centro financiero vecino. Así, los gobiernos toman como referencia un punto de su territorio y ajustan los relojes de toda la región al horario de ese punto, que normalmente es un lugar por donde pasa un meridiano terrestre. A estas regiones con horario unificado se les conoce como husos horarios. La República Mexicana tiene cuatro husos horarios. La zona del sureste se ajusta al horario del meridiano 75° W; la zona

del centro se ajusta al horario del meridiano 90° W, la zona del pacífico se ajusta al horario del meridiano 105° W y la zona del noroeste se ajusta al horario 120° W (véase figura 1.8). Si el meridiano de referencia a partir del cual se mide la longitud local está al Oeste, hay que restar; si está al Este, hay que sumar. En algunos lugares debe hacerse una corrección por el cambio de horario que se practica durante ciertos periodos del año para aprovechar la luz diurna y ahorrar energía, al cual se le conoce como *horario de verano*.

Figura 1.8
Usos horarios de México



Así, el tiempo solar verdadero (TSV) debe corregirse para que los resultados de los procedimientos de la geometría solar correspondan a los horarios reales del sitio; es decir, al tiempo civil (TC). Eso se hace mediante la siguiente expresión:

$$TC = TSV - ET - 4(L - L') + C \quad (1.10)$$

donde:

TSV= tiempo solar verdadero

ET= ecuación del tiempo, en minutos

L = longitud geográfica de referencia, en grados (y fracción)

L' = longitud geográfica del sitio, en grados (y fracción)

C = minutos a corregir por efecto cambio de horario; 60 si se trata de horario de verano; 0 si se trata de horario de invierno o si no se practica el cambio de horario

Instrumentos de medición

Albedómetro

El albedómetro consiste en dos polarímetros o pirradiómetros con bases en termopares o fotoceldas de por lo menos 1.5 cm de diámetro (figura 1.9). Un sensor debe apuntar hacia arriba y el otro hacia abajo.

Figura 1.9
Albedómetro



Fuente: <http://pdf.directindustry.com/pdf/kipp-zonen/cma-albedometers/9079-386769.html> (marzo de 2014).

Los sensores deben ser sensibles a la radiación visible pero no a la infrarroja emitida por las superficies que rodean al instrumento.

Piranómetro

Instrumento para medir la radiación global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal. El piranómetro consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar (de color negro) y el otro protegido de la radiación de color pla-

teado o blanco (figura 1.10). Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares, en todo menos en el hecho de estar expuesto a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos, la hipótesis de un piranómetro es que la irradiancia es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos sensores.

Figura 1.10
Piranómetro



Difusómetro

Mide la radiación de onda corta difusa, utilizando un piranómetro y una banda sombreadora (figura 1.11).

Figura 1.11
Difusómetro

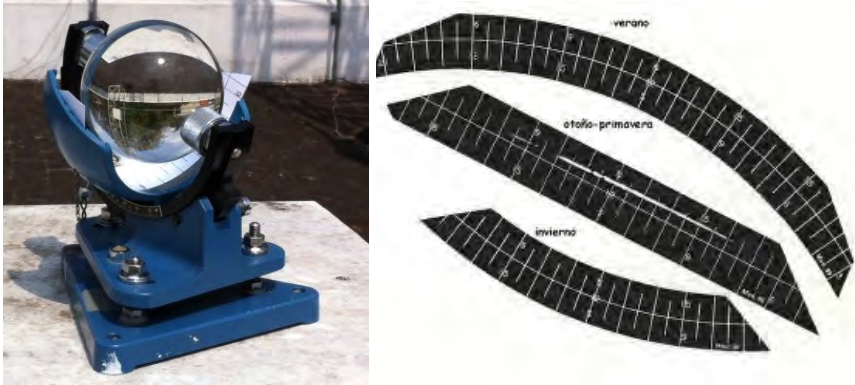


Heliógrafo de Campbell-Stokes

Es un instrumento graficador que se utiliza para medir las horas de insolación, consiste en una esfera de vidrio macizo en cuyo foco se concentran los rayos solares a medida que el sol avanza sobre

la esfera. Bajo la esfera se coloca una cartulina donde están marcadas las horas y fracciones de hora del día, donde posteriormente se pueden determinar los periodos despejados, nublados o medio nublados según se haya carbonizado la cartulina (figura 1.12).

Figura 1.12
Heliógrafo de Campbell-Stokes y cartulinas estacionales



Pirheliómetro

Mide la radiación solar incidente directa sobre un colector perpendicular a los rayos solares (figura 1.13).

Figura 1.13
Pirheliómetro



Pirgeómetro

Mide la radiación de onda larga (figura 1.14). Es usado para medir hemisféricamente el intercambio de la radiación de onda larga entre una superficie horizontal ennegrecida (el detector) y una blanca, por ejemplo el cielo o el suelo.

Figura 1.14
Pirgeómetro



Radiómetro neto

Ocasionalmente es llamado también pirradiómetro, mide el flujo neto de la radiación de onda larga y corta, por lo tanto, permite hacer el balance de energía entre la radiación incidente de onda corta más la infrarroja (de onda larga) con relación a la onda corta y larga infrarroja (reflejada y emitida) por la superficie del suelo (figura 1.15). El radiómetro neto incluye dos detectores: uno con la cara hacia arriba y el otro hacia abajo.

Figura 1.15
Pirradiómetro



Bibliografía

- Duffie, J. y Beckman, W. (1991). *Solar engineering of thermal process*. A Wiley-Interscience Publication. Hoboken, New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Jacobson, M. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. New York: Cambridge University Press.
- Llasat, M. y Snyder, R. (1998). Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91: 209-221.
- Hernández, E.; Tejeda, A. y Reyes, S. (1991). *Atlas solar de la República Mexicana. Textos Universitarios*. Xalapa, México: Universidad de Colima/Universidad Veracruzana.
- Olgyay, V. y Olgyay, A. (1957). *Solar control and shading devices*. Princeton: Princeton University Press.
- Rehman, S. y Halawani, T. (1997). Global solar radiation estimation. *Renewable Energy*, 12: 369-385.

CAPÍTULO II

BASES FÍSICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR

Irving R. Méndez-Pérez

El Sol como fuente de radiación

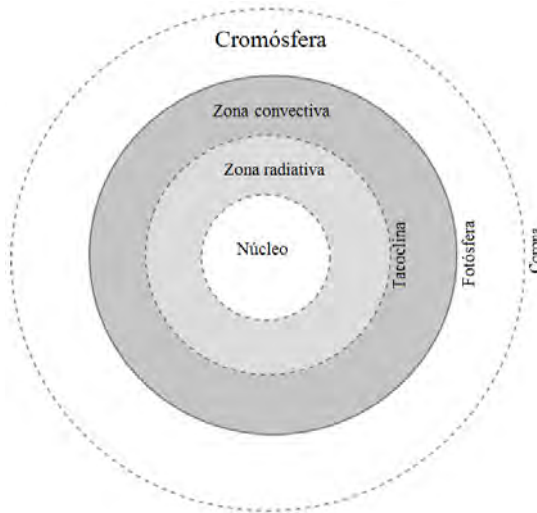
La energía que sostiene y da vida a la Tierra proviene del Sol en forma de radiación. De manera inagotable e ininterrumpida alimenta la máquina atmosférica. Es el motor del clima.

El Sol es una esfera gaseosa, compuesto en 74% de hidrógeno y 25% de helio; el restante 1% consta de oxígeno, nitrógeno, carbón, silicio, magnesio y calcio. Tiene un radio de aproximadamente 6.96×10^5 km y un diámetro de aproximadamente 109 veces el de la Tierra (Wells, 1999).

La estructura del Sol está dividida principalmente por cuatro partes: el núcleo, la superficie visible o fotosfera, y las dos capas de su atmósfera: la cromósfera y la corona (figura 2.1).

En el núcleo del Sol, la energía es producida por reacciones nucleares (fusión de cuatro átomos de hidrógeno en uno de helio, con una pequeña pérdida de masa). La fotosfera es la capa externa brillante que emite la mayor parte de la radiación. Consiste en una zona de gases ardientes de aproximadamente 300 km de grosor, donde se encuentra compuesta en un 90% de hidrógeno y 10% de helio, y su temperatura efectiva es del orden de los $6,000^\circ$ K. Presenta unos desniveles con pequeñas áreas brillantes llamados gránulos que tienen un promedio de 1,000 km de diámetro.

Figura 2.1
Estructura del Sol



Fuente: Benestad (2006).

La cromósfera es la capa que continúa de la fotosfera. Es una capa delgada de gases incandescentes, con una temperatura de $10,000^{\circ}\text{ K}$. Dentro de esta capa se pueden encontrar electrones y protones que escapan como una corriente llamada viento solar (con una velocidad de $1.5 \times 10^6\text{ km/hr}$) (Hidore y Oliver, 1993). Dicho viento solar da origen a la magnetósfera; es decir, crea un campo magnético en dos bandas a 3,000 y 16,000 km de altitud, conocidas como los cinturones de Van Allen (Barry y Chorley, 1992).

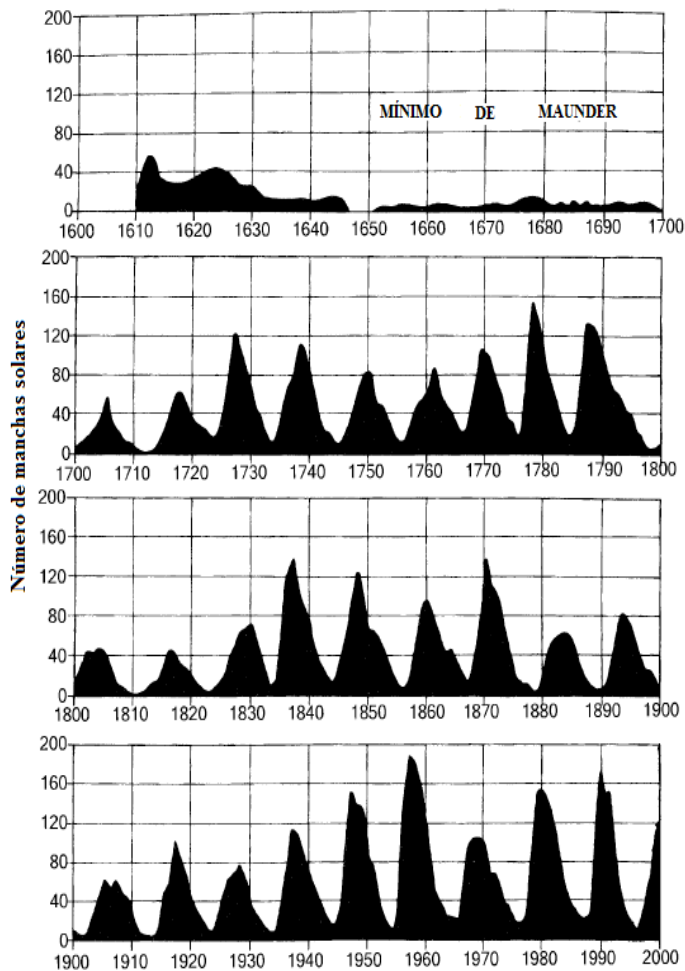
Variabilidad solar

Cuando se habla de una variabilidad solar se puede tratar en dos aspectos: la que ocurre en el mismo Sol y la que nosotros recibimos; es decir, la variabilidad en la radiación solar incidente sobre la Tierra. Así, la variabilidad solar es debida a la actividad que genera las manchas solares (intrínseca) y a factores geométricos de la relación Sol-Tierra, que determinan las variaciones estacionales, así como a factores atmosféricos.

Las manchas solares

Dentro de la fotosfera se encuentran unas manchas solares (*sunspots*, en inglés) cuyo número aumenta (máximo) y disminuye (mínimo) en un ciclo de aproximadamente 11 años. En realidad, el Sol presenta varias decenas de manchas, pero entre los años 1645 y 1715 sólo se registraron unas cuantas (figura 2.2).

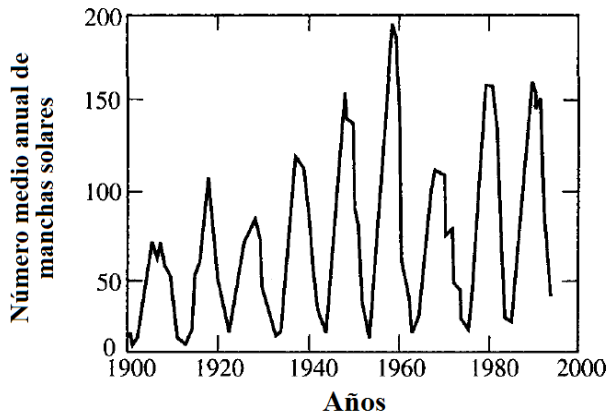
Figura 2.2
Mínimo de Maunder



Fuente: Barry y Chorley (1992).

A esta ausencia de manchas solares se le conoce como el Mínimo de Maunder. El hecho de que las manchas solares sean cíclicas se debe a que el Sol tiene una apolaridad, que se invierte cuando tiene una máxima actividad solar. Durante los últimos años se han incrementado los picos máximos de las manchas solares (véase figura 2.3).

Figura 2.3
Marcha anual de las manchas solares
durante los últimos cien años



Fuente: Seinfeld y Pandis (1998).

Factores geométricos

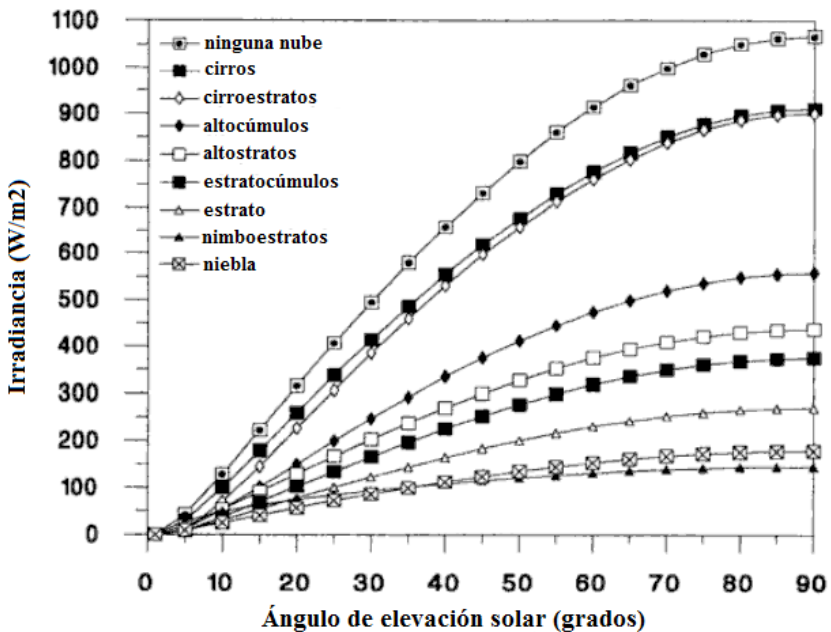
Existen tres factores geométricos que pueden determinar las variaciones estacionales de la radiación solar incidente sobre la Tierra, y son: la inclinación del eje de rotación de la Tierra que varía entre 22° y 24.5° con respecto al eje normal del plano de la eclíptica y tiene un periodo de aproximadamente 41,000 años; la excentricidad (cociente entre la semidistancia focal, o sea la longitud que va del centro de la elipse a uno de los focos, y la longitud del semieje mayor) de la órbita elíptica de la Tierra que varía de 0.005 a 0.060 ocurriendo en un periodo de aproximadamente 95,000 años, lo que produce un cambio del orden de 10% en la radiación incidente sobre la Tierra en el afelio y en el perihelio; y por último, la precesión

(o *cabeceo*, tipo trompo), del eje de rotación de la Tierra que es de aproximadamente 21,000 años (Barry y Chorley, 1992; Wells, 1999).

Existen cuatro factores geométricos que pueden determinar las variaciones de la radiación solar incidente en la superficie de la Tierra: la inclinación del eje de rotación de la Tierra, la excentricidad de la órbita de la Tierra, la periodicidad de la Tierra y la latitud.

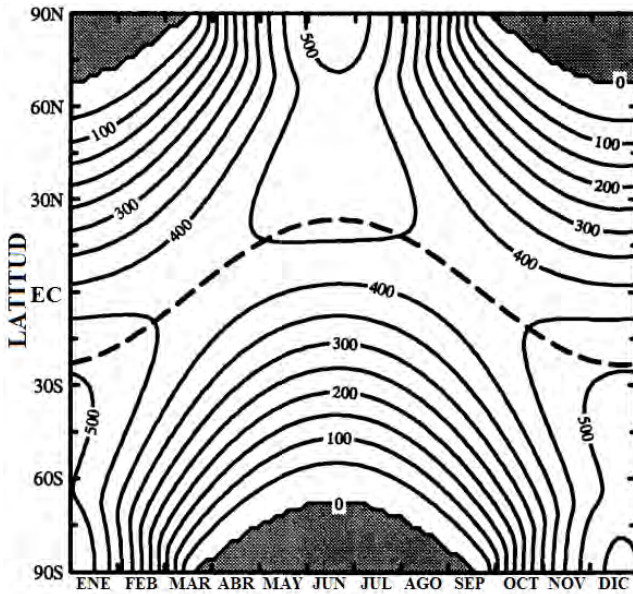
Además de las manchas solares y los factores geométricos, se debe añadir como generador de variabilidad el efecto de la atmósfera y la cubierta nubosa (véanse figuras 2.4 y 2.5).

Figura 2.4
Irradiancia solar debajo de una cubierta nubosa
para varios tipos de nubes y altura solar



Fuente: Campbell y Norman (1998).

Figura 2.5
Isolíneas de insolación promedio diario
en el tope de la atmósfera en función de la latitud y estación



Fuente: Hartmann (1994).

Por otra parte, el Sol irradia un flujo de energía en forma casi constante, a lo que se le llama luminosidad solar. $L_0 = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$. Se puede calcular la densidad de flujo promedio en la fotosfera dividiendo este flujo de energía por el área de la fotosfera $r_{\text{fotosfera}} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$, resultando $6.4 \times 10 \text{ W/m}^2$ (Hartmann, 1994).

Si se considera que la densidad de flujo es uniforme en una esfera (el Sol), entonces el flujo en cualquier distancia (d) desde su ubicación (S_d) se puede expresar como:

$$\text{Flujo} = L_0 = S_d A \pi d^2 \quad (2.1)$$

La energía solar que llega a la Tierra es tradicionalmente cuantificada en términos de la constante solar (I_0). Ésta es la radiación solar recibida en ausencia de la atmósfera, a la distancia media Tierra-Sol ($1.496 \times 10^{11} \text{ m}$), en promedio sobre una superficie plana orientada perpendicularmente a los rayos solares.

$$\text{Constante solar} = S_0 = \frac{L_0}{4\pi d^2} \quad (2.2)$$

La constante solar puede variar debido a la luminosidad y a las variaciones orbitales, de modo que la constante no es *tan constante*; por ejemplo, cuando pasa de un número máximo de manchas solares a un número mínimo, la constante solar decrece aproximadamente 1.5 W/m^2 (Barry y Chorley, 1992).

Como se vio anteriormente, el valor de la constante solar se puede obtener mediante ecuaciones, pero también a través de mediciones por satélites; por ejemplo, en el periodo de 1978 a 1991, con el satélite *Nimbus 7 Earth Radiation Budget* (ERB) se reportó un promedio de la S_0 de aproximadamente $1,372.0 \text{ W/m}^2$ con una desviación estándar de 0.4 W/m^2 , mientras que en el periodo de 1980 a 1988 el satélite *Solar Maximum Misión/Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor* (SMM/ACRIM) reportó un valor aproximadamente de $1,365.0 \text{ W/m}^2$ con una desviación estándar de 0.6 W/m^2 (Kidder y Vonder Harr, 1995). De acuerdo a Hartman (1994) el valor internacionalmente aceptado es de $1,367 \text{ W/m}^2$.

La naturaleza de la radiación

La radiación electromagnética es una forma de energía que es emitida por todos los objetos cuya temperatura es superior al cero absoluto (Hartmann, 1994). Esta energía viaja en forma de onda a la velocidad de la luz en el vacío (c). La transferencia de energía en forma de ondas varía de acuerdo a la longitud de onda, amplitud, frecuencia y velocidad.

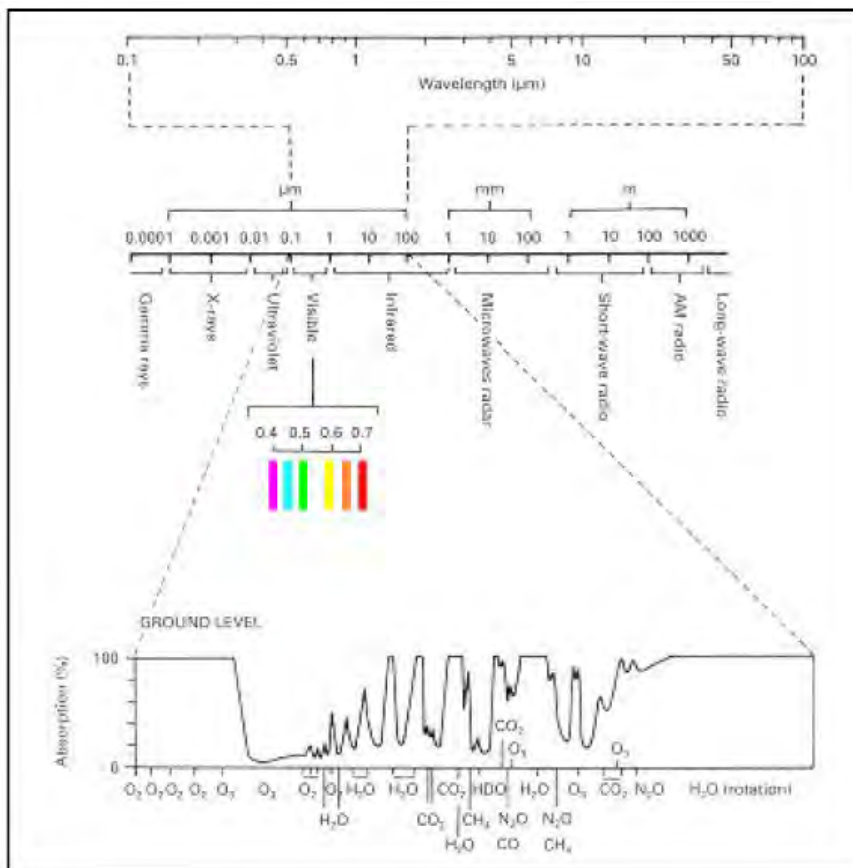
La frecuencia ν y la longitud de onda λ están inversamente relacionadas en una correspondencia uno a uno:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.3)$$

Las unidades de la longitud de onda son las subdivisiones del metro, *p.e.* micrómetros ($1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), nanómetros ($1\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$), centímetros (cm), etcétera, mientras que las unidades de frecuencia son los hertz (1 periodo/seg).

La característica principal de la radiación es la longitud de onda de propagación. Todos los cuerpos irradian en un gran número de longitudes de onda, y toda la serie completa de posibles longitudes de onda es llamada el *espectro electromagnético* (figura 2.6).

Figura 2.6
Espectro electromagnético



Fuentw: Henderson-Sellers y Robinson (1999).

Climatológicamente la radiación de interés está dentro del rango de longitud de onda que va de 0.1 a 100 μm (Henderson-Sellers y Robinson, 1999). Dentro de esta región, el ojo humano responde

a una muy pequeña porción, la cual se le conoce como *luz visible*. Para ser más específico, está dentro del rango de 0.4 a 0.8 μm , que corresponde al 99% de la energía emitida por el Sol, de la cual 9% es ultravioleta ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$), 49% es visible ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$) y 42% es infrarroja (Peixoto y Oort, 1992).

Al rango de 7 a 13 μm se le conoce como la *ventana atmosférica*, donde aproximadamente el 80% de la radiación emitida por la Tierra en esta región escapa al espacio (Seinfeld y Pandis, 1998).

Propiedades radiativas

Para entender el concepto de cuerpo negro es necesario familiarizarse con otros conceptos, como: emisividad, absorptividad, reflectividad y transmitividad. Según Arya (1998) la *emisividad* ($\epsilon\lambda$) se define como la razón de la energía emitida por una superficie a una longitud de onda y una temperatura dadas entre la energía emitida por un cuerpo negro a la misma longitud de onda y a la misma temperatura. Por su parte la *absortividad* ($\alpha\lambda$) se define como la razón de la cantidad de energía radiante absorbida por una superficie entre la cantidad total de energía incidente sobre la misma superficie. La *reflectividad* ($\rho\lambda$) es definida como la razón de la cantidad de radiación reflejada por una superficie entre la cantidad total incidente sobre la misma superficie. Finalmente, la *transmitividad* ($\tau\lambda$) se define como la razón de la radiación transmitida por el subsuelo entre la cantidad total incidente sobre una superficie.

En la tabla 1.2 del capítulo 1 se muestran algunas cantidades en porcentajes de emisividad infrarroja para superficies de agua y suelo, naturales, vegetación y misceláneas.

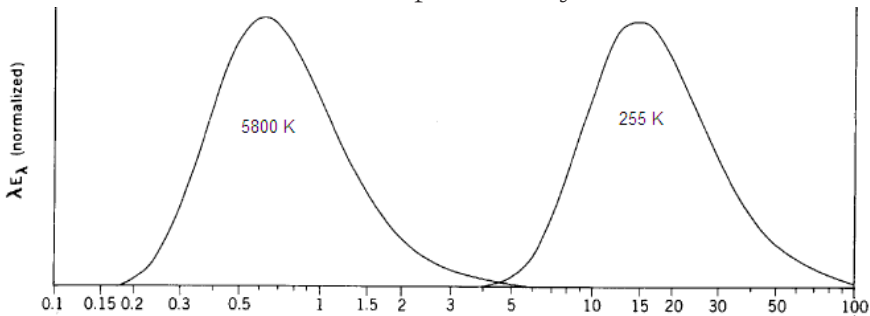
Cuerpo negro

La máxima cantidad de radiación emitida a cierta temperatura es llamada la radiación de *cuerpo negro*. Un cuerpo que irradia —para cualquier longitud de onda— la máxima intensidad posible de radiación a una cierta temperatura es llamado *cuerpo negro*, que puede ser caracterizado por la propiedad de que toda la energía que absorbe, también la emite (Jacobson, 1999).

De acuerdo a esa definición, el Sol se comporta como un cuerpo negro; mientras que de acuerdo a Jacobson, la Tierra tiene una emisividad promedio actual de 0.96-0.98, es decir, no llega a emitir la totalidad de la energía absorbida, pero aun así se le considera como un *cuerpo negro*. Notándose que la radiación del cuerpo negro es isotrópica, lo que significa que la intensidad es independiente de la dirección.

Desde luego, un cuerpo negro cumple con las leyes de Plank, de Stefan-Boltzmann y de Kirchhoff, enunciadas en el capítulo 1. De la primera se desprende que un *cuerpo negro* posee un solo máximo de longitud de λ_m onda y se incrementa con la temperatura. La figura 2.7 muestra a dos cuerpos perfectamente radiadores con temperaturas que corresponden al Sol ($5,800^\circ \text{ K}$) y a la Tierra (288° K). De esta figura se muestra que el pico de la curva solar es aproximadamente de $0.474 \mu\text{m}$, al que le corresponde un color verde-azul del espectro electromagnético, por lo que el Sol sería de este color. Sin embargo, el color amarillo del Sol es el resultado de la sensibilidad relativa del ojo humano y la interacción de la radiación de la atmósfera de la Tierra (Henderson-Sellers y Robinson, 1999). Por su parte, el pico de la curva terrestre la encontramos en , lo que implica que la radiación solar es llamada *radiación de onda corta* y la radiación terrestre como *radiación de onda larga*.

Figura 2.7
Curvas de Planck para el Sol y la Tierra



Fuente: Peixoto y Oort (1992).

Una ley adicional que vale la pena comentar es la de desplazamiento de Wien. Derivado de la ecuación (2.3) con respecto a λ e igualando a cero, se obtiene la longitud de onda de máxima emisión λ_{max} :

$$\lambda_{max} = 2898/T \quad (2.4)$$

donde:

λ_{max} está en μm y T en K

La *ley de desplazamiento de Wien* dice que, la longitud de onda de máxima emisión de un cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura absoluta. Usando esta relación la temperatura de un cuerpo negro puede ser determinada por la longitud de onda monocromática de máxima emisión de radiación. Esta ley muestra que la radiación emitida por la superficie terrestre tiene un pico aproximado de , cayendo en la región *infrarroja* del espectro electromagnético.

Como ya se mencionó, la longitud de máxima emisión de la radiación solar es de por lo que resulta que la temperatura de la superficie del Sol es de aproximadamente . Se tiene que hacer mención que las leyes de Wien y de Stefan-Boltzman fueron obtenidas a partir de las leyes de Planck.

Ley de Kirchhoff

La *ley de Kirchhoff* dice que en un equilibrio termodinámico, la emisividad y la absorptividad de una sustancia son iguales ($\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$), lo que implica que una sustancia que sea un perfecto emisor de radiación ($\epsilon_{\lambda} = 1$) es también un perfecto absorbedor de radiación ($\alpha_{\lambda} = 1$) (Jacobson, 1999).

Kidder y Vonder Harr (1995) señalan que esta ley solamente se aplica a sustancias que estén en un equilibrio termodinámico local, suposición válida por debajo de los 100 km de la atmósfera de la Tierra, porque encima de los 100 km las colisiones entre las moléculas son suficientes para que haya distintas especies químicas que influyen en tener diferentes temperaturas termodinámicas.

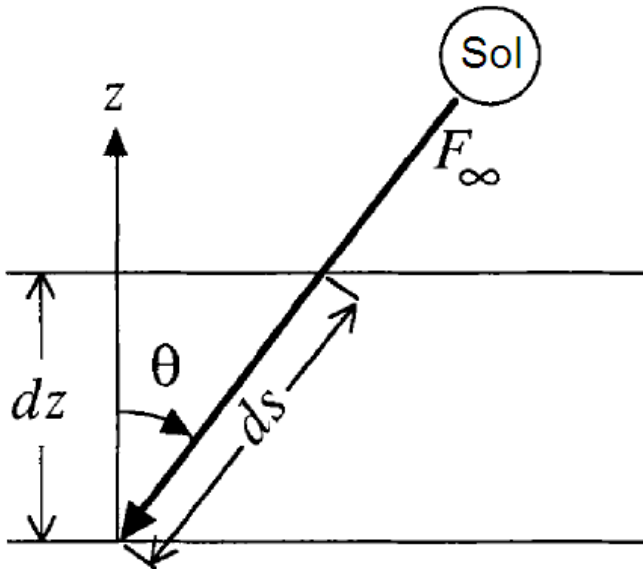
Ley de Lambert-Bouguer-Beer

La *ley de Lambert-Bouguer-Beer* (1995) también se le conoce como la ley de absorción. Expresa el cambio en la intensidad de la radiación debido a la absorción de la radiación (Peixoto y Oort, 1992).

Si bien la radiación solar puede ser absorbida por los gases atmosféricos, por el momento se va a desdenar la dispersión (más adelante se hablará de ella) y vamos a considerar que la atmósfera puede solamente emitir y absorber la radiación solar.

En la figura 2.8 se considera un plano perpendicular al rayo incidente para ignorar la esfericidad de la Tierra y una sola dirección de radiación (ángulo cenital). La absorción por una capa de espesor es proporcional al flujo de radiación (F) multiplicado por la masa absorbida a lo largo de la línea de radiación.

Figura 2.8
Diagrama de la ley de absorción



Fuente: Hartmann (1994).

La constante de proporcionalidad es reducida por consideraciones de la mecánica cuántica, lo cual determina la probabilidad de que un fotón con energía pueda ser absorbido por una molécula. A esto se le conoce como el *coeficiente de absorción* (k_{abs}) y depende de la densidad del medio; particularmente para la atmósfera, la presión y la temperatura, que son variables medibles fácilmente.

El cambio del flujo de radiación (dF) a lo largo de un segmento de longitud, puede escribirse como:

$$dF = -k_{abs} \rho_{\alpha} F ds \quad (2.5)$$

Donde la densidad de lo absorbido es ρ_{α} y el coeficiente de absorción es k_{abs} . Las unidades de k_{abs} son de área/masa, lo que algunas veces es también llamado el coeficiente de absorción de la sección transversal o coeficiente de absorción de masa.

Siguiendo a Peixoto y Oort (1992), se integra la ecuación (2.5) entre $s=0$ y $s=s_1$ y se produce el flujo emergente $F(s_1)$:

$$F(s_1) = F(0) \exp(-\int_0^{s_1} k_{abs} \rho_{\alpha} ds) \quad (2.6)$$

Esta última ecuación es la ley de Lambert-Bouguer-Beer. Se puede deducir una ley similar si se le incorpora la dispersión; en este caso se utiliza el coeficiente de dispersión k_s . Si ocurre simultáneamente la absorción y la dispersión se puede escribir como $k = k_{abs} + k_s$, donde k es llamado el *coeficiente de extinción* (en 1/cm), la transmitividad de la atmósfera en una longitud de onda dada puede escribirse como:

$$\tau_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda 0}} = \exp(-\int_0^{\infty} k_{\lambda} \rho_{\alpha}) \quad (2.7)$$

Procesos de la luz

La absorción es uno de los procesos que afectan a la radiación electromagnética en la atmósfera de la Tierra. Otros procesos son: *reflexión*, *refracción*, *dispersión* y *difracción*. Jacobson (1999) define a la *reflexión* como el fenómeno que ocurre cuando una onda o fotón de la radiación es absorbida por un objeto y remitido con un ángulo de

reflexión igual al ángulo de incidencia. El albedo o reflectividad es la fracción de la luz incidente reflejada en una longitud de onda o aspecto dado. En el capítulo anterior (tabla 1.1) se muestran los promedios de los albedos para distintos tipos de superficies y se observa que el albedo de la superficie terrestre y la atmósfera juntos (*albedo planetario*), es de aproximadamente 30%. Por su parte, dos terceras partes de la superficie de la Tierra están cubiertas por agua, las cuales tienen un albedo de entre 5 y 20%, con un valor típico de 8%, dependiendo del ángulo de incidencia de la radiación solar. Los suelos y los bosques también tienen un albedo bajo, la mayor parte de la reflectividad de la Tierra-Atmósfera es debida a la nubosidad y al hielo, los cuales tienen un mayor albedo.

La *refracción* ocurre cuando una onda o fotón atraviesa un medio de una densidad y entra a otro medio de otra densidad, cambiando el ángulo de la onda incidente con respecto a la superficie normal. El ángulo de refracción está relacionado con el ángulo de incidencia por la *ley de Snell*:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} \quad (2.8)$$

Donde n es el índice real de refracción o índice refractivo (adimensional), θ es el ángulo de incidencia o refracción, y los subíndices 1 y 2 son la luz incidente y la refractada, respectivamente. El índice real de refracción es la razón de la velocidad de la luz en el vacío (c) entre la velocidad de luz, pero en un diferente medio (c_1). Así:

$$n_1 = \frac{c}{c_1} \quad (2.9)$$

Absorción de gases en el espectro electromagnético

Ciertos gases atmosféricos absorben radiación solar (ultravioleta, visible y cerca del infrarrojo). De los enlistados en la tabla 3.1, el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el nitrato (NO_3) absorben en el espectro visible. El resto absorbe en el espectro ultravioleta (Jacobson, 1999).

Tabla 2.1
Longitudes de onda y absorción
en el espectro solar por diferentes gases atmosféricos

Gas	Absorción Longitud de onda (m)	Gas	Absorción Longitud de onda (m)
N ₂	< 0.1	N ₂ O ₅	< 0.38
O ₂	< 0.245	HNO ₃	< 0.33
O ₃	0.17 – 0.35; 0.45 – 0.75	HO ₂ NO ₂	< 0.33
CO ₂	< 0.21	HCHO	0.25 – 0.36
H ₂ O	< 0.21	CH ₃ CHO	< 0.345
H ₂ O ₂	< 0.35	CH ₃ CO ₃ NO ₂	< 0.30
NO ₂	< 0.71	HCl	< 0.22
N ₂ O	< 0.24	CFCl ₃	< 0.23
NO ₃	0.41 – 0.67	CF ₂ Cl ₂	< 0.23
HONO	< 0.4	CH ₃ Cl	< 0.22

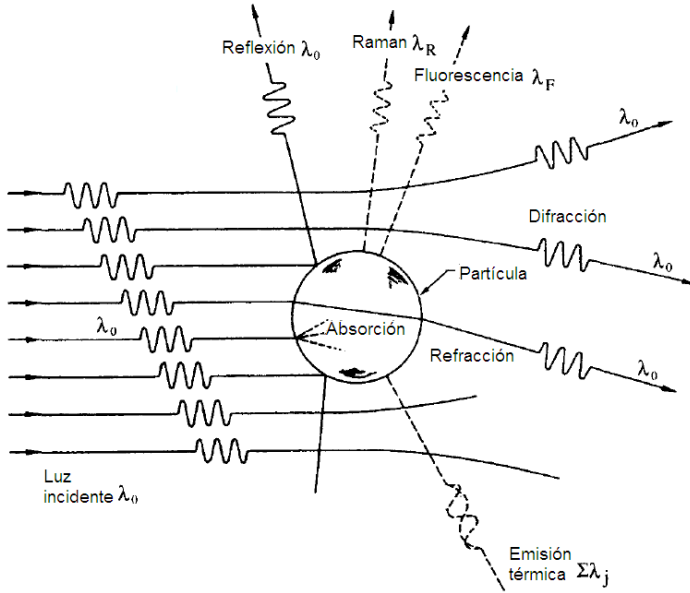
Fuente: Jacobson (1999).

Los gases que mejor absorben la radiación de onda larga son el vapor de agua (H₂O), el bióxido de carbono (CO₂) y el ozono (O₃). Estos tres son conocidos como *gases de invernadero* (*greenhouse*, en inglés), debido a que son transparentes a la radiación solar pero son absorbentes de la radiación infrarroja.

La figura 2.9 representa los diferentes procesos que pueden ocurrir cuando interactúa la radiación con una partícula.

Los procesos de dispersión inelásticos incluyen la *dispersión de Raman* y la *fluorescente*. Seinfeld y Pandis (1998) mencionan que el proceso de interés en la interacción de la radiación solar con los aerosoles atmosféricos, es la dispersión elástica. La intensidad de la dispersión es mayor conforme se incrementa el tamaño de la partícula. Esto se presenta cuando un fotón se encuentra con un obstáculo en la atmósfera sin que ésta lo absorba. El único efecto de la dispersión es cambiar la dirección de viaje del fotón, puede ser en todas direcciones pero con fines de modelación sólo se va a considerar la dispersión hacia arriba y hacia abajo.

Figura 2.9
Mecanismos de interacción
entre la radiación incidente y una partícula



Fuente: Seinfeld y Pandis (1998).

Existen dos teorías relacionadas con la dispersión: la *de Rayleigh* y la *de Mie*. La primera dice que la cantidad y dirección de dispersión depende de la razón del radio de la partícula dispersora a la longitud de onda de energía; además de que la cantidad de dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. El color azul es el ejemplo típico de la dispersión en la atmósfera y en el océano. La teoría de Mie muestra que para una esfera dispersadora, la radiación dispersada está en función del ángulo, del índice de refracción y del tamaño del parámetro, definido como:

$$X \equiv \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.10)$$

donde r es el radio de la esfera.

Bibliografía

- Arya, S. (1998). *Air pollution meteorology and dispersion*. New York: Oxford University Press.
- Barry, R. y Chorley, R. (1992). *Atmosphere, weather and climate*. New York: Routledge.
- Benestad, R. (2006). *Solar activity and earth's climate*. Chichester, UK: Springer-Praxis Book in Environmental Science.
- Campbell, G. y Norman, J. (1998). *An introduction to environmental biophysics*. New York: Springer Verlag.
- Hartmann, D. (1994). *Global physical climatology*. San Diego, CA: Academic Press.
- Henderson-Sellers, A. y Robinson, P. (1999). *Contemporary climatology*. London: Logman.
- Hidore, J. y Oliver, J. (1993). *Climatology: an atmospheric science*. New York: Macmillan Publishing Company.
- Jacobson, M. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. New York: Cambridge University Press.
- Kidder, S. y Vonder Harr, T. (1995). *Satellite meteorology: an introduction*. San Diego, CA: Academic Press.
- Peixoto, J. y Oort, A. (1992). *Physics of climate*. New York: AIP Press.
- Rehman, S. y Halawani, T. (1997). Global solar radiation estimation. *Renewable Energy*, 369-385.
- Seinfeld, J. y Pandis, S. (1998). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: John Wiley & Sons.
- Wells, N. (1999). *The atmosphere and ocean: a physical introduction*. New York: John Wiley & Sons.

CAPÍTULO III

RADIACIÓN SOLAR EN MÉXICO

Adalberto Tejeda Martínez, Ivonne M. García-Martínez,
Irving R. Méndez-Pérez, Ubaldo Miranda-Miranda
y José Valentín López-Méndez

Se presenta una descripción de la distribución geográfica de la irradiación solar —global, directa y difusa— en México para cada mes representativo de la estaciones del año: enero para invierno, abril para primavera, julio para verano y octubre para el otoño. El resto de mapas mensuales están disponibles en el anexo I: *Mapas de irradiación solar en México*.

Irradiación solar global

Durante el invierno (figura 3.1) la irradiación global presenta los valores más bajos en el norte del país: 2-2.5 kWh/m² día, y sobre la vertiente del Golfo de México por efecto de los sistemas frontales en esta época. Hacia el sur de la República estos valores aumentan ligeramente conforme disminuye la latitud, alcanzando temporalmente cifras elevadas de hasta 4.5-5 kWh/m² día en la región que comprende los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Morelos, Puebla y Chiapas. En la península de Yucatán se presentan cifras intermedias de 3.5-4.5 kWh/m² día.

Figura 3.1
Irradiación global de enero (kWh/m² día)



En el periodo comprendido entre enero y abril ocurre un aumento de la irradiación global en toda la República Mexicana (figura 3.2). Este aumento es mayor en el noroeste de México con hasta 7 kWh/m² día, mientras que en el resto de la República los valores que se alcanzan son del orden de 6 kWh/m² día.

Figura 3.2
Irradiación global de abril (kWh/m² día)



Durante el verano (figura 3.3) la irradiación global en la República Mexicana es máxima en el noreste y en la península de Baja California (7-8 kWh/m² día). En el resto del país es de 5-6 kWh/m² día, valores bajos que se deben a la entrada de aire marítimo tropical en la porción sur de México.

Figura 3.3
Irradiación global de julio (kWh/m² día)



Para el mes de octubre se muestra en la carta de la figura 4.4 la distribución correspondiente de la irradiación solar global en México. Los valores son de los más bajos de todo el año debido a los máximos de nublados y las lluvias que se presentan en este mes (y en septiembre) primordialmente. Además, octubre inicia la transición a los fenómenos meteorológicos del invierno, por lo que en la región del noreste (Baja California, Sonora y Chihuahua) se observa un mínimo por efecto de las masas de aire polar que empiezan ingresar al territorio mexicano.

Figura 3.4
Irradiación global de octubre ($\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ día}$)



La figura 3.5 corresponde al mapa de irradiación solar global anual. La irradiación alta que llega a la región del noroeste se debe al anticiclón semipermanente del Pacífico, viéndose ésta disminuida en verano por las nieblas originadas por la inversión de los alisios, y en invierno por la influencia de los sistemas frontales y la corriente en chorro. En la vertiente del Golfo, estos valores anuales bajos ($5.5\text{-}6 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ día}$) se deben a los sistemas polares y al aire marítimo tropical del verano.

Figura 3.5
Irradiación global anual (kWh/m^2 día)



Irradiación solar directa

La irradiación directa que llega a la República Mexicana durante la temporada invernal tiene los valores anuales más bajos, debido al paso de frentes fríos y vaguadas polares (en la figura 3.6 se muestra la irradiación directa de enero). Estos valores se encuentran entre $1.5\text{-}2 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día en algunas regiones de latitudes mayores a 26°N , así como en el norte de Sinaloa, noroeste de Durango, norte de Nuevo León y Tamaulipas, en la mayor parte del estado de Veracruz, Tabasco y en la sierra septentrional de Chiapas. La irradiación directa en la región central del país es de $2.5\text{-}3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día y aumenta $0.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día en los estados ubicados en el sur (Colima, Michoacán, Guerrero, sur del Estado de México, Distrito Federal, Puebla, Oaxaca y sur de Chiapas).

Figura 3.6
Irradiación directa de enero (kWh/m^2 día)



Durante el mes de abril la irradiación directa que alcanza la superficie de México es de $4\text{-}4.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día en la mayor parte del país (como se aprecia en la figura 3.7), con valores ligeramente más altos ($5\text{-}5.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día) en la región que ocupan los estados de Baja California Sur, occidente de Sonora, sur de Sinaloa, Durango y Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Morelos, sur del Estado de México, Guanajuato, así como el norte y occidente de la península de Yucatán, debido a la inversión térmica de los vientos alisios.

Figura 3.7
Irradiación directa de abril (kWh/m^2 día)



En el mes de julio (figura 3.8) se observa cómo los valores de la irradiación directa se modifican para encontrar ahora los más altos (hasta $6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día) al norte de la República Mexicana y los más bajos al sur, debido al flujo de aire marítimo tropical y a que la irradiación en esta época del año es perpendicular al Trópico de Cáncer ($23^\circ 26' \text{N}$), y es por lo tanto mayor en las regiones cercanas a él. En la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur, Sierras Madre y septentrional de Chiapas, Veracruz, Tabasco y la península de Yucatán, la irradiación directa está entre los 2.5 y $3.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ día.

Figura 3.8
Irradiación directa de julio (kWh/m² día)



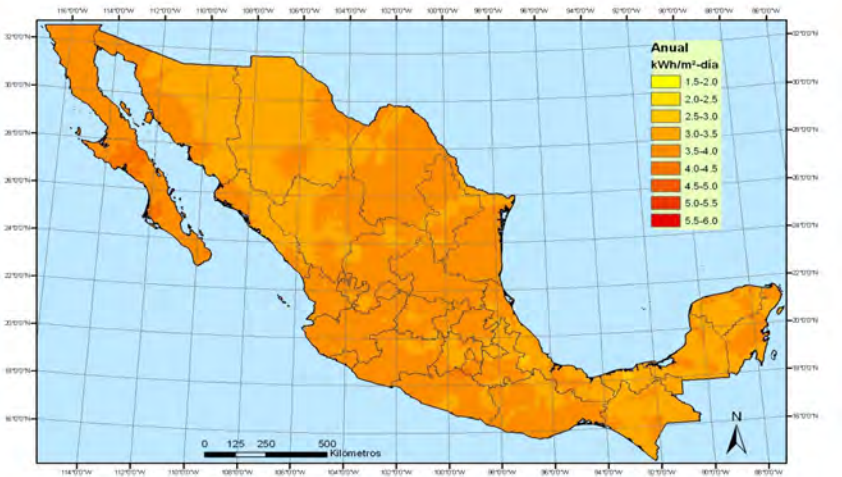
En la figura 3.9 podemos observar que la cantidad de irradiación directa de octubre que alcanza la superficie, disminuye de manera uniforme en todo el país por efectos de la nubosidad y lluvias frecuentes en la época, con valores de 2.5-3 kWh/m² día, y máximos temporales en el norte de Guerrero y en Baja California Sur, así como mínimos en el noroeste de Chihuahua, Chiapas y Tabasco.

Figura 3.9
Irradiación directa de octubre (kWh/m² día)



La irradiación directa anual que recibe el país se muestra en la figura 3.10. Se nota que los valores promedio más elevados ($3.5\text{--}4 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$) de irradiación directa durante el año se encuentran en la península de Baja California y en los estados que se encuentran entre los 106° y 98° de longitud Oeste; es decir, en la parte central de México. Esto ocurre porque en estas regiones el anticiclón semipermanente del Pacífico, la corriente en chorro y en general los sistemas frontales, y la entrada de humedad por aire marítimo tropical en la vertiente del Golfo, no influyen tan fuertemente como en el resto del país donde los valores son más bajos ($2.5\text{--}3 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$).

Figura 3.10
Irradiación directa anual ($\text{kWh/m}^2 \text{ día}$)



Irradiación solar difusa

La irradiación difusa que alcanza la superficie de la República Mexicana durante el mes de enero en el norte del país presenta valores que oscilan entre 1 a $1.25 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$ (figura 3.11), mientras que en el centro y sureste aumentan hasta los 1.50 a $1.75 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$. Cabe mencionar que en el sur de Veracruz, Tabasco, una por-

ción en el norte de Oaxaca y en la sierra septentrional de Chiapas, se presentan los máximos relativos durante el invierno entre 1.75 a 2.00 kWh/m² día. Como se verá más adelante, los valores mencionados son bajos respecto al resto del año y debido a los efectos de los frentes fríos frecuentes en esta temporada, principalmente sobre la vertiente del Golfo de México.

Figura 3.11
Irradiación difusa de enero (kWh/m² día)



Para el mes de abril, la distribución de la irradiación difusa es homogénea en casi todo el país (figura 3.12), con un valor medio de 1.75 a 2.00 kWh/m² día. En dos pequeñas regiones pertenecientes a la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California se presentan valores ligeramente menores (1.25 a 1.50 kWh/m² día, debido a la inversión de los vientos alisios. Por otra parte, se observan regiones en las que se recibe mayor cantidad de irradiación difusa alrededor del equinoccio de primavera; por ejemplo, en el norte de Tamaulipas, centro de Nuevo León, en la parte central de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Estado de México, región central de Tabasco y en la Sierra de Chiapas.

Figura 3.12
Irradiación difusa de abril (kWh/m^2 día)



La cantidad de irradiación difusa se intensifica de abril a julio. En la figura 3.13 se observa que la región occidental y una porción del sureste de la República Mexicana presentan los valores más altos, con 2.25 a 2.50 kWh/m^2 día; mientras que a barlovento de la Sierra Madre Oriental, el sur de Oaxaca, sur de Veracruz, centro de Chiapas y Quintana Roo los valores se encuentran entre los 2.00 a 2.25 kWh/m^2 día.

Figura 3.13
Irradiación difusa de julio (kWh/m^2 día)



Para el mes de octubre disminuye la cantidad de irradiación difusa que llega a la superficie de la República Mexicana (figura 3.14), ello se debe a que la nubosidad es máxima ya que es uno de los meses más lluviosos de todo el año. En este periodo los valores son de 1.25 a 1.50 kWh/m² día en los estados del norte: Baja California y Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila y el norte de Durango; de 1.50 a 1.75 kWh/m² día en la meseta central y península de Yucatán; y de 1.75-2 en los estados de Tabasco, sur de Veracruz, Chiapas y parte de Campeche.

Figura 3.14
Irradiación difusa de octubre (kWh/m² día)



La figura 3.15 muestra la distribución de la irradiación difusa anual. De la parte central al norte se encuentran durante todo el año valores relativamente menores que en el resto del territorio; mientras que en el centro y la parte sur la irradiación aumenta. En el norte los valores van desde los 1.50 a 1.75 kWh/m² día. Como ya se mencionó, se atribuye al frente polar y al descenso de la corriente en chorro hacia nuestro país en invierno y a la inversión térmica de los alisios durante el verano, con un mínimo localizado en el noroeste de Baja California y noreste de Sonora (1.25 a 1.50

kWh/m² día); mientras que desde el centro al sur, en todo el Eje Neovolcánico y península de Yucatán se localizan los valores de 1.75 a 2.00 kWh/m² día.

Figura 3.15
Irradiación difusa anual (kWh/m² día)



Métodos de estimación

Los datos con los que fueron elaborados los mapas de irradiación, son en parte observados y en parte estimados. Los procedimientos de cálculo se encuentran de manera operativa en el software *Solex* (véase capítulo 5). Para calibrar *Solex* se utilizó la red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional, que para el año 2001 estaba recién instalada y, por tanto, con instrumentos debidamente calibrados. Esta red cuenta con datos de irradiancia solar global, pero tiene notorios huecos de información en el norte de México. Se ajustaron dos modelos para estimar la irradiación solar diaria media mensual (año 2001) a partir de datos heliográficos y de frecuencias mensuales de días nublados, medio nublados y despejados, para las normales climatológicas 1961-1990 (Servicio Meteorológico Nacional, 2005).

Se utilizaron los datos de once localidades que cuentan tanto con observatorios meteorológicos, de donde proviene la información heliográfica y de frecuencia de estado del cielo, así como con estaciones EMAS (véase tabla 3.1).

Tabla 3.1
Observatorio meteorológico y estaciones EMAS

Localidad	Localidad
1. Aeropuerto de la Ciudad de México	7. Soto la Marina
2. Campeche	8. Tampico
3. Chetumal	9. Tlaxcala
4. Ensenada	10. Tuxpan
5. Jalapa	11. Veracruz
6. Mérida	

Definiciones

A continuación se enuncian las abreviaturas y fórmulas empleadas en el cálculo y estimación de las variables solarimétricas involucradas, así como los estadísticos de prueba que fueron utilizados.

Sh: Soleamiento diario medio mensual (1961-1990) medido con heliógrafo, en horas.

Sr: Soleamiento diario medio mensual (1951-1980) estimado (Tejeda y Vargas, 1996) en horas con la frecuencia de días despejados (*D*), parcialmente nublados (*M*) y nublado (*N*):

$$Sr = 0.31 + 0.48 \left(\frac{D + 0.5M}{N + M + D} \right) \tag{3.1}$$

ESR = Error estándar de regresión o raíz del error cuadrático medio

$$ESR = \sqrt{\frac{\sum (V_0 - V_e)^2}{n}} \tag{3.2}$$

donde:

V_o = valor observado.

V_e = valor estimado.

n = número de observaciones.

$$r^2 = \frac{\sum (V_{ei} - \bar{V}_0)^2}{\sum (V_{oi} - \bar{V}_0)^2} \quad (3.3)$$

donde:

r^2 = coeficiente de determinación

(o coeficiente de correlación (r) al cuadrado)

V_o = valor promedio observado

Q_g = irradiancia global media mensual en W/m^2

Q_e = irradiancia solar extraterrestre media mensual W/m^2

$$Q_e = \frac{I_0}{30R^2} \left[t_0 \sin \varphi \sin \delta + \frac{\tau}{2\pi} \cos \varphi \cos \delta \sin \left(\frac{2\pi t_0}{\tau} \right) \right] \quad (3.4)$$

donde:

I_0 = constante solar: $1367 W/m^2$

R = distancia Tierra-Sol, en metros

t_0 = tiempo solar del amanecer, en radianes

τ = periodo de la rotación terrestre, en segundos

φ = latitud, en grados y décimas (no minutos)

δ = declinación solar, en grados sexagesimales

S_o = Soleamiento astronómico diario medio mensual en horas

$$S_o = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta_{15}) \quad (3.5)$$

donde:

δ_{15} = declinación solar para el día 15 de cada mes, en grados sexagesimales:

$$\delta_{15} = 23.45 \operatorname{sen} 0.986 (284 + n) \quad (3.6)$$

donde:

n = día juliano del año: 1 para el 1 de enero; 365 para el 31 de diciembre)

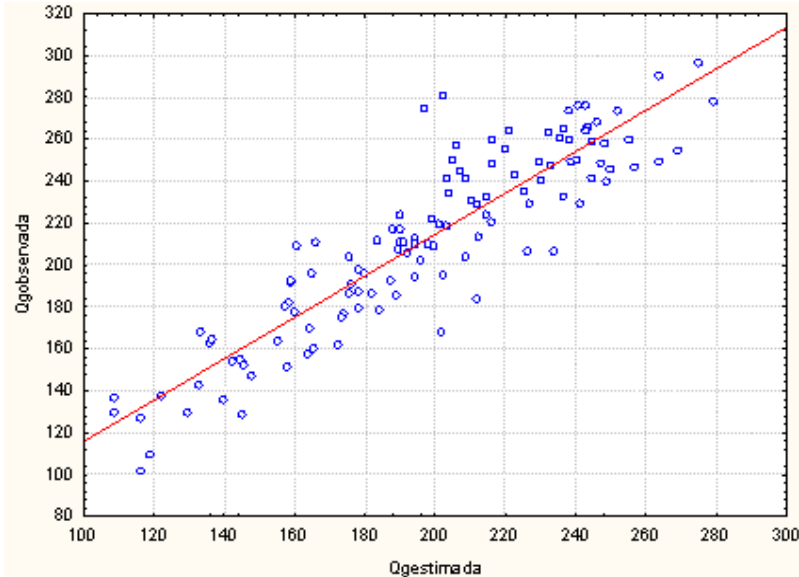
Modelos propuestos

Fue posible ajustar el modelo de Glover y McCulloch (1958) a las condiciones de México, haciendo depender la radiación solar global de las horas de soleamiento medidas con el heliógrafo (Q_{gh} , con un $ESR = 20.9 \text{ w/m}^2$, $r = 0.90$, $r^2 = 81\%$) (véase figura 3.16):

$$Q_{gh} = 17 + Q_e (0.257 \cos \varphi + 0.504 \frac{Sh}{S_o}) \quad (3.7)$$

Figura 3.16

Comparación de la radiación solar global estimada a partir de datos heliográficos normales (1961-1990) y la observada en once estaciones EMAS en el año 2001, w/m^2

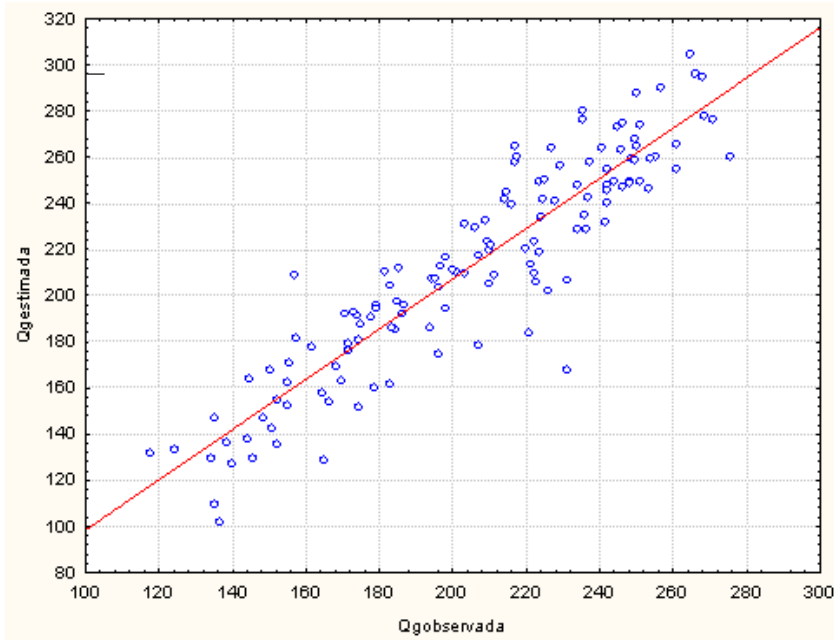


Si el dato de entrada es el tiempo de soleamiento estimado con la frecuencia mensual de días despejados, medio nublados y nublados (según Tejeda y Vargas, 1996), entonces el modelo (Qg_{DMN}) tiene un $ESR = 20.3 \text{ w/m}^2$, $r = 0.91$ y $r^2 = 84\%$ (véase figura 4.17), cuya ecuación es:

$$Qg_{DMN} = -10.34 + Qe (0.2834 \cos \varphi + 0.556 Sr) \quad (3.8)$$

Figura 3.17

Comparación de la radiación solar global estimada a partir de frecuencias de días nublados, medio nublados y despejados (1961-1990) y la observada en once estaciones EMAS en el año 2001, w/m^2



Estos modelos se usaron para estimar la radiación global anual en las localidades mencionadas en la tabla 3.2 (se incluyen las estimaciones usando como datos de entrada las horas heliográficas y las frecuencias de días nublados, medio nublados y despejados).

Tabla 3.2
Radiación global anual (MJ/m^2) estimada a partir
de las horas heliográficas (Ggh) y las frecuencias
de días nublados, medio nublados y despejados (Qg_{DMN})

Localidad	Qgh	Qg_{DMN}	Qg medida
Hermosillo	6532.6	7109.7	6821.1
Chihuahua	6815.4	6767.9	6791.7
San Luis Potosí	6139.4	6673.2	6406.3
Tepic	6649.7	7090.1	6869.9
Oaxaca	S/D	7296.3	7296.3
Tuxtla Gutiérrez	5947.8	7041.7	6494.8
Chilpancingo	6358.0	7856.1	7107.0
Piedras Negras	5920.8	6379.8	6150.3

Bibliografía

- Glover, J. y McCulloch, J. (1958). The empirical relation between solar radiation and hour of sunshine. *Quar. J. of the R. Meteo. Soc.*, 84: 55-60.
- Servicio Meteorológico Nacional (2005). Consultado en febrero 2014. Disponible en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=28.
- Tejeda, A. y Vargas, A. (1996). A correlation between visual observations and instrumental records of cloudiness in Mexico. *Geofísica Internacional*, 35: 421-424.

CAPÍTULO IV

GEOMETRÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES

Gabriel Gómez-Azpeitia, Camilo Caicedo Moncayo,
Carlos Escobar Del Pozo y Erik Eduardo Vázquez Fernández

En este capítulo se profundiza en los conceptos relativos a la geometría con que interactúa la radiación, tanto con los edificios como con los dispositivos colectores de energía solar, para su aprovechamiento térmico y fotovoltaico. Primeramente se hará una exposición somera de los factores que determinan la posición relativa del Sol respecto al plano del horizonte de cada punto de la superficie terrestre —al que llamaremos plano de tierra—, así como las ecuaciones que permiten calcular las coordenadas angulares de esa posición en un momento cualquiera. En seguida se hará un recuento de las herramientas cuyo propósito es definir la posición relativa del Sol respecto a nuestro plano de tierra, pero de manera gráfica, sin necesidad de recurrir a cálculos complicados. Estas herramientas son conocidas como diagramas solares, diagramas de las trayectorias solares o simplemente gráficas solares.

En el siguiente apartado se busca acercar a los profesionales de la arquitectura, el diseño y la ingeniería al uso de esas herramientas gráficas que hoy en día se encuentran en numerosas versiones digitales (véase anexo II), algunas incluso gratuitas aunque simples y limitadas, y otras muy sofisticadas pero costosas. En prácticamente todos los programas para el diseño de objetos en 3D se encuentran incorporados los resultados de estas herramientas. Aún así consideramos que es necesario volver a sus raíces y entenderlas cabalmente para estar en condiciones de aprovecharlas óptimamente.

El capítulo concluye con la exposición básica de los conceptos geométricos y los elementos necesarios para diseñar sistemas y dispositivos colectores de energía solar, tanto para fines de calentamiento como para la generación de electricidad fotovoltaica. Por tanto, se presentan los sistemas fotovoltaicos con la descripción de sus elementos y la forma apropiada de conexión a la red eléctrica, así como los sistemas solares térmicos, haciendo una distinción entre colectores planos y de concentración.

Los fundamentos de la geometría solar

La manera en que se mueven los cuerpos en el sistema solar, y más específicamente la dinámica en que interactúan los movimientos del Sol y la Tierra, determinan una geometría particular que debe tomarse en cuenta para comprender cómo, cuándo y en qué magnitud llegan los rayos solares a la superficie terrestre y a cuantos cuerpos se localicen ahí: edificios, colectores solares, etcétera. Se trata de una geometría esférica cuyos componentes deben ser ubicados mediante medidas angulares.

Las particularidades de esta geometría derivan de un hecho singular: el eje de rotación terrestre no es perpendicular al plano de la *eclíptica* (plano que contiene la órbita terrestre). Su oblicuidad de $23^\circ 27'^1$ es la responsable de la diversidad de climas en nuestro planeta y de su variabilidad durante el año. Esto hace que el movimiento aparente del Sol por encima de nuestra cabeza, empiece en un lugar diferente del horizonte cada día. Igualmente, el Sol se oculta en un punto diferente cada vez. Por otra parte, su trayectoria aparente presenta un ángulo, con respecto al plano de tierra, diferente para cada lugar del planeta.

El ángulo que forma la trayectoria aparente con el plano de tierra depende de la latitud (ϕ) del sitio. En el ecuador tal ángulo es de 90° , mismo que se va reduciendo conforme nos acerquemos a los polos. En éstos, el ángulo es de 0° , es decir que la trayectoria aparente del Sol es horizontal. Este simple hecho hace que los periodos de día y noche de una jornada sean diferentes, según la lati-

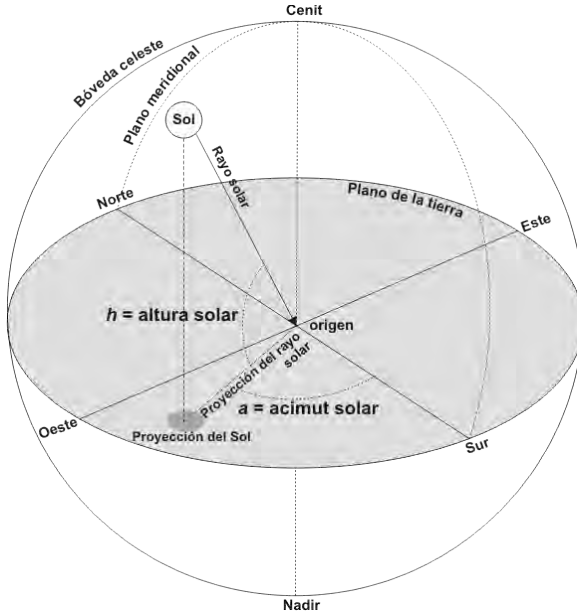
¹ Este valor de la oblicuidad varía en el orden de miles de años, pero para efectos de este libro lo podemos considerar constante.

tud del sitio. En el ecuador la noche y el día duran doce horas todos los días del año; en los polos, en cambio, el día dura seis meses y la noche otros seis. Esto también origina que en los sitios localizados en latitudes intermedias entre $\pm 23^\circ 27'$, los rayos del sol incidirán perpendiculares al plano de tierra hasta dos veces al año. A este fenómeno se le conoce como el paso del Sol por el *cenit* de un sitio. En los sitios ubicados entre el ecuador (latitud cero) y los trópicos (latitud $\pm 23^\circ 27'$) el fenómeno ocurre dos veces al año; por su parte en los trópicos ocurre sólo una vez al año —en el solsticio de verano—. En el resto del planeta los rayos del sol nunca incidirán perpendicularmente.

Por su parte, el hecho de que el Sol salga —o se oculte— en diferentes puntos del horizonte cada día, depende de la *declinación solar* (δ), ángulo formado por el plano del ecuador y la eclíptica, pero medido sobre un plano imaginario construido sobre la línea que une el centro del Sol con el centro de la Tierra. Esto hace que aunque la diferencia absoluta entre el plano del ecuador y la eclíptica siempre es $23^\circ 27'$, medido de esta forma su amplitud varía día a día, según la posición de la Tierra en la órbita. Así, la máxima amplitud (cuando la $\delta = 23^\circ 27'$) determina el momento del *solsticio de verano*; la mínima amplitud (cuando la $\delta = -23^\circ 27'$) determina el *solsticio de invierno*; y los puntos medios (cuando la $\delta = 0^\circ$) determinan los *equinoccios* tanto de primavera como de otoño.

No obstante tanta complejidad, el resultado manifiesta una regularidad que facilita la resolución de un par de ecuaciones que permiten predecir la posición relativa del Sol, respecto del plano de tierra, mediante dos coordenadas angulares: la *altura solar* (h), ángulo formado por el rayo solar y el plano de tierra, y el *acimut solar* (a), ángulo formado por la proyección horizontal del rayo solar y el plano meridional del sitio —plano imaginario que divide en dos partes iguales la trayectoria aparente del Sol en un sitio—; de tal forma que el Sol cruza dicho plano exactamente a medio día (figura 4.1).

Figura 4.1
Coordenadas angulares
para determinar la posición del Sol y la forma de medirlas



Para despejar tales ecuaciones se requieren tres datos: la latitud del sitio (φ), la *declinación* correspondiente a la fecha (δ) y el ángulo correspondiente a la hora (ω).

Las ecuaciones, ya presentadas en el capítulo 1, son:

$$\text{sen } h = \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1.3)$$

$$\text{sen } a = \frac{\cos \delta \text{ sen } \omega}{\cos h} \quad (1.7)$$

Para determinar la *declinación solar* se recurre a la siguiente ecuación:

$$\delta = \varepsilon_{ob} \text{ sen } \left[\frac{360(284 + n_j)}{365} \right] \quad (1.4a)$$

donde:

ε_{ob} = ángulo de oblicuidad de la elíptica considerado como constante
 n_j = día juliano del año: el 1 de enero $n_j = 1$; el 31 de diciembre $n_j = 365$

Para determinar el ángulo horario se usa la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{360 (12 - t)}{24} \quad (1.5)$$

donde:

t = tiempo en horas en formato decimal, *p.e.* 10.50 en vez de 10 h 30 min; 16.25 en vez de 16 h 15 min.

Las gráficas solares²

La gráfica solar es una representación bidimensional plana de la bóveda celeste, en la que se proyectan las trayectorias solares para determinar la posición del Sol en un determinado momento del día (figura 4.2). Así, cada línea de tales gráficos representa la proyección de la trayectoria aparente que seguirá el Sol en un día en particular sobre el plano terrestre local. Como a cada día le correspondería una línea, se dibuja una por mes para evitar confusiones en su lectura; pero como las trayectorias de algunos meses coinciden en su posición, estas suelen proyectarse sobre la misma línea, por lo que es común que las gráficas solares solo muestren siete trayectorias mensuales, en vez de doce. Así el sistema completo representa todas las trayectorias que sigue el Sol en su movimiento aparente sobre nuestro plano de referencia durante el ciclo anual.

A lo largo de cada una de esas trayectorias se marcan puntos que representan las horas del día. Al unirse los puntos que representan una misma hora en las diferentes trayectorias del año, aparecen las llamadas líneas horarias. Cabe aclarar que las líneas horarias como se observan en la figura 4.2, corresponden al tiempo del sol verdadero (TSV) que no necesariamente corresponde al tiempo civil (TC) que marcan nuestros relojes.

² Gómez-Azpeitia (s/f); Caicedo (2011).

La diferencia depende de cuando menos tres factores:

- a) La variación en la velocidad de rotación de la Tierra de acuerdo a la Segunda Ley de Kepler, que se calcula con la llamada ecuación del tiempo (ET) (Duffie y Beckman, 1991):

$$ET = 9.87 \sin 2f - 7.53 \cos f - 1.5 \sin f \quad (1.8)$$

donde:

ET= intervalo de tiempo que separa el paso por el meridiano local del sol verdadero respecto del sol medio, en minutos

$f = 360 (n_j - 81) / 364$ (en grados)

n_j = día juliano del año: el 1 de enero $n_j = 1$; el 31 de diciembre $n_j = 365$

- b) La diferencia entre la longitud del meridiano local y la longitud del meridiano de referencia que determina la hora civil instituida en cada región del país. México tiene cuatro zonas horarias (véase capítulo 1), cada una de ellas ajustada a los meridianos de longitud 75° W (hora del sureste), 90° W (hora del centro), 105° W (hora del Pacífico) y 120° W (hora del noroeste).
- c) El ajuste para el horario de verano en las localidades donde se practica.

Así, cuando resulta estrictamente necesario que la posición relativa del Sol corresponda al TC que se practica en el sitio, las líneas horarias de la gráfica solar deben corregirse mediante la siguiente expresión:

$$TC = TSV - ET - 4(L - L') + C \quad (1.10)$$

donde:

TSV= tiempo solar verdadero

ET= ecuación del tiempo, en minutos

L = longitud geográfica de referencia, en grados (y fracción)

L' = longitud geográfica del sitio, en grados (y fracción)

C = minutos a corregir por efecto cambio de horario; 60 si

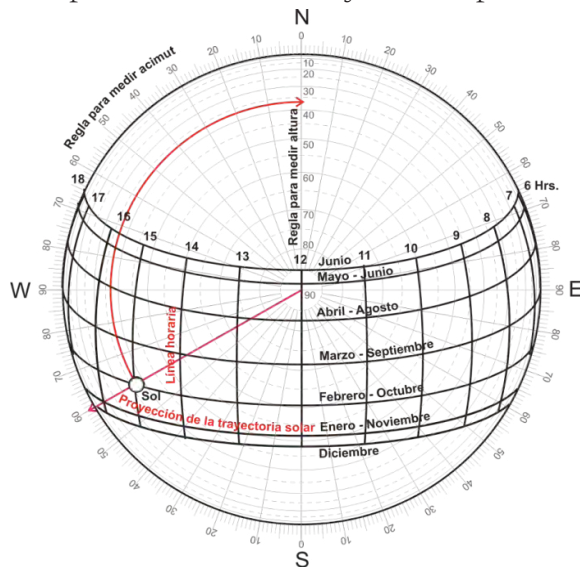
se trata de horario de verano; 0 si se trata de horario de invierno o si no se practica el cambio de horario

Las gráficas también suelen contener elementos que funcionan como reglas graduadas y sirven para medir las dos coordenadas angulares necesarias para ubicar la posición del Sol en un momento cualquiera: la altura solar a través de círculos concéntricos y el acimut solar por medio de rectas radiales.

La gráfica solar se traza en función de la latitud del sitio, independientemente del sistema geométrico empleado, por lo que para cada emplazamiento con latitud diferente debe contarse con una gráfica diferente. Esta situación que durante años resultó una dificultad, hoy en día no plantea ninguna complicación dada su disponibilidad en medios virtuales, gratuitos o de paga (véase apéndice II). Los ejemplos de gráfica solar que se presentan en este capítulo corresponden a la latitud 19° N, cercana a ciudades como Veracruz, Puebla, Colima y sur del Distrito Federal.

Figura 4.2

Gráfica solar para la latitud 19° N y sus componentes básicos

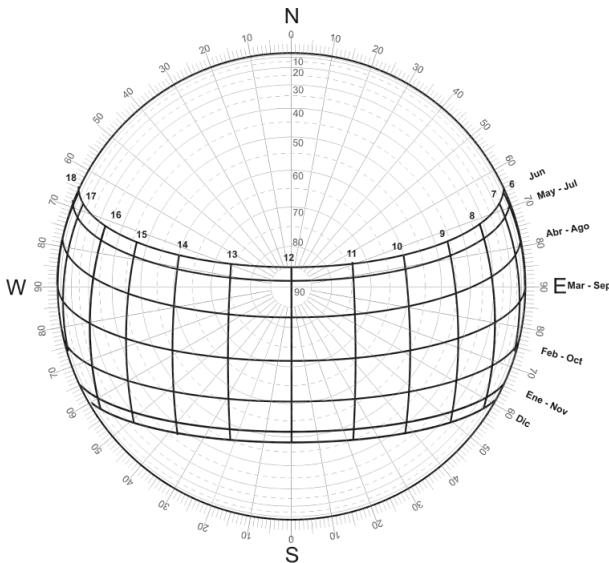


Existen diversas formas en que se presentan las gráficas solares. Las diferencias entre ellas radican en su apariencia, misma que es originada por el sistema de proyección geométrica con que son construidas y por el plano de proyección al que se arrojan los puntos contenidos en la bóveda celeste. En las formas más comunes para el apoyo al diseño arquitectónico la posición relativa del Sol se proyecta sobre el plano de tierra, pero utilizando tres diferentes sistemas de proyección:

- a) En la *gráfica solar ortogonal* las proyecciones son paralelas entre sí y perpendiculares al plano horizontal. La imagen resultante representa la *planta* o vista superior de la bóveda celeste (figura 4.3). Su principal desventaja consiste en que las alturas solares resultan muy cercanas al horizonte y tienden a acumularse en los extremos, dificultando su lectura (Watson, 1983). Por ello es el tipo de gráfica menos empleado por los expertos. Fue desarrollada en 1902 por Molesworth y ampliado por Waldram en 1933 (Olgyay y Olgyay, 1957).

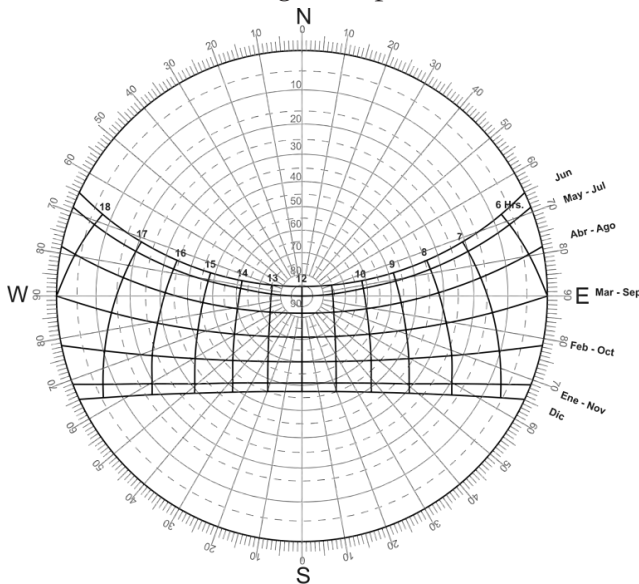
Figura 4.3

Gráfica solar esférica ortogonal para la latitud 19° N



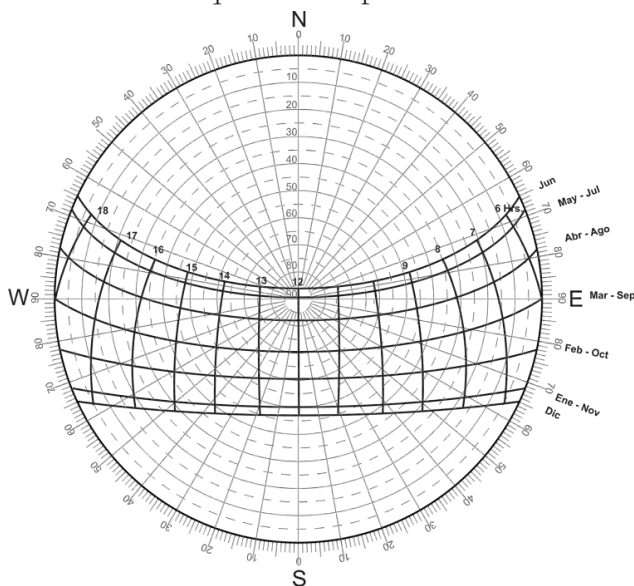
- b) En la *gráfica solar estereográfica* las proyecciones son oblicuas y convergen al *nadir* —punto opuesto al *cenit*—. La imagen resultante es la vista en perspectiva, desde abajo, de la bóveda celeste (figura 4.4). El término proyección estereográfica fue impuesto en 1831 por el matemático de origen germano L.I. Magnus, a quien se le atribuye su desarrollo geométrico (Rosenfeld, 1977). El término se origina de las palabras griegas “estereon” cuerpo sólido y “grafe” descripción o dibujo, y pretende expresar el arte de proyectar los sólidos sobre un plano. Varios organismos han utilizado y recomendado el uso de gráficas solares estereográficas desde mediados del siglo XX, como la Australian Commonwealth Building Station, la Industrial Welfare Division of Australia y el South African Building Institute (Olgyay y Olgyay, 1957). Asimismo se han publicado en los manuales de Leepsmeier (1969) y de Koenisberger *et al.* (1977). Este es uno de los tipos de gráfica solar aceptados por los expertos.

Figura 4.4
Gráfica solar estereográfica para la latitud 19° N



- c) En la *gráfica solar equidistante* las proyecciones también son oblicuas pero cada proyección converge a un punto diferente, de modo que cada unidad de ángulo de altura corresponde con una unidad de longitud en la planta. Esto acarrea una ventaja adicional: las medidas angulares al no deformarse, permiten el uso de una escala constante, facilitando las mediciones correspondientes. En este caso se obtiene una perspectiva esférica de la bóveda celeste, del tipo de imágenes conocidas como *ojo de pescado* o gran angular, también desde abajo (figura 4.5). Hand (1948) es el primero en describir este método, y posteriormente diversas compañías ofrecieron ediciones en que comercializaban las gráficas equidistantes para las latitudes de los Estados Unidos (Olgyay y Olgyay, 1957). Actualmente este tipo de gráfica es el más utilizado por los expertos.

Figura 4.5
Gráfica solar equidistante para la latitud 19° N



En todos estos casos la imagen que se visualiza es la proyección horizontal de la bóveda celeste en una amplitud de 180°

grados, desde el suelo (u horizonte) hasta el *cenit* —punto más alto sobre nuestra cabeza—, y correspondería a un lugar plano en el campo abierto. La imagen así obtenida es reflejada de modo que los puntos cardinales en la gráfica quedan en la posición convencional de una planimetría; es decir, que leyendo los puntos cardinales en el sentido de las manecillas del reloj, se tiene el Norte, el Este, el Sur y el Oeste.

Aplicaciones en el diseño arquitectónico³

La arquitectura, compuesta por espacios habitables y por los elementos físicos que la delimitan y contienen, forma parte integral de la superficie terrestre, pues es de ahí de donde se desplanta. Esta dependencia al suelo hace que la arquitectura esté expuesta a los efectos de la incidencia de los rayos solares, de la misma forma en que lo está el resto de los componentes de la corteza terrestre. De lo anterior deriva la enorme importancia que tiene la interrelación entre la radiación solar y la arquitectura: tener en cuenta la posición relativa del Sol con respecto a los edificios es fundamental para lograr eficiencia energética, confort en los habitantes y adecuación al entorno.

Hoy en día se pueden observar muchos problemas en los edificios que operan en condiciones no propiciatorias de confort térmico y visual para los habitantes, lo que a su vez origina dispendio energético a nivel doméstico, comercial o industrial, pues la falta de condiciones naturales idóneas se resuelve mediante la intervención indiscriminada de equipos de climatización e iluminación artificial. Y todo ello tiene su origen en una mala decisión en cuanto a la orientación del proyecto arquitectónico o urbano, tomada necesariamente desde las primeras etapas del diseño, así como en la deficiente resolución de los dispositivos de bloqueo o ganancia solar.

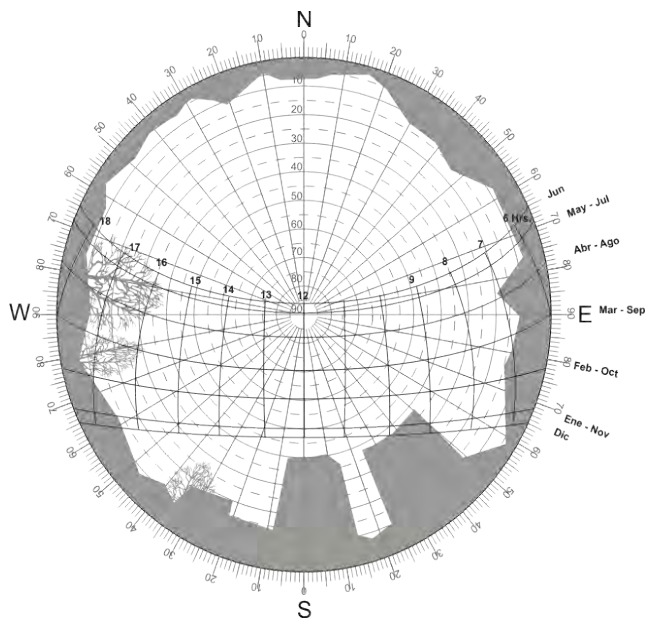
Desafortunadamente, algunos profesionistas del diseño no toman en cuenta la interacción entre el sol y su futuro edificio, cuya comprensión les permitiría disponer de manera óptima ca-

³ Gómez-Azpeitia (s.f.); Caicedo (2011).

racterísticas espaciales, formales y materiales de sus proyectos. Las gráficas solares, herramientas de apoyo para que los arquitectos realicen esa tarea son asequibles, pero el conocimiento necesario para entenderlas no es muy común, por lo que su aplicación al diseño suele ser deficiente, en las raras ocasiones en que son empleadas. Así, este apartado intenta despejar algunos fundamentos esenciales para la comprensión de estas herramientas y de cómo su aplicación pueda ser benéfica.

Como ya se dijo, en una gráfica solar vemos la bóveda celeste proyectada sobre el plano de tierra, y en ella el movimiento ininterrumpido del Sol. El horizonte aparece como una circunferencia en cuyo centro (u origen) se ubica el observador. Desde este punto central, el observador podría percibir por encima de la línea de horizonte, elementos como montañas, árboles y edificios; y cómo varios de éstos configuran obstrucciones que impiden ver algún tramo de la trayectoria del Sol (figura 4.6).

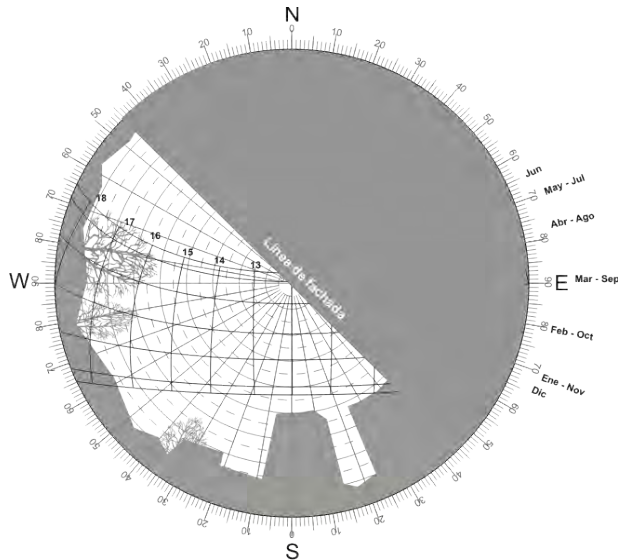
Figura 4.6
Gráfica solar equidistante para la latitud 19° N,
con el perfil del horizonte que incluye diversas obstrucciones



Ahora bien, si se desea evaluar la configuración de un vano vertical de un edificio —ya sea una ventana o una puerta transparente—, el procedimiento consiste en hacer coincidir el origen de la gráfica solar con el punto central inferior del vano, cuidando que la orientación de ambos coincida. Como resultado se puede observar que el propio edificio, que permanece atrás del vano, ocupa un cuadrante de la bóveda celeste según su orientación, y con ello obstruye las trayectorias solares que discurren en ese cuadrante. Al encontrar la proyección de esa fachada sobre la gráfica solar, quedan evidentes las fechas y horas que el sol podría penetrar por el vano y cuáles quedan bloqueadas (figura 4.7). Conociendo los requerimientos de climatización del edificio, se puede evaluar si ese bloqueo y esa ganancia ocurren en los momentos adecuados: bloqueo en la temporada calurosa y ganancia en la temporada fría. Si no es así, se tendría que replantear el proyecto en términos de la ubicación o dimensiones del vano, cuando menos, y así sucesivamente con las diferentes fachadas que pudiera tener el edificio.

Figura 4.7

Gráfica solar equidistante para la latitud 19° N, con la obstrucción propia del edificio analizado

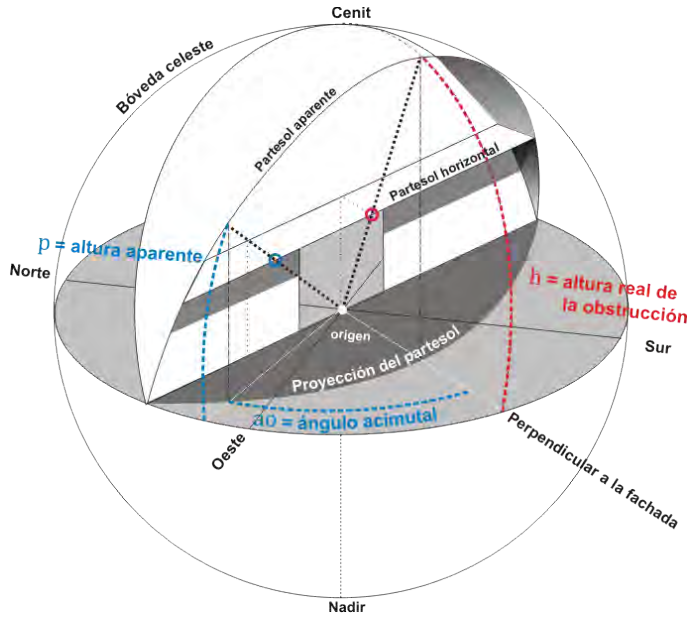


Para un edificio que aun no existe y que debemos diseñar, imaginemos ahora el proceso contrario, es decir que a partir de una gráfica solar se delimiten los periodos de la trayectoria solar que convendría sombrear, porque constituyen una ganancia solar excesiva, así como los periodos en los que sería deseable que el sol penetrara. Entonces solamente será necesario dibujar las obstrucciones correspondientes sobre la gráfica solar, para luego decidir la orientación óptima de cada espacio habitable, de acuerdo a su uso y sus requerimientos. El procedimiento permite además proyectar la forma de dispositivos de sombreado o ganancia a partir de los datos que arroja la misma gráfica solar.

Los dispositivos de sombreado que se pueden incorporar al diseño de un vano en fachada vertical reciben el nombre genérico de parasoles (por *brise-soleil*, nombre que le dio originalmente Le Corbusier). Por la forma en que se integran a la fachada se dividen en dos tipos: horizontales y verticales, mismos que pueden emplearse en forma aislada o combinados entre sí.

Los parasoles horizontales son pantallas de sombra que actúan en el componente cenital de la bóveda celeste y por lo tanto bloquean los rayos solares de mayor altitud (cercaños al medio día). Tales elementos pueden ser aleros, toldos, marquesinas, voladizos, pérgolas, etcétera. Su proyección en el plano de tierra desarrolla un arco elíptico, en el que todos sus puntos representan un mismo ángulo de altura absoluto, pero diferentes ángulos de altura relativos al punto de observación, que como ya se explicó, corresponde al punto central inferior del vano. Si el parasol horizontal se prolongara hasta el infinito a ambos lados del vano, el arco de su proyección se prolongaría a su vez hasta la línea de horizonte (figura 4.8). Los tramos de las trayectorias solares que quedaran dentro del área del arco elíptico representan los momentos en que el dispositivo estará bloqueando la penetración solar.

Figura 4.8
Proyección sobre el plano de tierra
de un parasol horizontal, vista desde el exterior



La definición analítica del arco de la proyección del parasol horizontal corresponde a la siguiente ecuación (ASHRAE, 1977: 406):

$$\tan p = \frac{\tan h}{\cos \alpha_0} \quad (4.1)$$

donde:

p = altura aparente de un punto cualquiera del parasol horizontal, relativa al punto de observación en la fachada

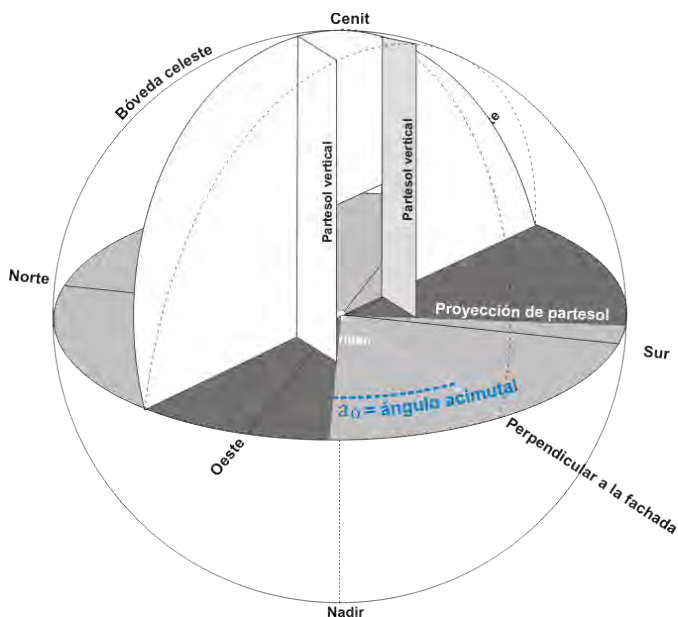
h = altura real de la obstrucción

α_0 = ángulo acimutal con respecto a la perpendicular a la fachada

Por su parte, los parasoles verticales son elementos de sombra que actúan en el componente acimutal de la bóveda celeste,

por lo que bloquean los rayos solares de menor altitud (cercanos al amanecer y al atardecer). Se trata de elementos que pueden ser muros, mamparas, postigos, contrapueras, columnas, etcétera. Su proyección en el plano de tierra desarrolla una línea radial en la que todos los puntos de la recta representan un mismo ángulo de acimut relativo al punto de observación, que como ya se explicó, corresponde al punto central inferior del vano. Si el parasol vertical se prolongara hasta el cielo, la línea de su proyección se prolongaría a su vez hasta el punto de observación (figura 4.9). Los tramos de las trayectorias solares que quedaran dentro del área de esos radios representan los momentos en que el dispositivo estará bloqueando la penetración solar.

Figura 4.9
Proyección sobre el plano de tierra
de un parasol vertical, vista desde el exterior

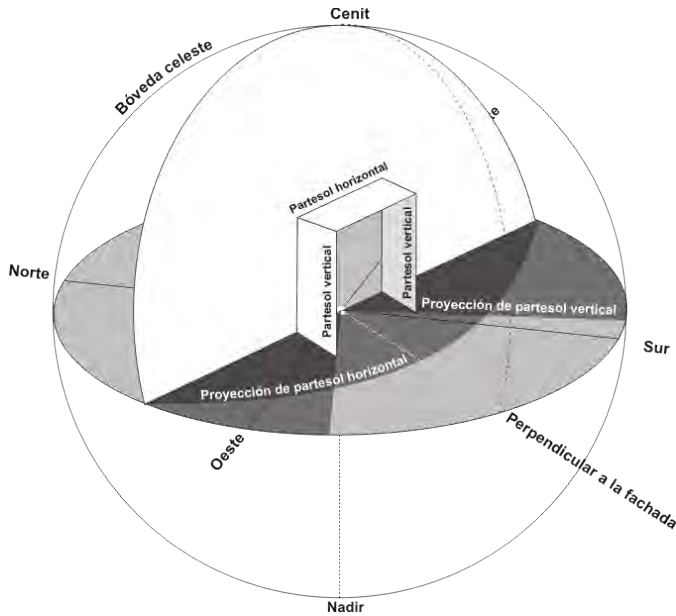


Cuando se combinan los efectos de parasoles verticales y horizontales en un solo dispositivo se tienen como resultado marcos, celosías, rejillas, entramados, etcétera. La proyección en el

plano de tierra del marco sobre el vano o de cada célula de la celosía incluye el arco elíptico del bloqueado en el componente cenital y la línea radial del bloqueado en el componente acimutal de la bóveda celeste (figura 4.10).

Figura 4.10

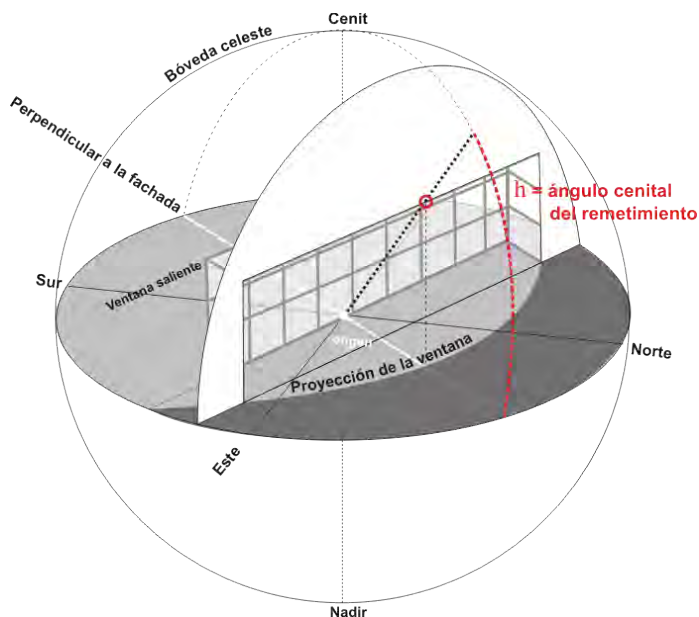
Proyección sobre el plano de tierra de la combinación de parasoles verticales y horizontales, vista desde el exterior



Por el contrario, si lo que se requiere no es bloquear la entrada del sol sino incrementar su ganancia, se puede prolongar el área acristalada de la ventana hacia el componente cenital de la bóveda celeste a fin de captar los rayos de mayor altitud (cercaos al medio día) o hacia el componente acimutal para aprovechar los rayos de menor altitud (cercaos al amanecer y al atardecer). Esta configuración puede tomar la forma de una ventana saliente o mirador. En este caso, el origen de la gráfica solar también se hace coincidir con el punto central inferior de la ventana, pero la línea de fachada se retrasa y bloquea menos del cuadrante de la bóveda celeste que

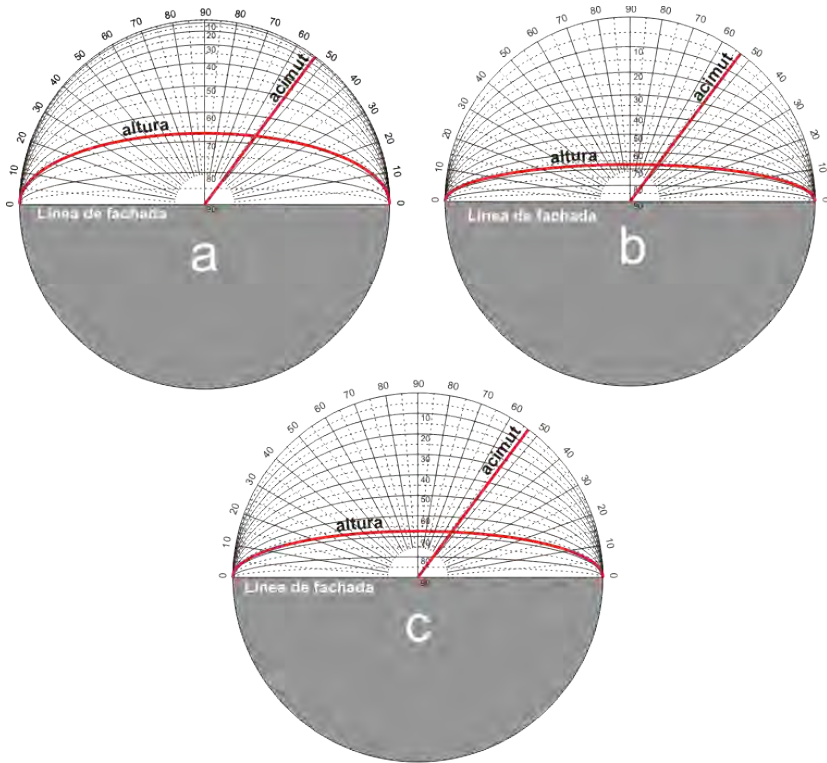
ocupa; así, la línea de ganancia se proyecta sobre el plano de tierra como un arco elíptico para el componente cenital y como líneas radiales para el componente acimutal, pero hacia atrás de la ventana, dejando más área de la bóveda celeste despejada (figura 4.11).

Figura 4.11
Proyección sobre el plano de tierra
de una configuración de ventana saliente, vista desde el interior



Para hacer más fáciles estos procedimientos, se emplea un aditamento de la gráfica solar, denominado: transportador o mascarilla de sombreado. La mascarilla de sombreado debe ser trazada con el mismo sistema de proyección de la gráfica solar (ortogonal, estereográfica o equidistante) y tener un diámetro exactamente igual que aquella, donde aparece una serie de arcos elípticos que representan la regla para medir las alturas solares, y una serie de rectas radiales que sirven para medir los acimutes, en este caso relativos al plano de la fachada analizada (figura 4.12). Estas mascarillas son universales, es decir que sirven para las gráficas solares de cualquier latitud.

Figura 4.12
 Mascarillas de sombreado y sus componentes,
 por cada uno de los tipos de proyección:
 a) ortogonal, b) estereográfico, c) equidistante

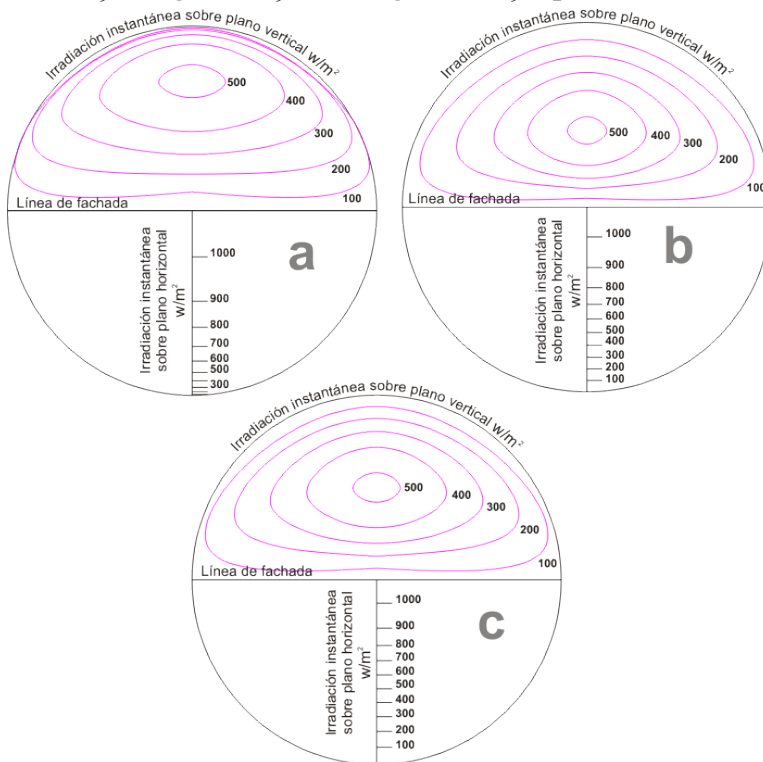


La mascarilla de sombreado se sobrepone a la gráfica solar correspondiente, haciendo coincidir los centros de ambas y orientando la línea de fachada de acuerdo a la orientación del caso real analizado. Para determinar efectos de bloqueo solar se presentan las curvas hacia fuera de la línea de fachada; para efectos de ganancia solar se presentan hacia el interior. Dado que la mascarilla está graduada, se puede precisar el ángulo que conviene adoptar para parasoles horizontales o verticales, o bien el ángulo que se debe lograr con el remetimiento de la línea de fachada respecto de la línea de ventana. Conociendo esos ángulos el diseñador podrá

determinar las dimensiones de todos los elementos arquitectónicos que configuren cada fachada y cada vano de su proyecto, logrando con ello una mejor interacción con el componente solar del clima y, por lo tanto, mejorando las condiciones de habitabilidad interiores. Eso a su vez implicará una menor demanda de energía para climatización.

Figura 4.13

Mascarilla de radiación, por cada uno de los tipos de proyección:
a) ortogonal, b) estereográfico, c) equidistante



Otro transportador para ser empleado junto con la gráfica solar es el conocido como mascarilla de radiación, la cual permite determinar la intensidad de la irradiación instantánea total que incide sobre planos tanto horizontales como verticales con cualquier orientación (Olgyay, 1963: 35-38). La mascarilla muestra en uno

de sus hemisferios una serie de cardioides que representan puntos de igual valor de irradiación instantánea sobre un plano vertical. En el otro hemisferio, la mascarilla dispone de un radio graduado que permite determinar la irradiación instantánea sobre el plano horizontal. Al igual que la mascarilla de sombreado, la de radiación debe trazarse acorde con el mismo sistema de proyección de la gráfica solar (ortogonal, estereográfico o equidistante) y tener un diámetro exactamente igual que aquella (figura 4.13).

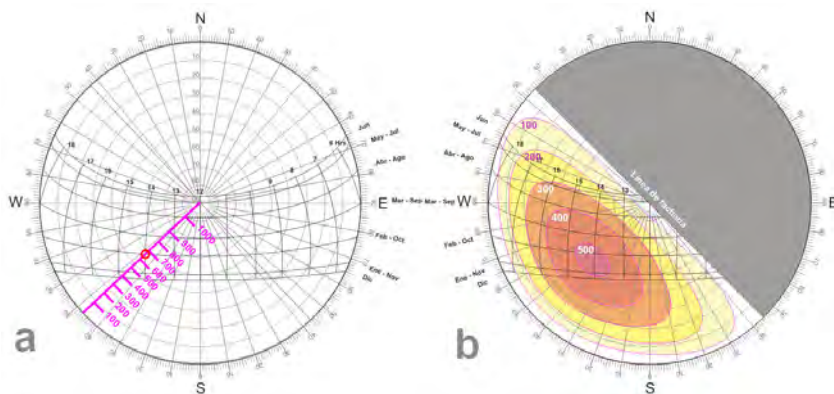
El procedimiento para su uso consiste en sobreponer la mascarilla de radiación a la gráfica solar correspondiente, haciendo coincidir sus respectivos centros (véase figura 4.14). Para determinar la irradiación instantánea sobre un plano horizontal basta con girar el radio graduado hasta que coincida con el punto de la trayectoria solar que se desea evaluar y el punto de intersección en la regla marcará el dato buscado en W/m^2 . En la figura 4.14a se observa que la trayectoria de los meses de febrero y octubre a las 14:00 horas (tiempo solar), la irradiación instantánea sobre un plano horizontal es de aproximadamente $660 W/m^2$. Por su parte, para la determinación de la irradiación instantánea sobre un muro vertical, se hace girar la mascarilla de radiación hasta que coincida la línea de fachada con la orientación del caso real. Así se podrá observar que las secciones no bloqueadas de las trayectorias solares coinciden con las cardioides, pudiéndose determinar la irradiación respecto de una fecha y hora en particular, o bien visualizar el conjunto de las horas y fechas expuestas identificando las áreas que aportan mayor o menor intensidad de irradiación (también los datos están medidos en W/m^2). En la figura 4.14b se observa la máxima irradiación —alrededor de $500 W/m^2$ — que recibe una superficie vertical orientada al suroeste, ocurre durante los meses de octubre a febrero a las 14:00 horas (tiempo solar).

Es necesario aclarar que los datos extraídos de estas mascarillas son aproximados, ya que en realidad se requeriría de una mascarilla diferente por cada día del año, pues la radiación varía a lo largo del mismo; además, intervienen factores aleatorios como la nubosidad y transparencia de la atmósfera en el sitio, situaciones que no se pueden generalizar o normalizar. Por lo tanto, se asume que tales datos son válidos para días despejados, a la altura del

nivel del mar y con una intensidad de radiación promedio igual a la constante solar extraterrestre: $1,353 \text{ W/m}^2$, que una vez atravesada la capa de la atmósfera se asume como de $1,033 \text{ W/m}^2$ (Duffie y Beckman, 1991).

Figura 4.14

Uso de la mascarilla de radiación
sobre una gráfica solar equidistante para la latitud 19° N :
a) para irradiación instantánea sobre plano horizontal, b) para irradiación instantánea sobre plano vertical orientado al suroeste



Ejemplo de aplicación

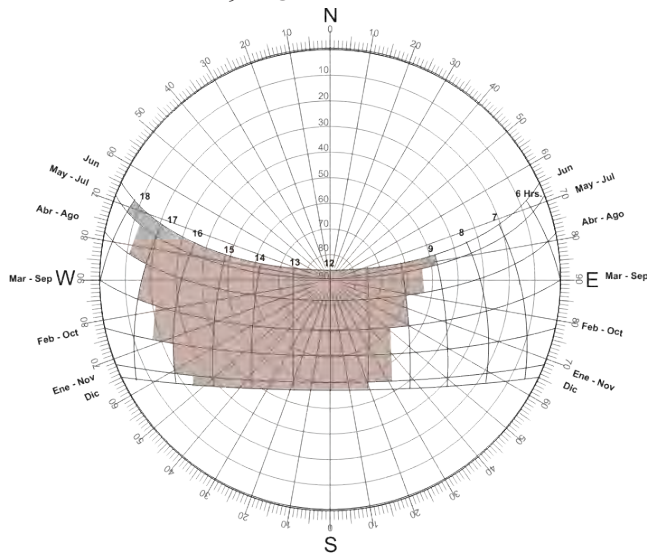
Situación: se debe sombrear una ventana en una fachada orientada hacia el suroeste, en la ciudad de Colima (latitud 19° N , longitud 104° W y altitud 500 msnm), de clima cálido sub-húmedo y en el que se experimentan las temperaturas más altas entre mayo y septiembre y las temperaturas más templadas entre noviembre y febrero. La ventana a evaluar corresponde a un dormitorio, cuyo horario de máximo uso es vespertino y nocturno y su orientación es suroeste. Se supone que el entorno de la vivienda en donde se encuentra el dormitorio es el que representa el perfil del horizonte de la figura 4.6.

Como primer paso se recomienda marcar sobre la gráfica solar los requerimientos bioclimáticos del sitio; por ejemplo, cuando la temperatura del lugar es menor a la temperatura de confort

sería conveniente permitir la entrada de radiación solar, mientras que cuando la temperatura es aproximadamente igual o mayor a la de confort es necesario obstruir la entrada de radiación solar y evitar así las ganancias de calor. No se trata de ahondar aquí en los procedimientos para establecer la temperatura de confort o los requerimientos bioclimáticos de cada sitio, pero es claro que la principal estrategia para el caso que nos ocupa es bloquear la radiación solar para que el dormitorio no se sobrecaliente durante el día. En consecuencia, se delimitará sobre la gráfica solar una zona que corresponda a las fechas y horas en que resulta estratégico obstruir los rayos solares según la situación descrita (figura 4.15).

Figura 4.15

Gráfica solar equidistante para una latitud de 19° N, con las fechas y horarios en que es conveniente el sombreado (área marcada con color) según el clima de la ciudad de Colima



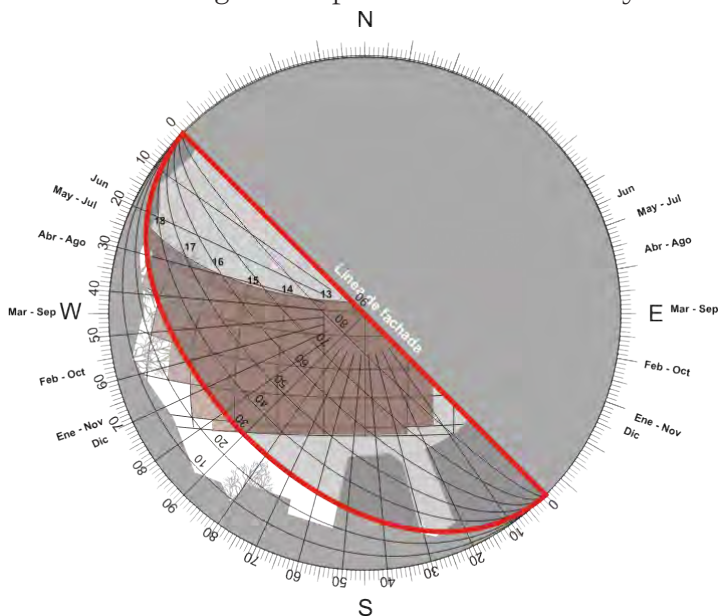
Fuente: Gómez-Azpeitia (1990).

Posteriormente se sobrepone a la gráfica solar tanto el perfil del horizonte del sitio como la mascarilla de sombreado, haciendo coincidir sus respectivos centros y rotando la mascarilla de sombreado hasta que coincida con la orientación de la ventana, que en este

caso es suroeste. Una vez hecho esto se identifican los arcos y radios de la mascarilla para delimitar las obstrucciones que mejor cubran el área, con requisito de evitar ganancias solares (figura 4.16). Solamente cuando el sol se encuentre en las trayectorias que quedaron visibles fuera del área sombreada, incidirá sobre el punto de observación u origen al centro de la ventana. En la figura 4.16 se observa que el requerimiento se resolvió con un parasol horizontal cuyo ángulo de altura es de 30° . En este caso no se requieren parasoles verticales, puesto que los árboles existentes hacia el oeste ayudan a tamizar los últimos los rayos de sol del día, situación muy conveniente para evitar el sobrecalentamiento del dormitorio.

Figura 4.16

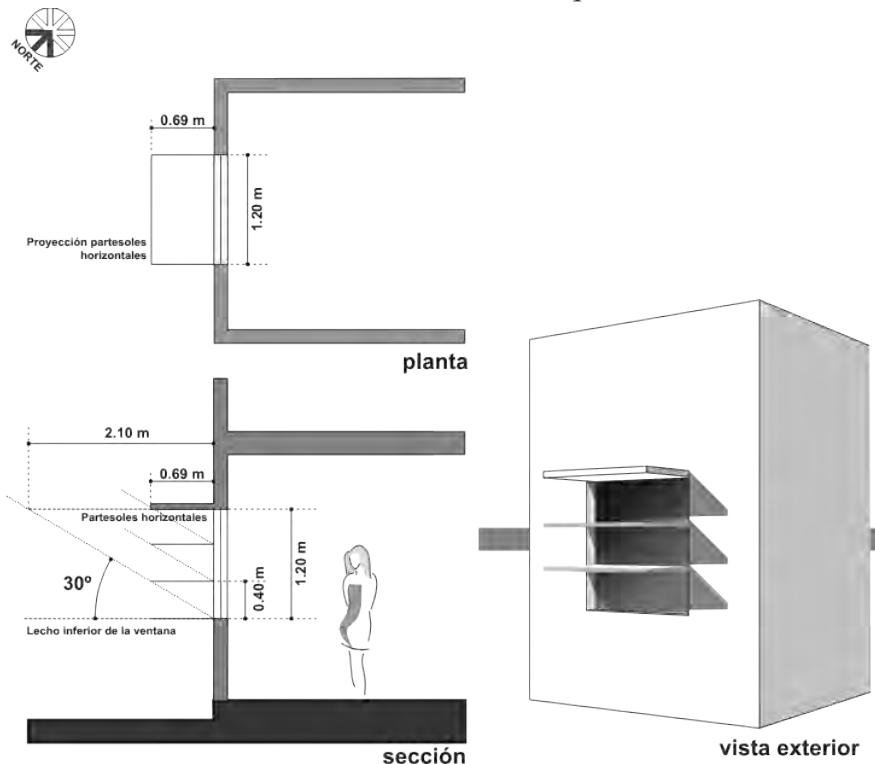
Resultado del análisis con mascarilla de sombreado para determinar los ángulos de protección horizontal y vertical



Con los ángulos de sombra determinados se procede al diseño del dispositivo de obstrucción solar, que en este caso podría consistir en un solo parasol horizontal; sin embargo, el ángulo requerido de 30° tendría que extender demasiado la longitud del parasol (véa-

se figura 4.17). En el ejemplo que nos ocupa, se tiene una ventana cuadrada de 1.2 m de largo por 1.2 m de altura, así que una protección horizontal de 30° exigiría un alero de 2.10 m de longitud —situación inviable—; por ello se ha preferido tener tres parasoles horizontales en vez de uno, reduciendo la altura del vano a la tercera parte, es decir a 0.40 m. Con ello la longitud de los aleros se reduce a 0.69 m. Podría resolverse el requerimiento de sombreado solar de muchas otras formas, pero eso depende de la creatividad e ingenio del proyectista, por supuesto que deberá conservar estrictamente los ángulos de obstrucción establecidos en el estudio.

Figura 4.17
Aplicación de los resultados del análisis
en el diseño de los elementos arquitectónicos



Aplicaciones en el diseño de colectores solares

Los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar se pueden clasificar en dos: fotovoltaicos y térmicos. Ambos sistemas pueden utilizarse para aplicaciones como generación de energía eléctrica, calentamiento de agua o de aire, destilación y desalinización de agua, como secadores de aire, sistemas de aire acondicionado y sistemas de refrigeración. En esta sección se muestra un panorama general de ambos sistemas, así como una descripción sencilla de las variables y parámetros técnicos que son relevantes para el diseño, instalación, operación e implementación de los diferentes sistemas.

Un sistema fotovoltaico es una técnica de generación de energía alterna que aprovecha la irradiación solar para producir energía eléctrica a través del principio fotoeléctrico, y que puede ser utilizada por el usuario de dos formas principalmente: consumo directo y almacenamiento de energía.

El primer caso consiste en disponer de la energía en el instante en que ésta es generada. A su vez, este consumo puede ser en forma de corriente directa, que es la forma en que genera un panel fotovoltaico la energía eléctrica; o corriente alterna —a través de un inversor—, lo cual dependerá de la carga que se desee alimentar. Bajo el esquema de consumo directo se encuentran los sistemas interconectados a la red eléctrica, en estos casos toda la energía generada se aprovecha, ya sea al ser consumida por el usuario o almacenándose en la red para posteriormente ser requerida. Es importante decir que no se contempla como almacenamiento de energía puesto que el lugar en donde se almacena es la red y en caso de que no hubiera servicio no sería posible acceder a la energía almacenada en ella.

En el esquema de almacenamiento de energía generada es a través de un banco de baterías de ciclo profundo, esto permite tener disponibilidad de energía en cualquier momento. De igual manera que en el caso anterior, se pueden alimentar cargas ya sea en corriente directa o en corriente alterna, utilizando un inversor. Los sistemas fotovoltaicos aislados de la red son por definición los que requieren el almacenamiento de la energía generada.

Un sistema fotovoltaico se compone principalmente por los siguientes elementos: un panel fotovoltaico, que se encarga de

transformar la irradiación solar en energía eléctrica en corriente directa; un regulador de carga, cuya función es regular el voltaje generado ya sea para alimentar una carga en corriente directa o realizar un ciclo de carga a una batería de ciclo profundo; una batería de ciclo profundo, la cual se encarga de almacenar la energía producida por el panel fotovoltaico; el inversor, cuya función es transformar la energía en corriente directa a corriente alterna. Este dispositivo es indispensable para realizar la interconexión del sistema fotovoltaico a la red; y por último, sistemas de protección, que protegen tanto al usuario como al sistema en sí mismo.

Una vez definido el sistema fotovoltaico es indispensable tomar en cuenta los siguientes requerimientos para poder diseñarlo y emplazarlo correctamente. Se deberán llevar a cabo las siguientes acciones:

- a) *Cálculo de cargas*: en este apartado se definirán el tipo de cargas a alimentar (corriente directa o corriente alterna), el tiempo de uso, cantidad de las mismas y días de autonomía, en caso de requerirse como sistema aislado de la red. Con estos datos se podrá determinar tanto la capacidad instalada (kW) como el consumo (kWh) de la carga que deberá alimentar el sistema fotovoltaico.
- b) *Dimensionamiento del campo solar*: se deben realizar las siguientes acciones:
 - Determinar las horas solares pico (HSP) o insolación global media, en kWh/m² día. Estas HSP se obtienen de bases de datos que permiten conocer la distribución de la irradiación solar durante el año y con ello realizar una estimación de la energía generada por el sistema fotovoltaico.
 - Seleccionar la potencia, voltaje, corriente y área del panel fotovoltaico que se empleará en el sistema.
 - Determinar el número de paneles fotovoltaicos utilizando las siguientes relaciones:

$$E = \frac{E_T}{R} \quad (4.2)$$

$$NP = \frac{E}{0.9 Wp HSP} \quad (4.3)$$

Donde E es el consumo energético real en kW, E_t es el consumo energético teórico (kW), R es una constante de proporcionalidad que engloba las pérdidas relacionadas con el uso de baterías, inversores y cableado, comúnmente se le asigna un valor de 0.8; NP es el número de paneles fotovoltaicos, Wp es la potencia pico de los paneles fotovoltaicos.

- c) *Dimensionamiento del banco de baterías*: está en relación con las cargas que se requieren alimentar y con los días de autonomía. De igual manera el banco de baterías junto con el inversor determinan el voltaje del sistema fotovoltaico. Para calcular la capacidad del banco en amperes por hora (Ah) se tiene la siguiente relación:

$$C = \frac{E N}{V Pd} \quad (4.4)$$

Donde C es la capacidad del banco de baterías de ciclo profundo, N son los días de autonomía y Pd es la profundidad de descarga de la batería que representa la proporción de carga que retiene la batería después de un cierto tiempo de uso, y varía entre 0 y 1.

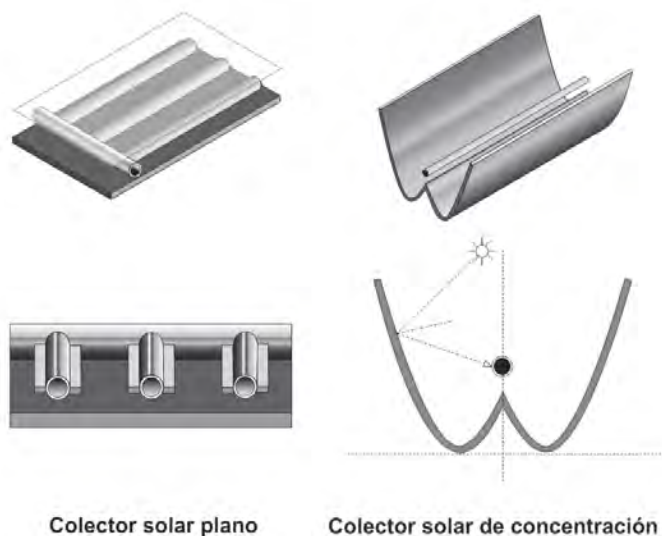
- d) *Selección del inversor*: el inversor deberá seleccionarse en función del tipo de carga a alimentar y su operación. El tipo de carga se refiere a si la alimentación será a motores o a cargas en corriente directa que tenga rectificación propia, esto impactará en la calidad de la onda de corriente alterna generada por el inversor. En lo que respecta al tipo operación, se debe definir si el sistema será interconectado a la red o de almacenamiento, debido a que los requerimientos de conexión son muy puntuales y afectan la selección tanto de capacidades, características como costo del equipo.
- e) *Protecciones y cableado*: deberán ser realizadas con base a las normas aplicables del país en el que se instale el sistema fotovoltaico.

Por otra parte, los sistemas térmicos usan la radiación solar para calentar un fluido de trabajo (puede ser un gas, el aire o un líquido, como el agua o los aceites térmicos), elevando el contenido energético para ser aprovechado directamente o en algún proceso. Los sistemas térmicos se pueden dividir en colectores planos y colectores de concentración (figura 4.18). Los colectores planos están compuestos por un plato o placa para absorber el calor, una o varias cubiertas transparentes, un aislamiento térmico, un sistema para recuperar el calor y un contenedor. Los calentadores solares de agua, ya sea de tubos unidos a placas de metal o como tuberías de metal dentro de un tubo de vidrio (tubos evacuados o de vacío), son ejemplos de sistemas planos. Este tipo de sistemas se usan para aplicaciones de baja y media temperatura. Los colectores planos pueden alcanzar temperaturas entre 30 y 80 °C, mientras que los colectores de tubos evacuados entregan el fluido de trabajo en un rango de temperaturas entre 60 y 180 °C.

Los sistemas de concentración son dispositivos que incrementan la radiación solar usando los principios de la óptica (como la reflexión, refracción y luminiscencia) para concentrar la energía solar en alguna superficie o en un punto (Muhammad-Sukki *et al.*, 2010). De forma general, estos sistemas consisten en un dispositivo concentrador (reflectivo-refractivo); una superficie absorbedora; una cubierta transparente que permite el paso de la radiación solar y reduce las pérdidas de calor y, por último, un sistema para seguir el movimiento aparente del sol. Entre los sistemas térmicos de concentración solar se pueden reconocer varios tipos: los concentradores planos, parabólicos, parabólicos compuestos, dieléctricos interiores totalmente reflectivos e hiperboloides; lentes de Fresnel, concentradores de planos altos y concentradores cuánticos de punto. Los sistemas de concentración se pueden usar para aplicaciones de baja, media y alta temperatura, logrando temperaturas hasta de 2,700 °C; por lo que se pueden usar para generación de electricidad y para manufactura de materiales, fundiendo y cortando metales.

Figura 4.18

Esquema de colector solar plano y colector solar de concentración



Para diseñar o seleccionar sistemas solares planos de calentamiento —sin concentración— se debe poner especial atención en los siguientes elementos: la cubierta transparente, la placa absorbedora y el aislamiento térmico. La cubierta transparente debe permitir la entrada de la radiación solar, al mismo tiempo que protege al sistema de pérdidas por convección; además, en la medida de las posibilidades económicas, la cubierta transparente debe reflejar la radiación emitida por la placa absorbente minimizando las pérdidas y aprovechando dicha energía. La cubierta transparente se debe colocar entre 2 y 4 cm por encima de la placa absorbedora; en caso de que el sistema deba operar a temperaturas mayores a los $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ se deben colocar dos cubiertas de vidrio con una separación de 2 a 3 cm entre ellas. La placa absorbedora se construye con materiales que tengan altas conductividades térmicas y se le coloca un recubrimiento selectivo para que absorba la mayor cantidad de radiación solar (no necesariamente de color negro) y que emita la menor cantidad de calor

por radiación.⁴ A estas placas se le añaden tuberías —generalmente soldadas— que transportan el fluido de trabajo. Por último, la placa absorbadora se coloca sobre un material aislante (baja conductividad térmica) que proteja al sistema de pérdidas por conducción entre la placa y la estructura que contiene al sistema.

Los colectores de tubos evacuados se consideran colectores planos. Estos dispositivos se componen por tuberías con aletas, que incrementan el área de recolección solar, aislados del medio ambiente por cubiertas cilíndricas de material transparente (tubos de vidrio). En este caso no se tiene material aislante, en su lugar se genera vacío en las cubiertas cilíndricas y al no tener aire se eliminan los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección.

La configuración geométrica-óptica de los sistemas tiene un papel fundamental en su diseño y operación. Dentro de las variables indispensables a tomar en cuenta para el diseño de un concentrador solar se encuentran el área de apertura (A_{ap}), que es al plano por donde entra la radiación solar al concentrador; el área del absorbedor (A_{con}), que representa al área total que recibe la radiación solar concentrada; y el ángulo de incidencia máximo o ángulo de aceptación (θ_{max}), definido como el ángulo límite de incidencia que entra al concentrador y que al modificar su trayectoria por reflexión es capaz de alcanzar el plano del absorbedor (Ochieng y Onyango, 2010). Con las áreas de apertura y del absorbedor se define la relación geométrica de concentración, que se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$CR_g = \frac{A_{ap}}{A_{con}} \quad (4.5)$$

Los colectores solares planos y de tubo evacuado tiene un $CR_g = 1$, es decir que el área disponible para que entre la radiación solar es igual al área para recibir calor; mientras que la relación para un concentrador de canal parabólico está en el intervalo $15 < CR_g < 40$. En la figura 4.18 se muestran los dos tipos de colectores, así como los valores de las áreas. Para determinar la radiación concentrada por el dispositivo se usa la relación geométrica de

⁴ Se intenta que la placa tenga características de *cuerpo negro*; es decir, que absorba 100% de la radiación que recibe.

concentración multiplicada por la irradiancia solar del lugar; por lo que se traduce en una medida de la capacidad del sistema.

Para medir el desempeño de los sistemas térmicos, usualmente se calcula la relación entre la energía disponible para calentar el fluido de trabajo y la energía que incide en área del absorbedor, a esto se le conoce como eficiencia térmica y se aplica tanto a colectores planos como de concentración. La energía disponible (Q) se define como la energía que incide en el absorbedor menos las pérdidas de energía en el sistema; en el caso que se analiza, la energía se manifiesta como calor, por lo que la energía disponible se define de la siguiente forma:

$$Q = A_{ap} F [\alpha C R_g I_s - \varepsilon \sigma T_F^4 - U_L (T_F - T_{amb})] \quad (4.6)$$

Donde α es la absortividad del colector, en particular de la placa absorbedora; I_s es la irradiancia solar promedio; ε es la emisividad de la placa absorbedora; σ es la constante de Stefan-Boltzmann; TF representa la temperatura promedio del fluido de trabajo y generalmente es el parámetro de diseño, ya que representa la necesidad de energía para llevar a cabo algún proceso; UL es el coeficiente global de transferencia de calor asociado con las pérdidas de calor en la placa absorbedora, asociadas con la conducción de calor entre la estructura y la placa, así como por la convección de calor con el medio ambiente; T_{amb} es la temperatura del medio ambiente; y F es un factor de remoción de calor, que se define de la siguiente manera:

$$F = \frac{A_{con} U_F}{A_{con} U_F + A_{ap} (U_L + 4 \sigma T_F^3)} \quad (4.7)$$

En la expresión 4.7, U_F es el coeficiente global de transferencia de calor asociado al proceso de calentamiento del fluido de trabajo. En este coeficiente se pueden considerar mecanismos de conducción, convección y radiación de calor (Bejan, 1993). Para esta ecuación T_F se debe expresar en una escala de temperatura absoluta, es decir temperatura Kelvin o Rankine.

Una vez que se conoce la energía disponible, la eficiencia térmica del sistema se define matemáticamente de la siguiente forma:

$$\eta_T = \frac{Q}{A_{ap} CR_g I_S} = \frac{F [\alpha CR_g I_S - \varepsilon \sigma T_F^4 - U_L (T_F - T_{amb})]}{CR_g I_S} \quad (4.8)$$

Además de la eficiencia térmica, para los concentradores solares se define una eficiencia óptica (η_o), que representa la relación entre la energía absorbida por la placa y la energía que incide por el área de apertura. En esta relación se incluyen efectos como la forma del espejo/lente así como pérdidas por reflexión/transmisión, precisión del mecanismo de seguimiento del movimiento aparente del Sol, sombras generadas en el colector por el movimiento o posicionamiento del sistema, y efectos de incidencia del haz solar (Ochieng y Onyango, 2010). La eficiencia óptica está relacionada con la eficiencia (η), de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q}{I_S A_{ap}} = F \left(\eta_o - \frac{U_L (T_{ent} - T_{amb})}{CR_g I_S} \right) \quad (4.9)$$

donde:

T_{ent} = es la temperatura de entrada del fluido de trabajo

A través de la relación de concentración geométrica, la ecuación 4.5 y las definiciones de las eficiencias —expresiones 4.8 y 4.9— se puede ver que la geometría y materiales son de gran importancia para el desempeño adecuado de este tipo de sistemas. Cabe destacar que otra variable relevante es la selección del fluido de trabajo, aunque para aplicaciones domésticas sólo se requiera agua, podría ser más eficiente utilizar otro tipo de fluido.

Para ambos sistemas de colectores solares, tanto sistemas fotovoltaicos como térmicos, el contar con un mecanismo que siga el movimiento aparente del Sol representa un incremento en la eficiencia global del sistema; sin embargo, esto se traduce en un aumento en los costos iniciales y de operación. Otra de las características que comparten ambos sistemas es que se deben orientar en dirección norte-sur, preferentemente, y que la inclinación con respecto a la horizontal con la que deben colocarse se define como la latitud menos la declinación del lugar donde está instalado el sistema.

Bibliografía

- ASHRAE (1977). *Handbook of fundamentals*. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- Bejan, A. (1993). *Heat transfer*. Estados Unidos de América: Wiley.
- Caicedo, J.C. (2011). *Método proyectivo de las gráficas solares esférica, ortogonal, estereográfica y equidistante*. Monografía. Maestría en Arquitectura Bioclimática. Universidad de Colima, México. ISTHMUS, Panamá.
- Duffie, J. y Beckman, W. (1991). *Solar engineering of thermal process*. A Wiley-Interscience Publication. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Gómez-Azpeitia, G. (s.f.). *Apuntes de arquitectura solar: Colima*. Coordinación de Posgrado, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima.
- Gómez-Azpeitia, G. (1990). *Recomendaciones bioclimáticas para la arquitectura de la ciudad de Colima*. Colima, México. Edición del autor.
- Hand, J.F. (1948). Charts to obtain solar altitudes and azimuths. *Heating and Ventilation* October: 86-88.
- Koenisberger, O.H.; Ingersoll. T.G.; Mayhew A. y Szokolay, S.V. (1977). *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. Madrid. Editorial Paraninfo.
- Lipsmeier, G. (1969). *Tropenbau. Building in the tropic*. Munchen: Callway Verlag.
- Muhammad-Sukki, F.; Ramírez-Íñiguez, R.; McMeekin, S.G.; Stewart, B.G. y Clive, B. (2010). Solar concentrators. *International Journal of Applied Sciences*, 1 (1): 1-15.
- Ochieng, R.M. y Onyango, F.N. (2010). Some techniques in configurational geometry as applied to solar collectors and concentrators. En: R. Manyala (Ed.), *Solar collectors and panels, theory and applications* (pp. 357-378). Croacia: Sciyo.
- Olgyay y Olgyay (1957). *Solar control and shading devices*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Olgyay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Rosenfeld, B.A. y Sergeeva, N.D. (1977). *Proyección estereográfica. Lecciones populares de matemáticas*. Moscú: Editorial Mir.
- Watson, D. (1983). Where the sun is: a brief review of solar geometry for architectural designers. En: *Proceedings of the second international PLEA Conference*. Crete, Greece: Pergamon Press, pp. 471-482.

CAPÍTULO V

PROCEDIMIENTOS SIMPLES

PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR

Adalberto Tejeda Martínez, Ivonne M. García-Martínez,
Gabriel Gómez-Azpeitia, Irving R. Méndez-Pérez
y Pohema de Jesús González Viveros

Solex: software para calcular radiación solar

En este capítulo se presentan los fundamentos del programa de cómputo *Solex*, que permite calcular la irradiación solar global, directa y difusa promedio mensual o para días típicos de cada mes, ya sean despejados, medio nublados o nublados cerrados. También se incluyen las instrucciones básicas generales para su uso.

Irradiación solar diaria sobre un plano horizontal

Irradiación extraterrestre

Para calcular la irradiación solar diaria se requiere determinar primero la irradiación extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal (Q_e en W/m^2) mediante la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 2000):

$$Q_e = \left(\frac{24}{\pi}\right) 1367 [(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_1) + (\omega_1 \sin \varphi \sin \delta)] \quad (5.1)$$

donde:

1367 = constante solar en W/m^2

φ = latitud del sitio, en grados

- δ = declinación solar
 ω_1 = ángulo horario al amanecer, expresado en radianes según fórmula 1.6 (capítulo 1)

Reducción por efectos del cruce de la atmósfera y la nubosidad

Para obtener los valores que se presentan en la superficie terrestre, existe gran cantidad de modelos, todos ellos discutibles; de hecho, mientras no se hagan mediciones lo suficientemente numerosas de la irradiancia solar, no se podrá contar con un modelo confiable. De manera preliminar y con las salvedades ya mencionadas, en general sigue siendo válido el modelo de Angstrom (1924), que relaciona las horas de sol que se miden en un sitio mediante un heliógrafo, con las horas teóricas que debían presentarse en ausencia de nubes y otros obstáculos, y los valores de irradiación extraterrestre. Este modelo responde a una regresión estadística de datos observados, de la cual se obtuvieron ciertas constantes que no se han ajustado a la realidad de todos los sitios del planeta. Otros autores han presentado variantes del mismo modelo, como el caso de Glover y McCulloch (1977), quienes relacionan también la latitud y estiman la irradiación global por día, como:

$$Q_g = Q_e \left[(0.29 \cos \varphi) + \left(0.52 \frac{S}{S_0} \right) \right] \quad (5.2)$$

donde:

- Q_g = irradiancia diaria global en W/m² día
 Q_e = irradiancia extraterrestre en W/m² día
 φ = latitud del sitio en grados
 S = número de horas reales diarias de sol, obtenidas a partir de datos heliográficos o de promedios estadísticos mensuales (número de días despejados, medio nublados y completamente nublados), imágenes de satélite, brillo solar, etcétera. Para los casos de cielo completamente nublado S toma el valor de 0, pero para el resto de los casos tiene un valor mayor
 S_0 = número de horas teóricas (o astronómicas) diarias de sol. Se obtiene de la ecuación:

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_{1(15)} \quad (5.3)$$

donde:

$\omega_{1(15)}$ = ángulo horario del amanecer medio del mes, calculado para el día 15 del mes, según ecuaciones 1.5 y 1.6.

Si se carece de datos heliográficos o de imágenes de satélite, el soleamiento S se puede estimar con un coeficiente de correlación lineal entre datos observados y estimados de 0.9 y un error estándar de estimación de 10% del soleamiento diario medio mensual mediante la siguiente expresión (Tejeda y Vargas, 1996):

$$S = \left[0.31 + 0.48 \left(\frac{D + 0.5M}{Dm} \right) \right] S_0 \quad (5.4)$$

donde:

D = número de días despejados al mes

M = número de días medio nublados al mes

Dm = número de días del mes en cuestión

S_0 = número de horas teóricas (o astronómicas) diarias de sol según la ecuación 5.3

El cociente S/S_0 representa el factor de horas de insolación que será utilizado para estimar la irradiación considerando la reducción por efectos de nubosidad.

En otros países no se contabiliza el número de días despejados y nublados, sino el número de horas con incidencia solar al mes, factor conocido como *brillo solar*. En esos casos S puede ser sustituido por el valor de brillo solar registrado para ese mes y S_0 se sustituye por el valor de brillo solar teórico (Bo) para ese mes, el cual puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$Bo = SoDm \quad (5.5)$$

donde:

Bo = número de horas de brillo solar teóricas al mes.

So = número de horas teóricas (o astronómicas) diarias de sol según la ecuación 5.3.

Dm = número de días del mes en cuestión.

Por otra parte, para estimar la irradiación solar difusa media mensual (Q_f en W/m^2) se usa la relación empírica de Liu y Jordan (1960), a partir de conocer los valores de la irradiación solar global y la extraterrestre (una discusión más amplia sobre la estimación de la radiación difusa se presenta en el capítulo 5.2, que trata sobre modelos estadísticos para estimar la radiación):

$$Q_f = Q_g \left[1 - 1.16 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right) \right] \quad (5.6)$$

donde:

Q_g = irradiancia global media mensual en W/m^2

Q_e = irradiancia solar extraterrestre media mensual W/m^2

Finalmente, la irradiación directa (Q_d) se obtiene por diferencia:

$$Q_d = Q_g - Q_f \quad (5.7)$$

Irradiación solar global diaria sobre un plano vertical

Para obtener la irradiación solar diaria sobre un plano vertical se parte de los valores obtenidos para un plano horizontal, mediante las ecuaciones del apartado anterior. Así, para calcular la irradiación solar diaria sobre un plano vertical orientado al sur (Q_{vs} en W/m^2) se usa la siguiente ecuación (Hernández *et al.*, 1991):

$$Q_{vs} = \frac{24}{\pi} Q_g (\cos \delta \sin \varphi \sin \omega_2 - \omega_2 \sin \delta \cos \varphi) \quad (5.8)$$

donde:

Q_g = irradiancia solar diaria global sobre un plano horizontal en W/m^2 .

δ = declinación solar, en grados.

φ = latitud del sitio, en grados.

ω_2 = ángulo de amplitud horaria que describe el sol en el cuadrante sur, se expresa en radianes y se calcula mediante la ecuación:

$$\cos \omega_2 = \tan \delta \cot \varphi \quad (5.9)$$

Debe aclararse que si la declinación solar es positiva y mayor que la latitud en el hemisferio norte, entonces no hay soleamiento sobre la cara sur del plano y por lo tanto ω_2 es igual a cero. Cuando la declinación es negativa y menor o igual a la latitud, entonces $\omega_1 = \omega_2$. Lo mismo ocurre para la cara norte en el hemisferio sur, cuando la declinación es algebraicamente mayor que la latitud.

La irradiación diaria global sobre un plano vertical orientado al norte (Q_{vn}) se obtendrá de la siguiente ecuación:

$$Q_{vn} = \left(\frac{24}{\pi}\right) Q_g \left[(\omega_1 - \omega_2) \sin \delta \cos \varphi + (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \cos \delta \sin \varphi \right] \quad (5.10)$$

Este cálculo para el hemisferio norte sólo se hará cuando la declinación sea positiva y mayor a la latitud, pues si la declinación es menor a la latitud no hay irradiación sobre la cara norte del plano. Finalmente, la irradiación global diaria sobre planos verticales orientados al este o al oeste (Q_{veo}) se obtiene de:

$$Q_{veo} = \left(\frac{12}{\pi}\right) Q_g \left[\cos \delta - (\cos \delta \cos \omega_1) \right] \quad (5.11)$$

Irradiación solar global instantánea sobre diferentes planos

Irradiación extraterrestre

Para determinar la irradiación solar global instantánea sobre un plano cualquiera se debe empezar calculando la irradiación instantánea extraterrestre sobre un plano horizontal mediante la expresión siguiente (Duffie y Beckman, 2000):

$$Q_{\text{eins}} = 1367 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n_j}{366} \right) \right] \quad (5.12)$$

donde:

Q_{eins} = irradiación instantánea extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal, en W/m^2

1367 = constante solar en W/m^2

n_j = día juliano del año: 1 1 de enero $n_j = 1$; el 31 de diciembre $n_j = 365$

Reducción por efectos del cruce de la atmósfera

La llamada masa de la atmósfera (m) es en realidad el cociente del espesor atmosférico cruzado por un rayo solar entre el espesor que cruzaría si dicho rayo proviniera del cenit, y por lo tanto es adimensional (Manrique, 1984). Para alturas solares mayores de 30° y a nivel del mar, la masa de la atmósfera se calcula:

$$m_0 = \csc h \quad (5.13)$$

donde:

m_0 = masa de la atmósfera a nivel del mar, adimensional

h = altura solar, para alturas solares menores de 30° pero también al nivel del mar:

$$m_0 = \frac{614}{\sqrt{1.229 + (624 \cos h)^2}} \quad (5.14)$$

Pero deber ser corregida por altitud, pues a mayor altura sobre el nivel del mar (z) disminuye el recorrido atmosférico de los rayos solares, de modo que:

$$m = \frac{(1013 - 0.1020 z) m_0}{1013} \quad (5.15)$$

donde:

m = masa de la atmósfera, adimensional.

z = altitud sobre el nivel del mar, en metros.

m_0 = masa de la atmósfera a nivel del mar, adimensional.

Una vez conocida la masa de atmósfera a cruzar, se calcula el porcentaje de pérdida de energía que acontece durante ese cruce mediante la transmitancia media de la atmósfera (z_{atm}) (Manrique, 1984):

$$z_{atm} = 0.5 (e^{-0.65m} + e^{-0.095m}) \quad (5.16)$$

donde:

z_{atm} = transmitancia media de la atmósfera, adimensional

e = constante de Napier $\approx 2.71828...$

m = masa de la atmósfera, adimensional

Finalmente, para obtener la irradiación global instantánea sobre un plano horizontal (Q_0 en W/m^2) se calcula (Duffie y Beckman, 2000):

$$Q_0 = Q_e (\sen h) z_{atm} \quad (5.17)$$

donde:

Q_e = irradiación instantánea extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal, en W/m^2 .

h = altura solar, en grados.

z_{atm} = transmitancia media de la atmósfera, adimensional.

Irradiación sobre planos no horizontales

Para la irradiación instantánea sobre un plano no horizontal (Q_{incl} en W/m^2) se emplea la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 2000):

$$Q_{incl} = Q_0 \left(\frac{\cos \theta}{\sen h} \right) \quad (5.18)$$

donde:

Q_o = irradiación global instantánea sobre un plano horizontal, en W/m^2 .

h = altura solar, en grados.

θ = ángulo formado por el rayo incidente y la normal al plano, en grados, y se calcula:

$$\cos \theta = \cos h \cos a_o \sin i + \sin h \cos i \quad (5.19)$$

donde:

h = altura solar, en grados.

i = inclinación del plano, en grados (vertical = 90°).

a_o = diferencia al ángulo formado por la normal al plano y el meridiano local, medido desde el sur; al este negativo, al oeste positivo, en grados.

Reducción por efectos de la nubosidad

Todos los procedimientos aquí mostrados consideran condiciones de atmósfera limpia, sin tomar en cuenta las nubes; por tanto, para obtener la irradiación solar global instantánea, considerando la posibilidad estadística de una nubosidad equivalente al promedio mensual (Q_{med}), habría que multiplicar la irradiación en tiempo despejado por el cociente (S/S_o):

$$Q_o med = Q_o \left(\frac{S}{S_o} \right) \quad (5.20)$$

$$Q_{met} med = Q_{incl} \left(\frac{S}{S_o} \right) \quad (5.21)$$

Notas para los usuarios de Solex

1. Este programa es válido para latitudes menores a 66° y mayores a -66° ; fuera de este rango las ecuaciones que involucran los ángulos horarios se indeterminan.
2. Si al ejecutar *Solex* aparece una ventana con el mensaje de error: *Run-time error 713*, es posible que el equipo no cuente con la librería (dll) requerida, por lo que deberá ser incorporada y registrada en el sistema realizando lo siguiente:

- a) Copiar la librería *msstdfmt.dll*, ubicada en la carpeta X (nombre que deberá asignar el usuario del software), directamente en el disco local C. Si no es posible copiar la librería directamente en el disco local C, guardarla en la carpeta *system32* (ubicada en C:\windows\System32).
 - b) Abrir la consola de comandos de MS-DOS:
 - Para usuarios de Windows XP: hacer click en menú *inicio*, *ejecutar*, escribir *cmd* y presionar *enter*.
 - Para usuarios de Windows Vista: hacer click en menú *inicio* → *todos los programas* → *accesorios*. En el icono de *MS-DOS* dar click derecho y elegir *ejecutar como administrador*.
 - Para usuarios de Windows 7: ir a menú *inicio* y en la barra de búsqueda escribir *cmd*, una vez que aparezca el icono del programa (*cmd*), dar click derecho y elegir *ejecutar como administrador*.
 - c) En la consola, cambiar el directorio actual a C, haciendo uso del comando *cd.* hasta llegar al directorio raíz (C).
 - d) Para registrar la librería, escribir *regsvr32 C:\msstdfmt* (o en caso de haberla guardado en la carpeta *system32* usar el comando: *regsvr32 C:\System32\msstdfmt*) y presionar *enter*.
 - Equipos con Windows a 64 bits antes de registrar la librería deberán ejecutar el comando: *cd \windows\syswow64*.
 - e) Ejecutar nuevamente *Solex*.
3. Cada una de las ventanas de cálculo del programa tiene la opción de guardar los resultados obtenidos en un archivo de *Microsoft Excel*, con la finalidad de que el usuario pueda consultarlos y hacer uso de ellos posteriormente. Cada vez que se genere un archivo en este formato se guardará automáticamente en el directorio en donde se encuentre almacenado el programa; por ejemplo, si el programa se encuentra en *E:\Software de aplicacion\Solex*, el archivo se guardará en esta misma dirección. Es importante que una vez generado el archivo se le cambie el nombre, de lo contrario el próximo archivo que sea guardado quedará sobrescrito.

Bibliografía

- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrialo radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 50: 121-126
- Duffie, J. y Beckman, W.A. (2000). *Solar engineering of thermal processes*. Londres: John Wiley and Sons.
- Glover, J. y McCulloch, J.S.G. (1958). The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84: 172-175.
- Hernández, E.; Tejeda, A. y Reyes, E. (1991). *Atlas solar de la República Mexicana*. Xalapa, Veracruz: Editorial Universidad Veracruzana y Universidad de Colima.
- Liu, B. y Jordan, R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4:1-19.
- Manrique, J. (1984). *Energía solar. fundamentos y aplicaciones fototérmicas*. México: Editorial Harla/Harper & Row Latinoamericana.
- Tejeda, A. y Vargas, A. (1996). A correlation between visual observations and instrumental records of cloudiness in Mexico. *Geofísica Internacional*, 35: 421-424.

CAPÍTULO VI

MODELACIÓN ESTADÍSTICA

DE LA RADIACIÓN SOLAR DIFUSA¹

Ernesto López Velázquez y Adalberto Tejeda Martínez

Cuando se requiere caracterizar el comportamiento de la radiación solar en la superficie, un problema frecuente es la carencia de registros de radiación solar. La radiación solar global es la mayormente registrada por estaciones climáticas en el país mas no así sus componentes, la radiación solar directa y difusa. El Servicio Meteorológico Nacional opera una red de 135 estaciones automáticas, EMAS (SMN, 2013a), con instrumentos para medir radiación global. La red de estaciones tiene una cobertura amplia del territorio nacional, sin embargo fue diseñada tomando en cuenta criterios hidrológicos y no de aprovechamiento de energía solar.

Dada la carencia de información en el país sobre radiación solar (principalmente de sus componentes difusa y directa) resulta necesaria la utilización de métodos alternativos para su cuantificación y aprovechamiento. La modelación estadística de variables meteorológicas es usada extensivamente en la climatología, no solo como una alternativa para la medición sino también como una herramienta de la predicción de fenómenos meteorológicos (Llasat y Snyder, 1998). Según Linacre (2005), hay cuatro casos para los cuales es posible estimar los datos climáticos de un lugar:

1 Este capítulo es parte del proyecto: "Interacción superficie/atmósfera en la zona montañosa de la vertiente del Golfo de México: Observaciones y modelación a alta resolución". CONACYT CB-2012-01-183040.

- Cuando se requieren datos de fechas anteriores en las cuales el dato no fue medido, o se requieren datos a futuro.
- Es necesario estimar los valores, en lugares donde no existen equipos de medición.
- La estimación de un dato es útil para comprobar la veracidad de algunas mediciones atípicas.
- Por último, cuando existe la posibilidad de obtener una estimación precisa y consistente, por medio de variables independientes, demostrando una comprensión de la física del proceso en estudio.

Para la radiación difusa y la directa se utilizan modelos estadísticos que estiman su valor y se dividen en empíricos y semiempíricos. Los primeros, a partir de mediciones de radiación global horizontal u otras variables meteorológicas como temperatura, precipitación o humedad, estiman casi siempre por regresión estadística la radiación difusa o directa. Los segundos usan esas variables independientes u otras como el contenido de ozono, vapor de agua, dióxido de carbono o la dispersión de aerosoles y partículas, a partir del conocimiento físico de la composición de la atmósfera y la cuantificación de diferentes efectos sufridos por la radiación cuando penetra la atmósfera (atenuación y dispersión).

Para el caso particular mostrado en este prontuario solar, se utilizó información climática de la ciudad de Xalapa, Veracruz (México), con base en la metodología estadística de los modelos empíricos para estimar la radiación solar difusa a partir de la radiación global y extraterrestre, la temperatura del aire o la precipitación pluvial.

Antecedentes

Muchos de los modelos estadísticos para la estimación de radiación solar se han basado en la metodología de Liu y Jordan (1960), quienes correlacionaron por primera vez el Q_f/Q_g (cociente de la radiación difusa entre la radiación global) y el Q_g/Q_e (cociente de la radiación global entre la radiación extraterrestre, o *índice de claridad*) para estimar la radiación difusa mensual y diaria con datos de localidades de Norteamérica y Europa, utilizando una muestra

de cuatro años de datos de radiación solar. El modelo considerado para estimar valores diarios es:

$$Q_f = \left[1.39 - 4.027 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right) + 5.531 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right)^2 - 3.108 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right)^3 \right] Q_g \quad (6.1)$$

Siguiendo la idea original de Liu y Jordan (1960), otros autores como Orgill y Hollands (1977) establecieron modelos agrupando los valores de los índices y en función de la cobertura nubosa para una base de datos de radiación, recolectada en Toronto, Canadá.

Por otra parte Erbs *et al.* (1982) usando una nueva base de datos obtenida de cinco estaciones meteorológicas ubicadas en Estados Unidos, encontraron la relación:

$$Q_f = \left[1 - 0.2727 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right) + 2.45 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right)^2 - 11.95 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right)^3 + 9.39 \left(\frac{Q_g}{Q_e} \right)^4 \right] Q_g \quad (6.2)$$

Además determinaron la dependencia de la radiación difusa en función de la estación del año y la ubicación geográfica. Gopinathan (1988) propuso correlaciones empíricas para la estimación de la radiación difusa basándose además del Q_g/Q_e , en la fracción de horas de sol. Por su parte, Reindl *et al.* (1990), con una base de datos obtenida de cinco localidades de Estados Unidos y Europa, propusieron:

$$Q_f = \left(1.39 - 1.67 \frac{Q_g}{Q_e} \right) Q_g \quad (6.3)$$

En trabajos más recientes, Chickh *et al.* (2012) aportan en su investigación una serie de consideraciones para el tratamiento de datos erróneos de los índices, y eliminaron de sus bases de datos valores de los índices para cielos nublados y despejados, lo que permitió facilitar el ajuste de un polinomio, al disminuir la dispersión de los puntos Q_g/Q_e y Q_f/Q_g . Sin embargo, la estimación de la radiación

difusa es un problema complejo que eventualmente requiere de la inclusión de otras variables climáticas, además de la radiación. Janjai *et al.* (1996) correlacionaron los índices Q_g/Q_e , Q_f/Q_g , la temperatura ambiente (Ta en °C) y la humedad relativa (Rh en %), y generaron un modelo para estimar la radiación difusa en Bangkok, Thailandia, reduciendo cerca de 10% el error estándar de estimación en comparación con los modelos que únicamente correlacionaban los índices de radiación:

$$Q_f = \left(1.36 - 1.60 \frac{Q_g}{Q_e} + 0.008 Ta - 0.491 Rh \right) Q_g \quad (6.4)$$

Li *et al.* (2012) generaron dos modelos de Q_f para China, incluyendo la humedad relativa, la temperatura ambiente y las horas de sol:

$$Q_f = \left(0.44 + 0.41 \frac{Q_g}{Q_e} - 0.89 \frac{S}{S_o} + 0.004 Ta + 0.32 Rh \right) Q_g \quad (6.5a)$$

$$Q_f = \left[0.56 - 0.37 \frac{S}{S_o} + 0.29 \log \left(\frac{S}{S_o} \right) + 0.003 Ta - 0.20 Rh \right] Q_e \quad (6.5b)$$





En esta expresión \log es el logaritmo natural.

El caso de Xalapa

Para ejemplificar las técnicas mencionadas se trabajaron datos de la estación solarimétrica "Latex" (19° 33'35.70" N, 96° 55'44.95" W, 1464 msnm), que cuenta con registros de radiación solar global y difusa, además de otras variables como temperatura del aire, humedad relativa y viento, desde inicios de 2011 (tabla 6.1). Se ubica en el sector norte de la zona conurbada de Xalapa (México), cuya mancha urbana es de aproximadamente 120 km². La ciudad representa el clima y vegetación propios de los sitios montañosos en latitudes tropicales, en donde la humedad es alta pues está sujeta a la influencia de sistemas de vientos que acarrean humedad del Golfo de México. La tem-

peratura media anual de Xalapa es de 19°C , con eventuales máximos en primavera que rebasan los 30°C y mínimas en invierno ligeramente arriba de 0°C , una precipitación anual de 1,500 mm en promedio. La humedad relativa media anual es de 70% y el promedio anual de la cubierta nubosa es de 60% (SMN, 2013a).

Tabla 6.1
Descripción de las características principales
de los instrumentos instalados en la estación
“Latex” en Xalapa, Veracruz

Instrumento	Variables	Rango	Resolución	Imagen
Piranómetro Kipp y Zonen modelo CMP11	Radiación solar global (W/m^2), a partir de una pila termoeléctrica	0 a $2800\text{ W}/\text{m}^2$	$1 \times 10^{-3}\text{ W}/\text{m}^2$	
Piranómetro Kipp y Zonen modelo CMP11 con aro de sombra modelo CM121B	Radiación solar difusa (W/m^2), gracias al anillo de sombra	0 a $2800\text{ W}/\text{m}^2$	$1 \times 10^{-3}\text{ W}/\text{m}^2$	
Termohigrómetro HMP45ACF1450051	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad (%)	-50°C a 50°C y 0% a 100% HR	$1 \times 10^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1 \times 10^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Pluviómetro añadido a la estación meteorológica automática DAVIS Vantage PRO2	Precipitación (mm)	Precipitación diaria 10.0 mm a 999.9 mmml. precipitación total 10.0 mm a 9999 mmml	$1 \times 10^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}$	

A continuación se presentan 28 modelos para la estimación de la radiación difusa: doce para estimar datos cada 10 minutos agrupados por meses, otros doce para datos diarios (igualmente por cada mes) y cuatro diarios/estacionales.

La modelación se basó en la investigación de Liu y Jordan (1960) y en adaptaciones y mejoras que se han hecho en más de cincuenta años a los modelos estadísticos para estimar radiación solar, por ejemplo los trabajos de Orgill y Hollands (1977), Erbs *et al.*

(1982), Reindl *et al.* (1990), Li *et al.* (2012) y Chickh *et al.* (2012), citados al inicio de este apartado.

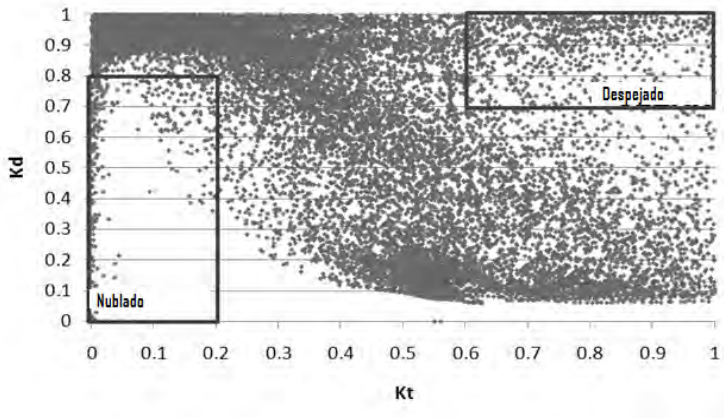
Los datos de radiación, precipitación y temperatura fueron medidos cada 10 minutos. Para los periodos diarios se integraron los valores de radiación y precipitación en un periodo de 24 horas, y para la temperatura se obtuvieron los máximos y mínimos diarios.

Además, para la conformación de la base de datos para generar los modelos estadísticos se calcularon los cocientes $Kd = Q_f/Q_g$ y $Kt = Q_g/Q_e$, la Q_e se calculó con la expresión (3.4) para valores instantáneos y con la ecuación (5.1) para valores diarios.

En particular se consideraron criterios propuestos por Orgill y Hollands (1977) y Chickh *et al.* (2012) para eliminar casos extremos que bajan sensiblemente los valores de las correlaciones entre Kt y Kd . Un primer caso para los datos de cada 10 minutos corresponde a condiciones nubladas, esto es cuando $Kd \leq 0.8$ y $Kt \leq 0.2$; el otro para condiciones despejadas, que implican valores de $Kd \geq 0.7$ o $Kt \geq 0.6$ (véase figura 6.1).

Figura 6.1

Dispersión de puntos (Kt , Kd) cada diez minutos, señalando las condiciones nubladas ($Kd \leq 0.8$ y $Kt \leq 0.2$) y despejadas ($Kd \geq 0.7$ y $Kt \geq 0.6$) como posibles datos a eliminar

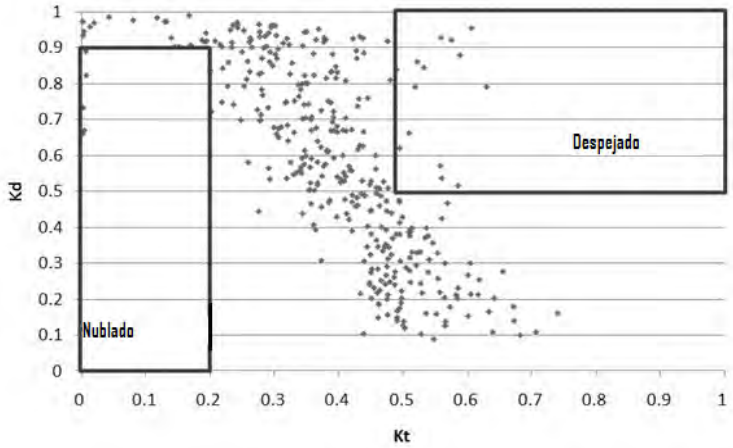


Para los datos diarios acumulados, las *condiciones despejadas* se consideraron para $Kd \leq 0.9$ y $Kt \leq 0.2$, y para *condiciones nubladas*

das si $Kd \leq 0.5$ y $Kt \leq 0.5$ (véase figura 6.2). Desde luego, las acotaciones anteriormente mencionadas pueden ser redefinidas según el comportamiento de los datos de radiación del sitio de estudio.

Figura 6.2

Dispersión de puntos (Kt , Kd) diarios señalando las condiciones nubladas ($Kd \leq 0.9$ y $Kt \leq 0.2$) y despejadas ($Kd \geq 0.5$ y $Kt \geq 0.5$) como posibles datos a eliminar



La inclusión de predictores como la precipitación y la temperatura, partió de la propuesta de Li *et al.* (2011). Para modelar promedios mensuales se agruparon casos en función de los valores diarios de precipitación: días sin precipitación, y los días con precipitaciones se dividieron en precipitación escasa o moderada, iguales o menores a 10 mm en 24 horas, y muy intensa (mayor a 10 mm en 24 horas).

Una vez calculados los polinomios para estimar la radiación difusa en cada grupo de precipitación se obtuvo la media ponderada (ecuación 6.6):

$$Q_f = \left[\frac{n^0(A_0) + n^1(A_1) + n^{10}(A_{10})}{n} \right] Q_g \quad (6.6)$$

donde:

n = número total de días del mes
 n^0 = número de días sin precipitación del periodo 1982-2010 según la base de la ciudad de Xalapa publicada por el Servicio Meteorológico Nacional (2013b, en la base de datos CliCom, México)
 n^1 = número de días al mes con precipitaciones menores o iguales a 10 mm.
 n^{10} = es el número de días con precipitaciones mayores a 10 mm.
 A_0 , A_1 y A_{10} son los polinomios obtenidos con n^0 , n^1 , n^{10} , respectivamente

Otra opción también explorada fue la de agrupar los datos de Kt y Kd diarios según tres intervalos de valores de temperatura máxima diaria ($Tmax$), a partir de su distribución de frecuencias: $Tmax < 20^\circ C$ (n^{max1} casos), $20^\circ C \leq Tmax < 26^\circ C$ (n^{max2} casos) y $Tmax \geq 26^\circ C$ (n^{max3} casos). Lo respectivos polinomios son β_1 , β_2 y β_3 y el polinomio medio ponderado es:

$$Q_f = \left[\frac{n^{max1}(\beta_1) + n^{max2}(\beta_2) + n^{max3}(\beta_3)}{n} \right] Q_g \quad (6.7)$$

De manera similar se procedió a partir de la temperatura mínima ($Tmin$) al definirse los intervalos $Tmin < 12^\circ C$ (n^{min1} casos), $12^\circ C \leq Tmin < 17^\circ C$ (n^{min2} casos) y $Tmin \geq 17^\circ C$ (n^{min3} casos), con sus respectivos polinomios γ_1 , γ_2 y γ_3 :

$$Q_f = \left[\frac{n^{min1}(\gamma_1) + n^{min2}(\gamma_2) + n^{min3}(\gamma_3)}{n} \right] Q_g \quad (6.8)$$

La bondad de ajuste de los modelos generados fue analizada a partir de las medidas de dispersión, como: el error estándar de regresión (ESR), que se calculó con:

$$ESR = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (e_i - m_i)^2} \quad (6.9)$$

donde:

m_i es el dato medido, e_i es el dato estimado y R^2 es el coeficiente de determinación (cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson), con:

$$R^2 = \frac{\sum [(e_i - e_a) (m_i - m_a)]}{\sqrt{[\sum (e_i - e_a)^2] [\sum (m_i - m_a)^2]}} \quad (6.10)$$

donde:

m_a es el promedio de datos medidos

e_a es el promedio de los datos estimados

Modelos resultantes

Los modelos mensuales para valores de cada 10 minutos se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2

Los modelos polinomiales

$Q_f = (a_0 + a_1 Kt + a_2 Kt^2 + a_3 Kt^3 + a_4 Kt^4 + a_5 Kt^5) Q_g$,
por mes (cada 10 minutos) obtenidos para Xalapa

Mes	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2 (estimado versus medido)	ESR (W/m ²)
Enero	13.55	-13.97	2.53	0.78	0	0	0.54	65
Febrero	6.61	-9.1	2.17	0.79	0	0	0.55	94
marzo*	13.89	-18.94	6.21	-0.83	0.95	0	0.74	76
abril*	1.92	-3.2	0.57	0.89	0	0	0.61	94
mayo*	2.15	-3.72	0.89	0.87	0	0	0.76	68
junio*	1.17	-2.94	0.58	0.89	0	0	0.82	58
julio*	19.66	-41.56	30.17	-9.95	1.27	0.92	0.92	45
agosto*	2.56	-4.81	0.86	0.93	0	0	0.73	71
septiembre*	2.83	-4.35	0.85	0.94	0	0	0.60	92
octubre*	5.74	-7.45	1.36	0.93	0	0	0.50	81
noviembre*	12.46	-12.9	2.08	0.89	0	0	0.39	98
diciembre	15.24	-15.22	2.78	0.71	0	0	0.49	63

Nota: el * señala modelos en lo que además de eliminar datos erróneos, se eliminaron valores de $Kd \leq 0.8$ y $Kt \leq 0.2$ o $Kd \geq 0.7$ y $Kt \geq 0.6$.

Los modelos mensuales para valores diarios se muestran en la tabla 6.3.

Tabla 6.3

Los modelos polinomiales mensuales diarios de mejor ajuste para Xalapa, a partir de datos acumulados diarios

$$Q_f = (a_0 + a_1 Kt + a_2 Kt^2 + a_3 Kt^3 + a_4 Kt^4) Q_g$$

Mes	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R ² (estimado versus medido)	ESR (MJ/m ² por día)
enero**	0.92	1.04	-5.13	0	0	0.83	0.75
febrero **	0.96	1.14	-4.48	0	0	0.79	1.29
marzo**	0.98	0.15	-2.36	0	0	0.32	2.11
abril (Tmin)	0.68	3.22	-12.52	9.76	0	0.53	1.94
mayo**	0.44	4.88	-14.55	10.08	0	0.59	1.66
junio (Tmin)	0.57	3.78	-13.16	9.86	0	0.43	0.89
julio (Tmin)	0.73	2.90	-11.82	9.21	0	0.88	1.30
agosto**	0.42	10.23	-59.30	121.88	-88.12	0.50	1.16
septiembre (Tmin)	0.67	3.27	-12.42	9.53	0	0.60	1.49
octubre**	1.71	-3.85	2.12	0	0	0.66	0.97
noviembre**	-6.17	54.76	-138.54	108.88	0	0.76	0.83
diciembre**	0.99	-0.20	-2.91	0.00	0	0.63	1.01

Nota: los ** indican modelos en los que además de eliminar datos erróneos, se eliminaron valores de $Kd \leq 0.9$ y $Kt \leq 0.2$ o $Kd \geq 0.5$ y $Kt \geq 0.5$; Tmin son modelos agrupados según valores de temperatura mínima diaria.

Los modelos para valores diarios agrupados por trimestres se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.4

Los mejores modelos polinomiales

$$Q_f = (a_0 + a_1 Kt + a_2 Kt^2 + a_3 Kt^3 + a_4 Kt^4) Q_g$$

para cada trimestre del año, con datos diarios acumulados de
Xalapa, Veracruz

Mes	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R ² (estimado versus medido)	ESR (MJ/m ² por día)
Diciembre a febrero** (Tmin)	0.87	2.27	-11.88	10.19	0	0.57	1.53
Marzo a mayo** (Tmin)	0.69	3.17	-12.55	9.86	0	0.56	1.91
Junio a agosto** (Tmax)	-0.52	12.40	-36.48	34.20	-7.60	0.62	1.19
Septiembre a noviembre** (Tmax)	0.36	4.48	-10.07	-4.41	13.06	0.64	1.43

Nota: los ** señalan modelos en los que además de eliminar datos erróneos se eliminaron valores de $Kd \leq 0.9$ y $Kt \leq 0.2$ o $Kd \geq 0.5$ y $Kt \geq 0.5$; Tmin o Tmax son modelos agrupados según valores de temperatura mínima o máxima diaria.

Bibliografía

- Chikh, M.; Mahrane, A. y Haddadi, M. (2012). Modeling the diffuse part of the global solar radiation in Algeria. *Energy procedia*, 18: 1068-1075.
- Erbs, D.G.; Klein, S.A. y Duffie, J.A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar energy*, 4: 293-302.
- Gopinathan, K.K. (1988). A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine radiation. *Solar Energy*. 41: 499-502.
- Janjai, S.; Praditwong, P. y Moonin, C. (1996). A new model for computing monthly average daily diffuse radiation for Bangkok. *Renewable Energy*, 9: 1283-1286.

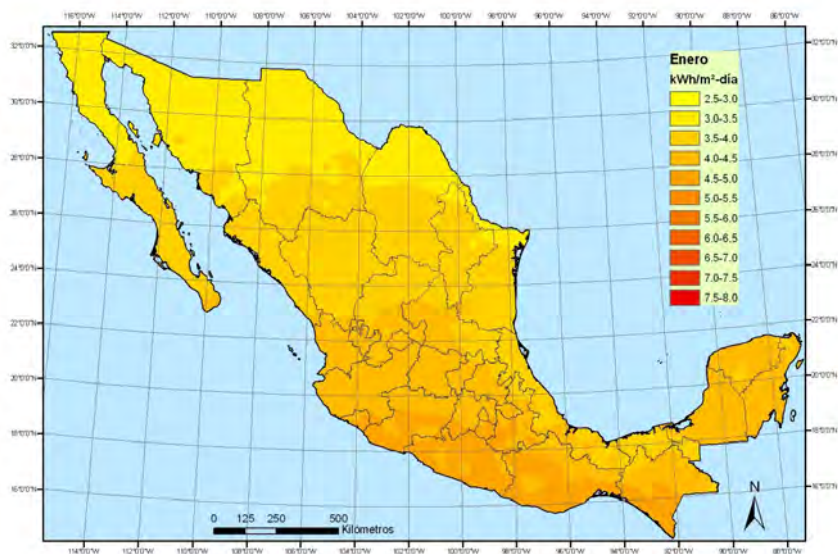
- Li, H.; Ma, W.; Wang X. y Lian, Y. (2011). Estimating monthly average daily diffuse solar radiation with multiple predictors: A case study. *Renewable energy*, 36: 1944-1948.
- Li, H.; Bu, X.; Long, Z.; Zhao, L. y Ma, W. (2012). Calculating the diffuse solar radiation in regions without solar radiation measurements. *Energy*, 44: 611-615.
- Linacre, E. (2005). *Climate data and resources, a reference and guide*. New York: Routledge.
- Liu, B. y Jordan, R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4: 1-19.
- Llasat, M.C. y Snyder, R.L. (1998). Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91: 209-221.
- Orgill, J.F. y Hollands, K.G.T. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar energy*, 19: 357-359.
- Reindl, D.T.; Beckman, W.A. y Duffie, J.A. (1990). Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar energy*, 45: 9-17.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2013a). *Información y catálogo EMAS*. Consultado en enero de 2013. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/emas/catalogoa.html>.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2013b). *Normales climatológica de Xalapa*. Consultado en enero de 2013. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/ver/NORMAL30228.TXT>.

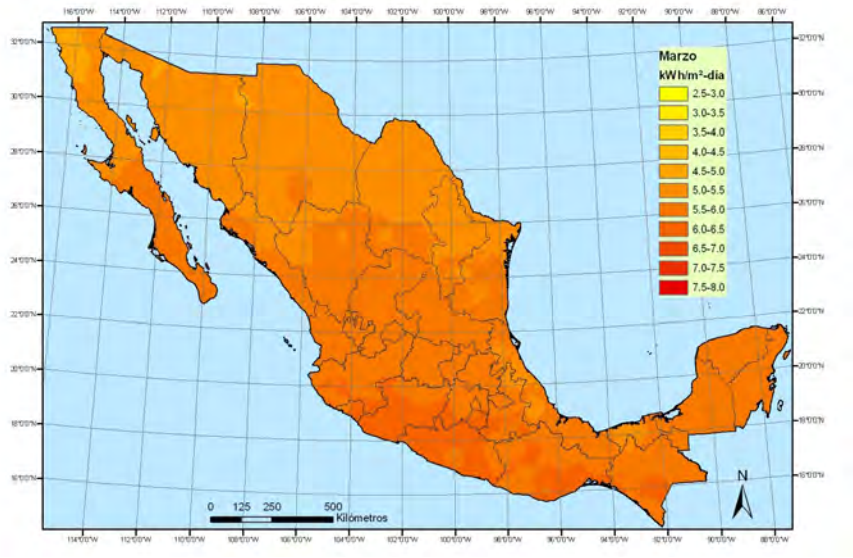
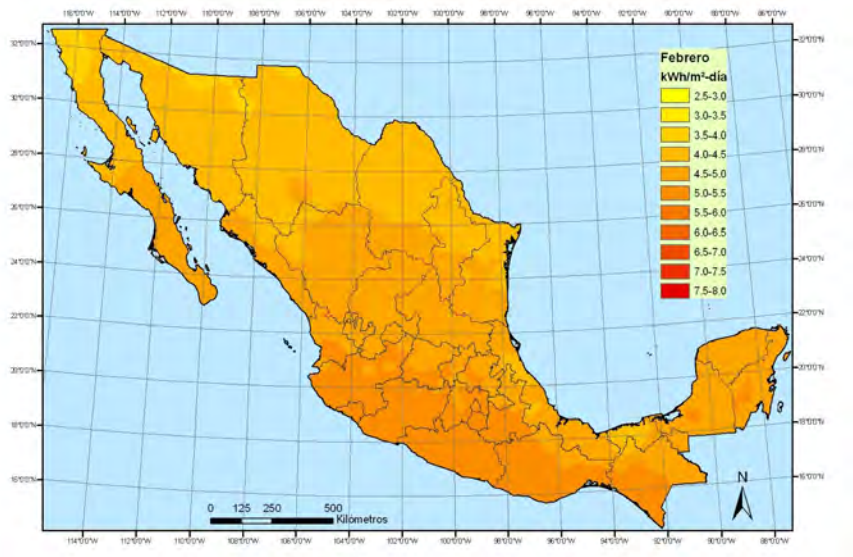
ANEXO I

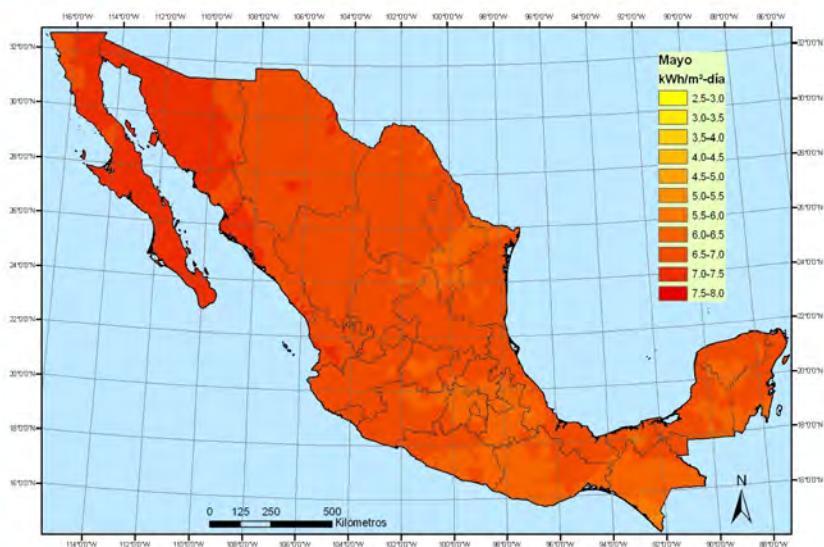
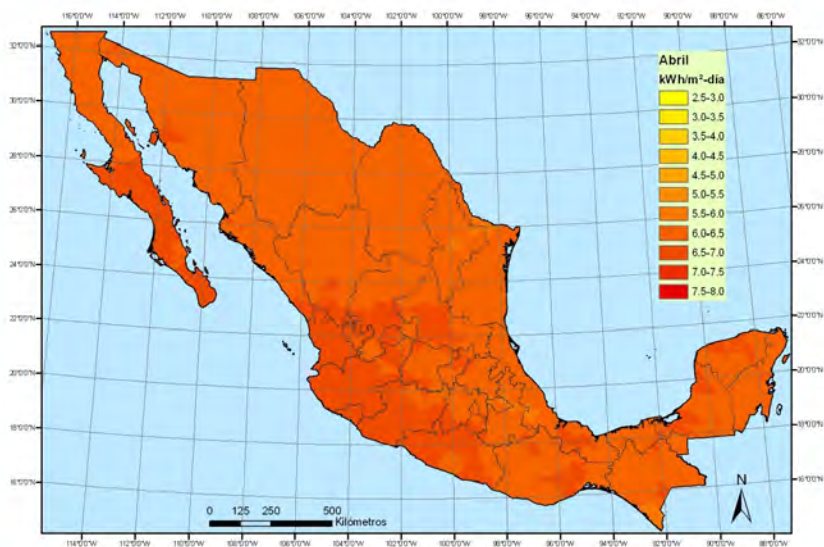
MAPAS DE IRRADIACIÓN SOLAR EN MÉXICO

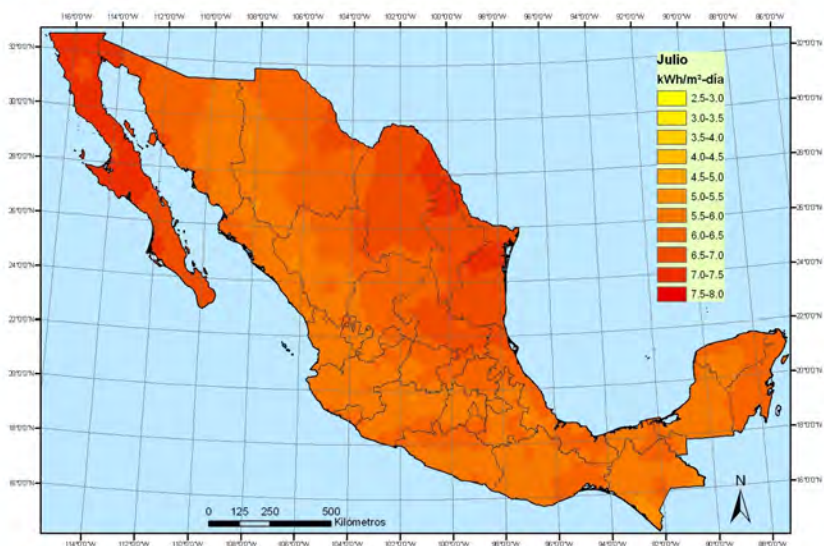
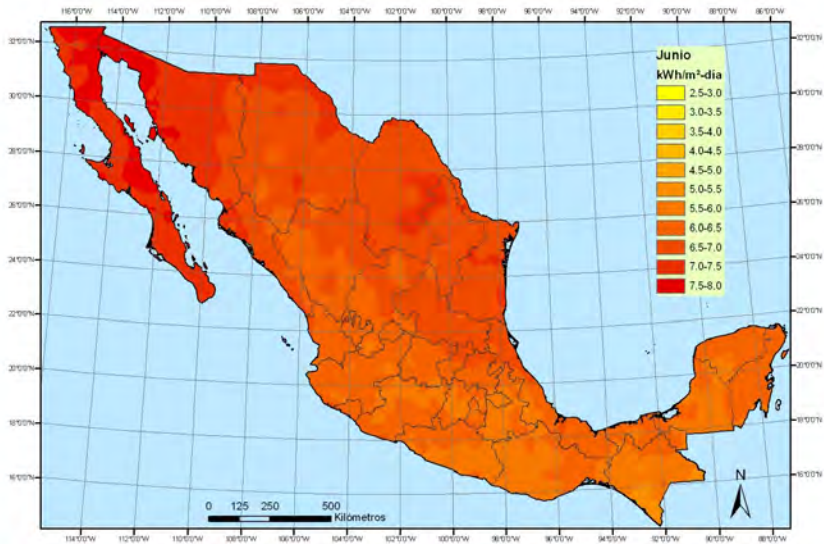
Ubaldo Miranda-Miranda

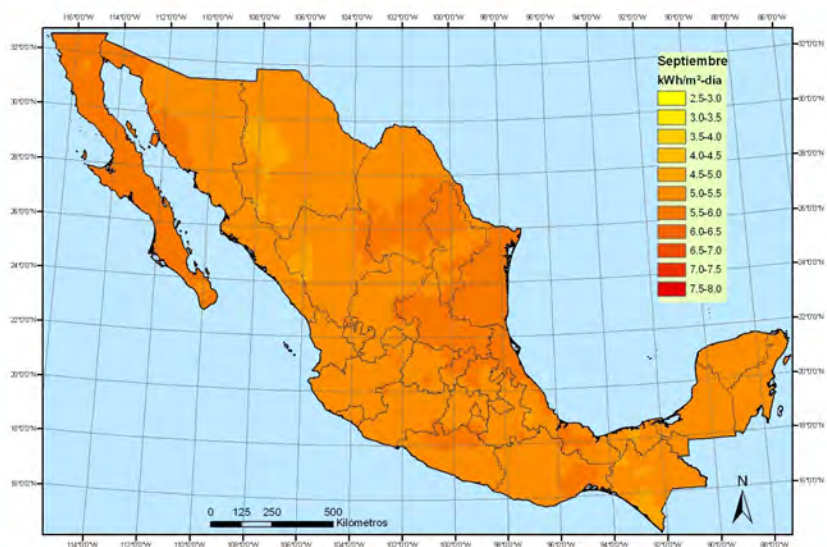
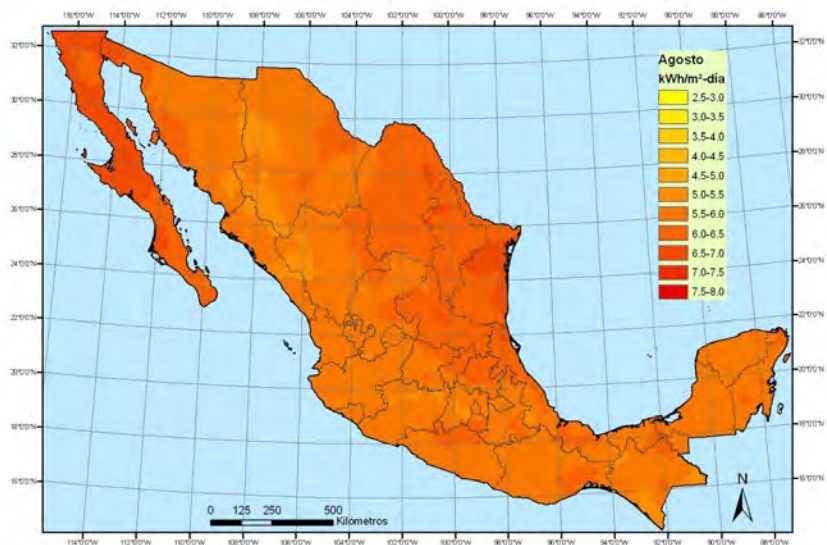
Irradiación solar global

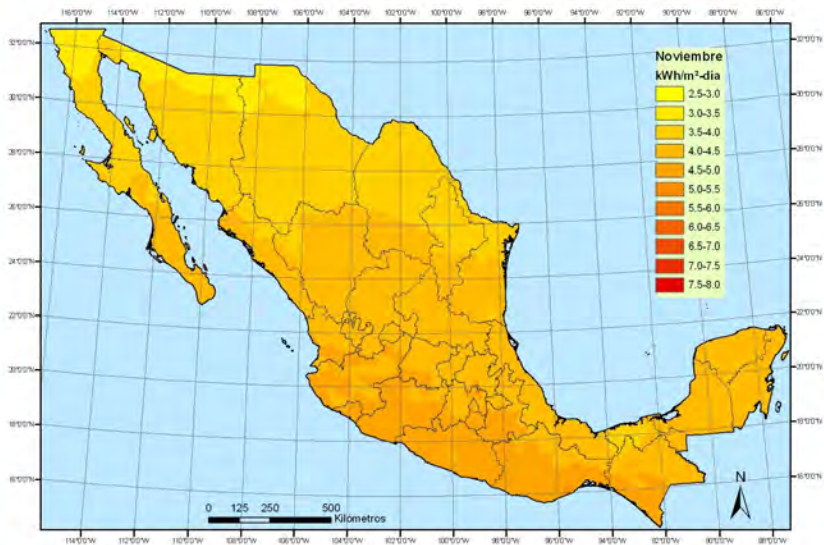
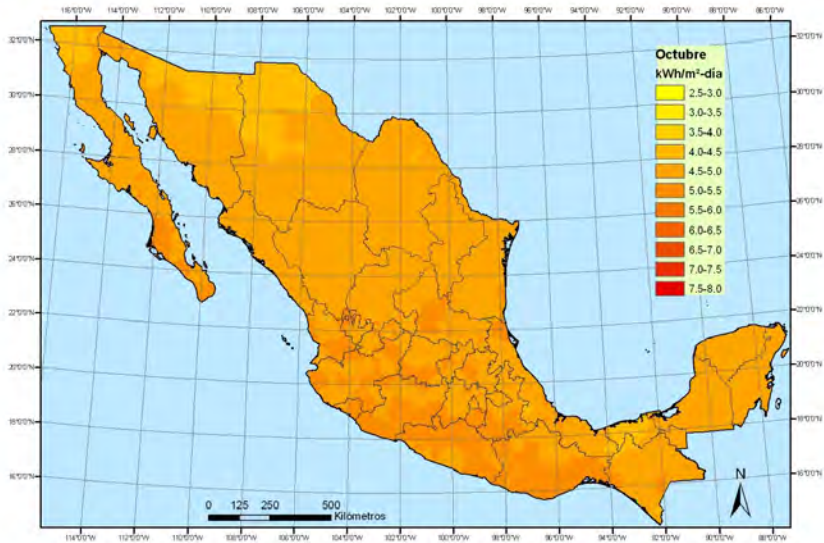


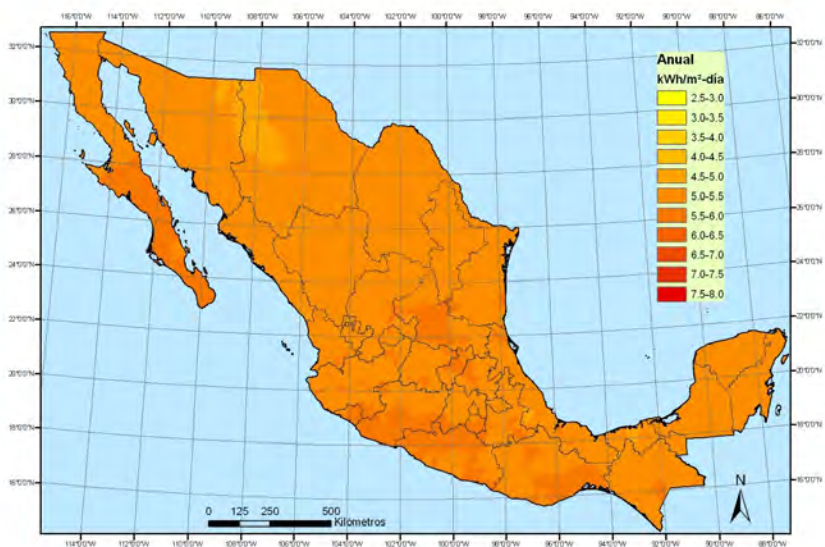
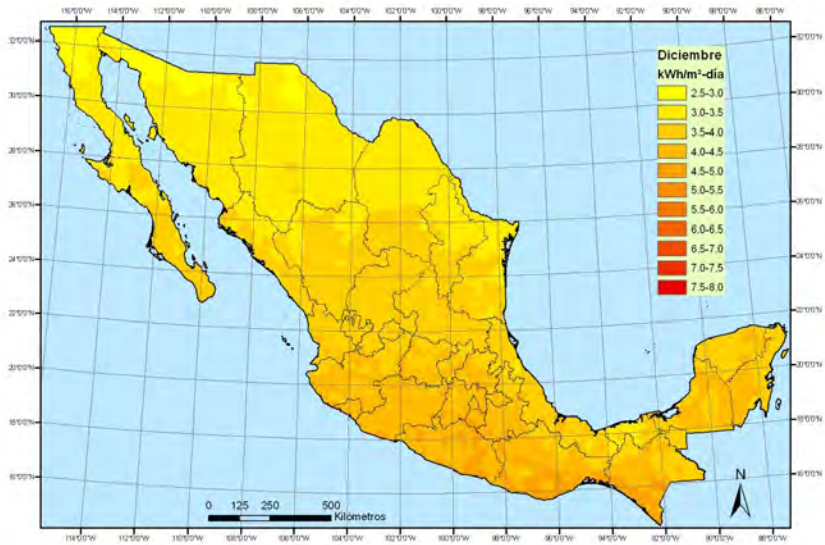




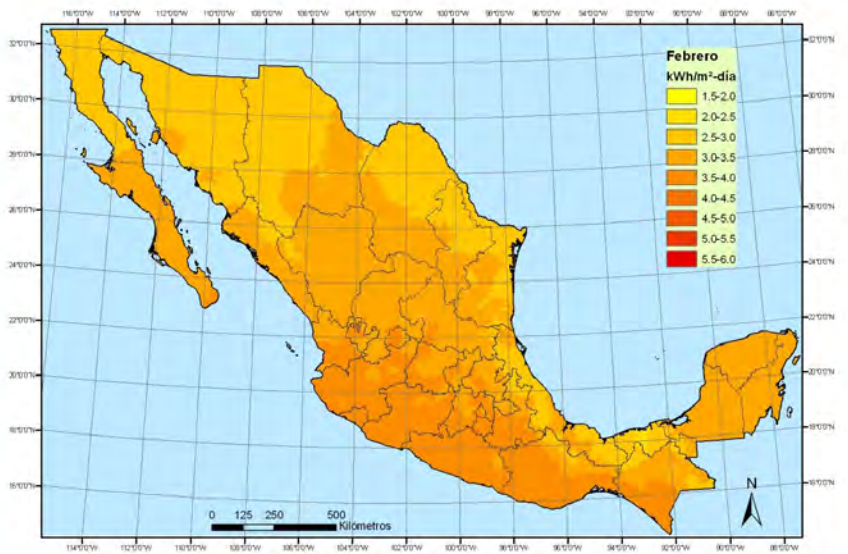
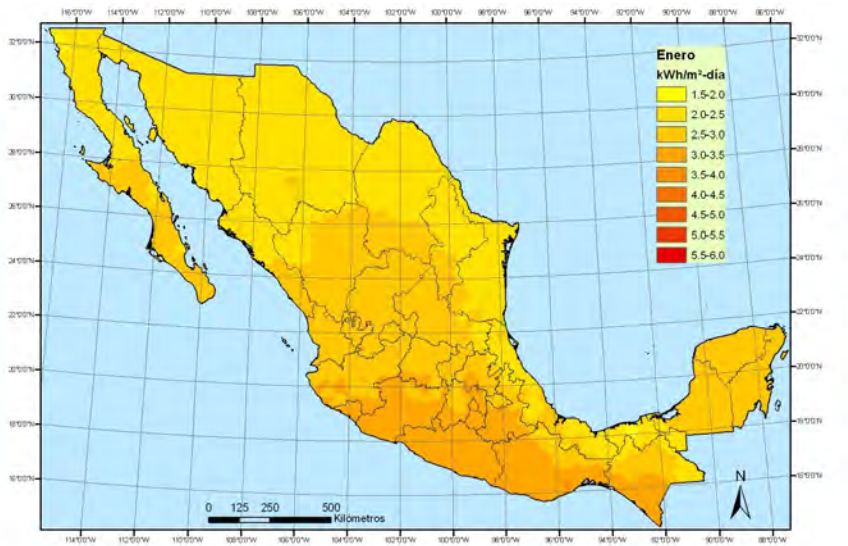


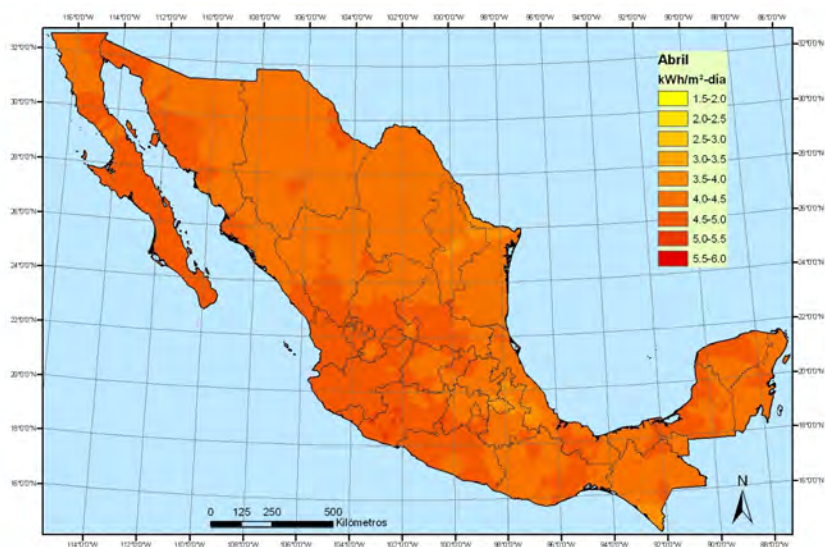
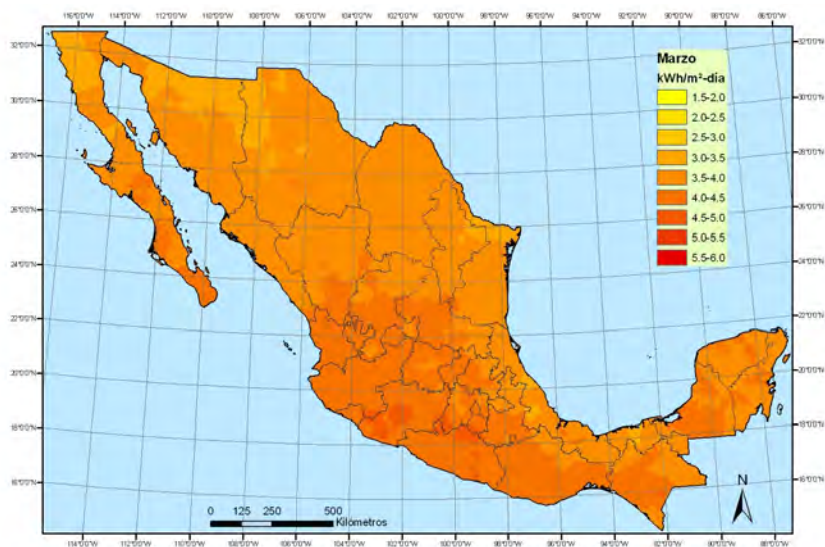


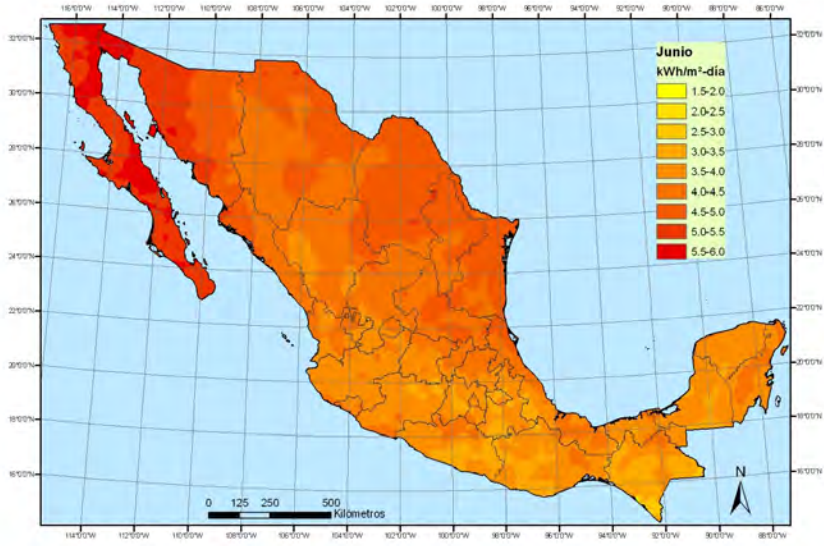
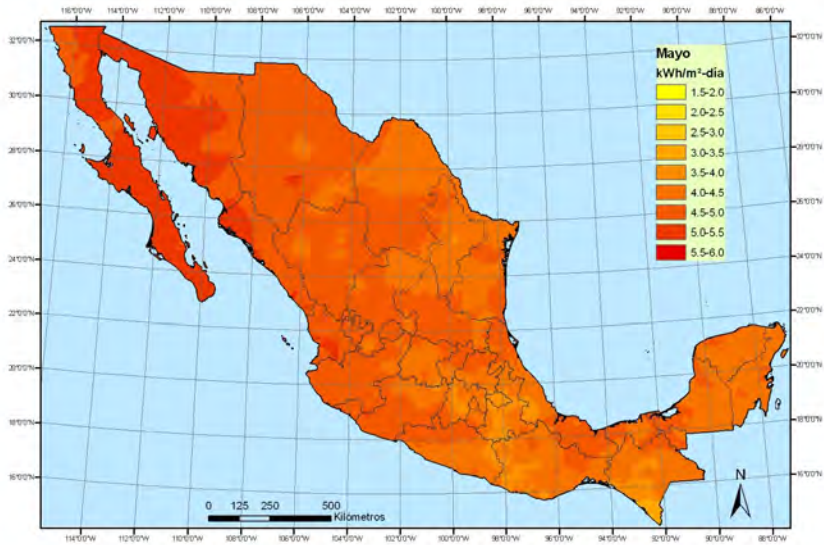


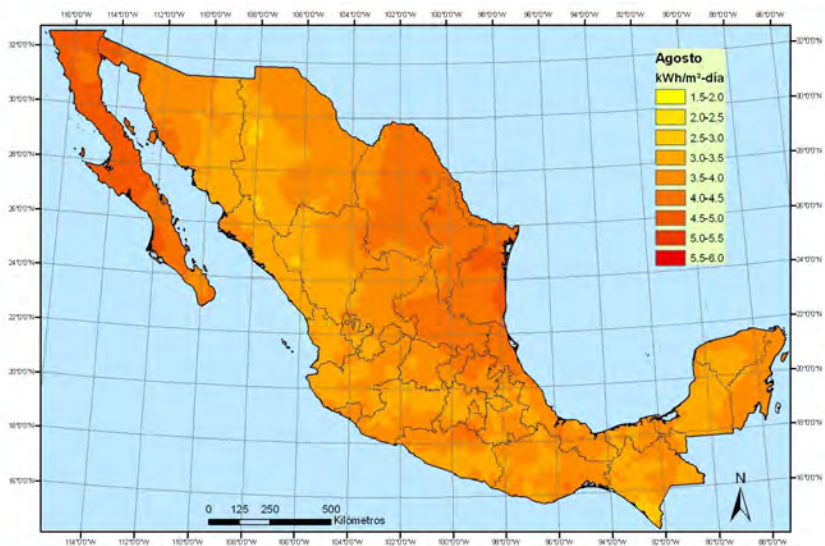
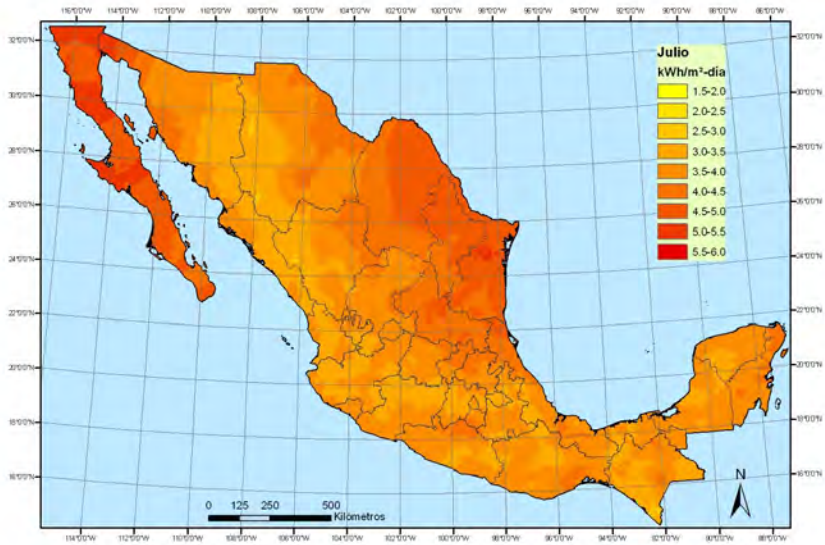


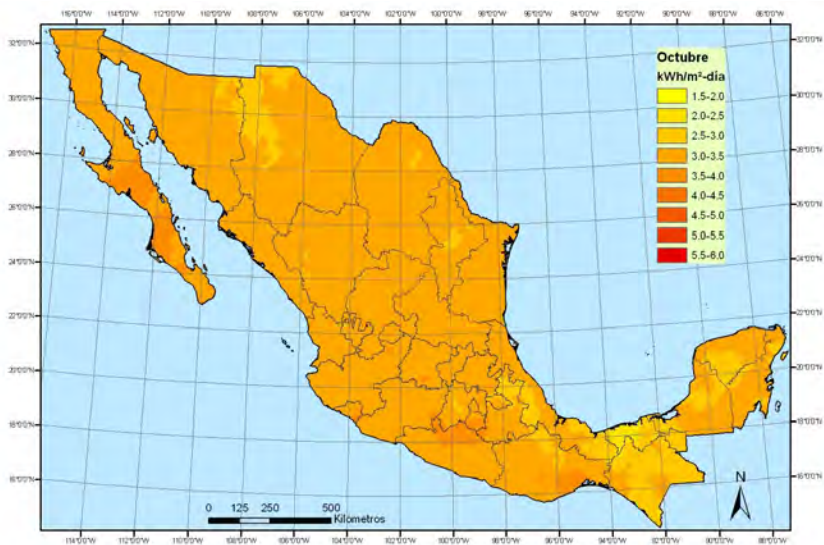
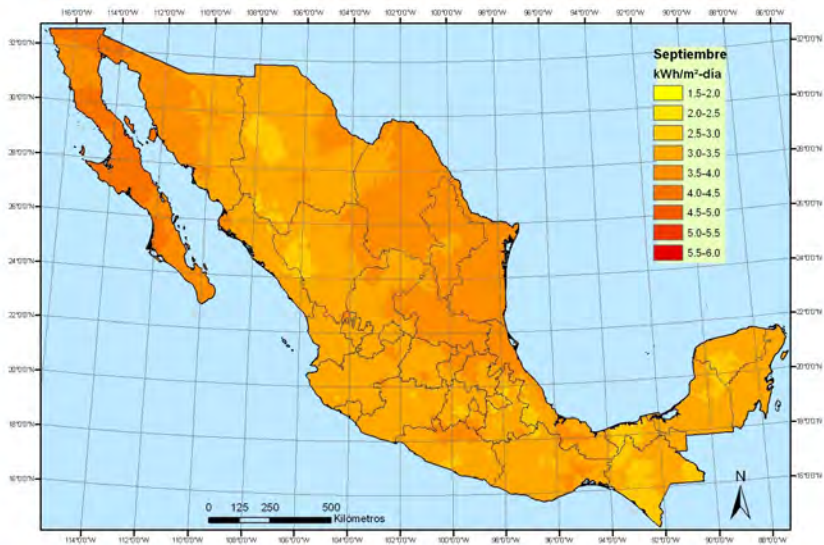
Irradiación solar directa

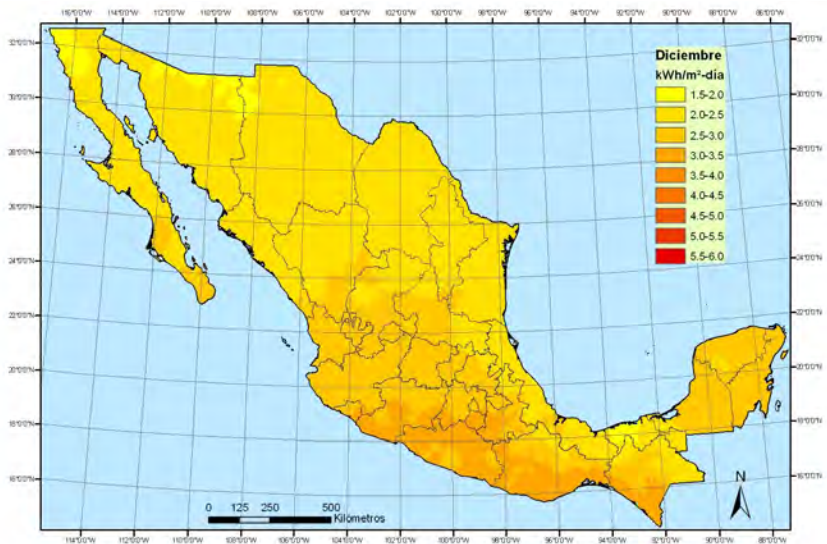
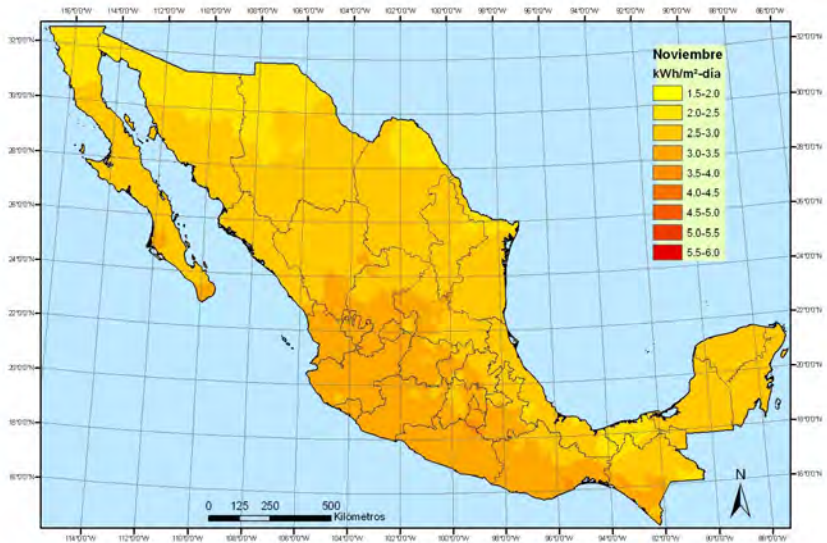


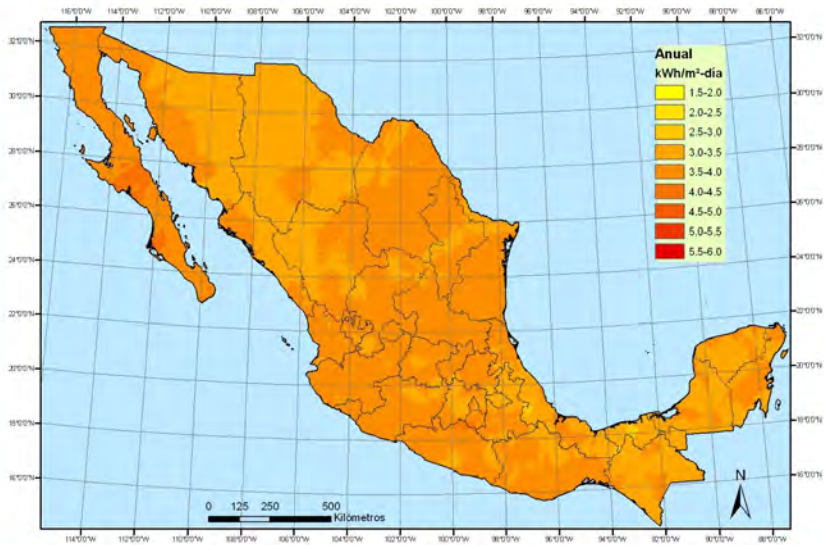




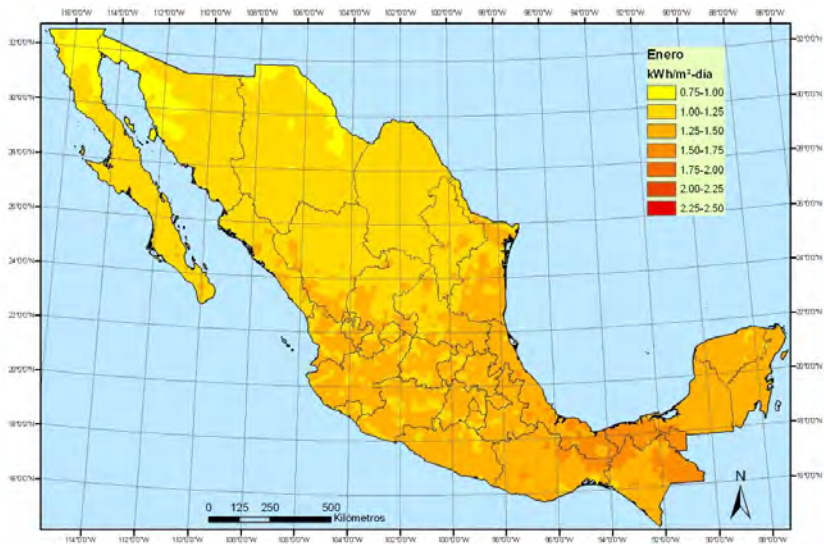


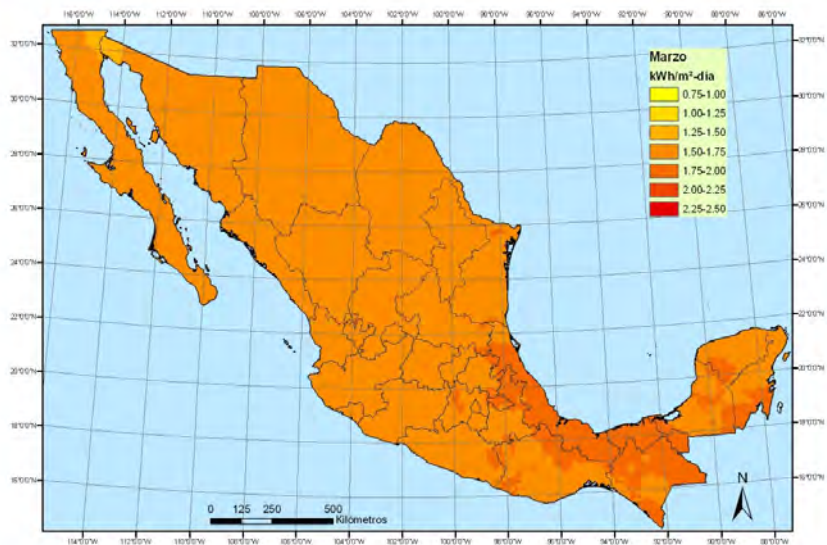
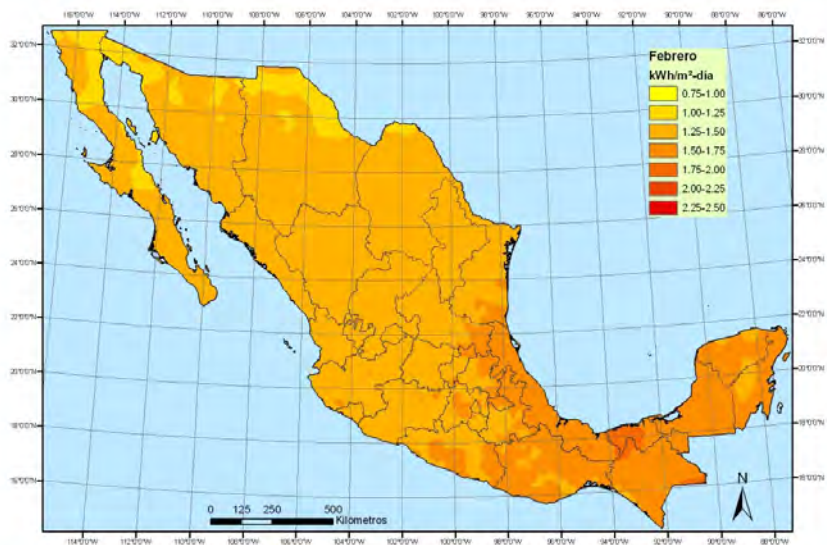


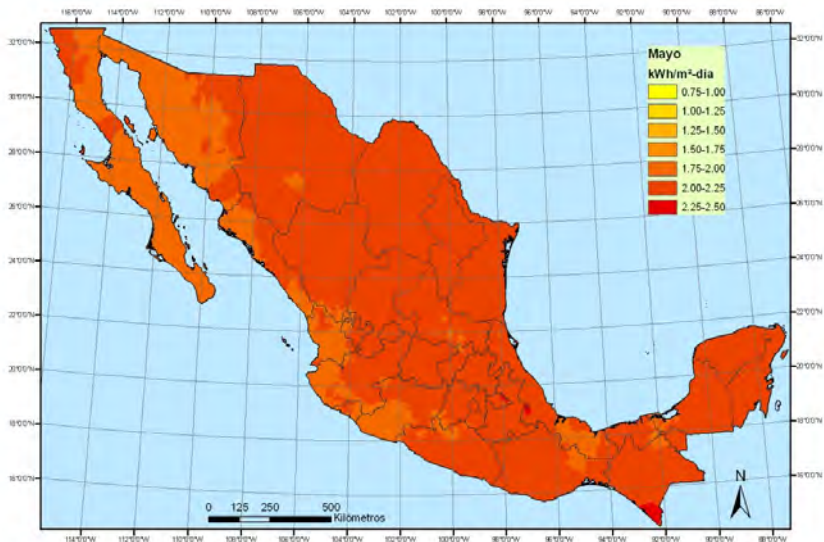
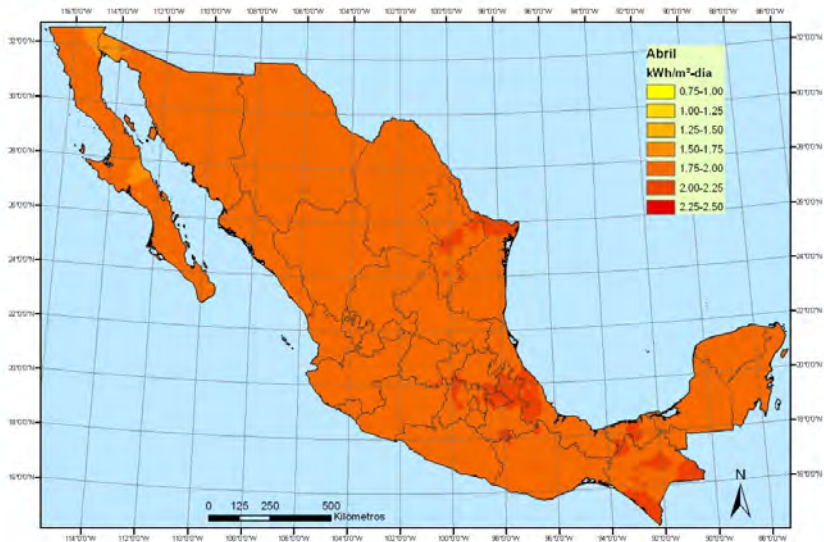


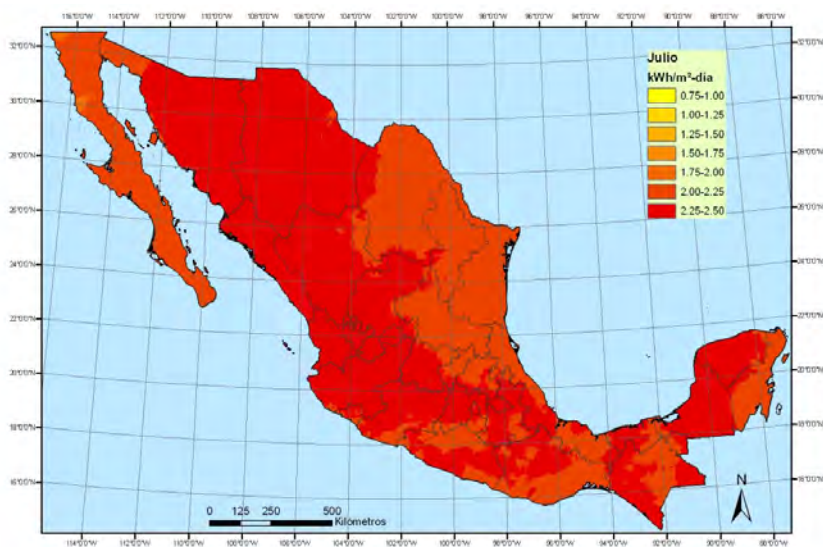
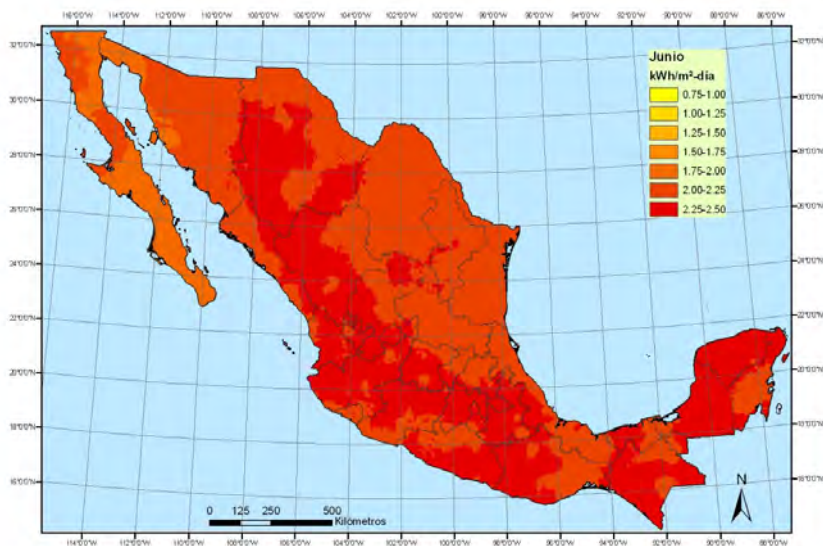


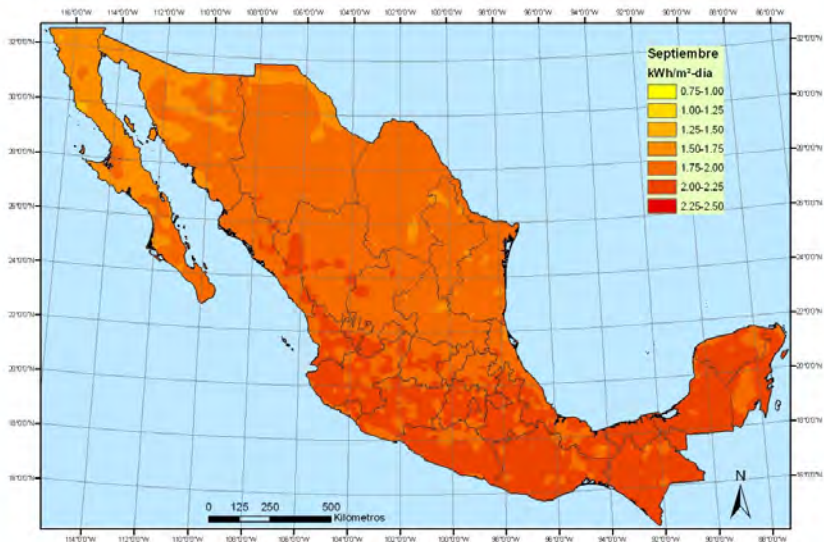
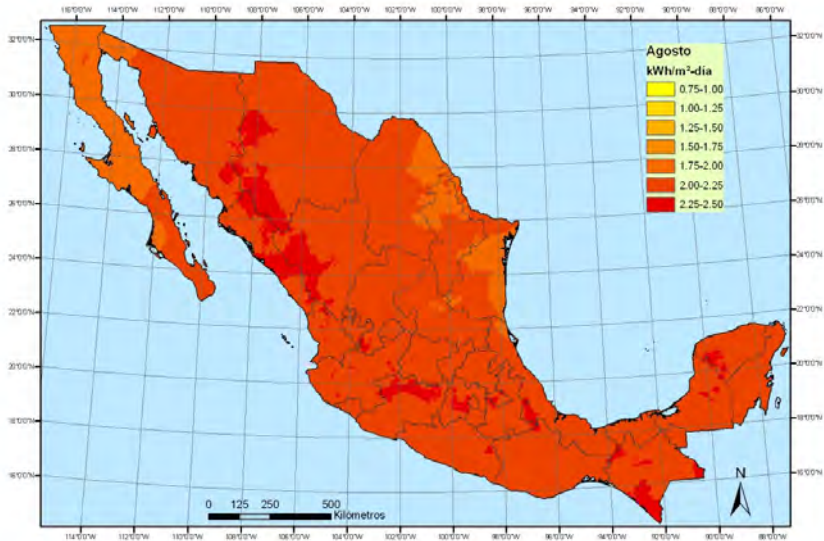
Irradiación solar difusa

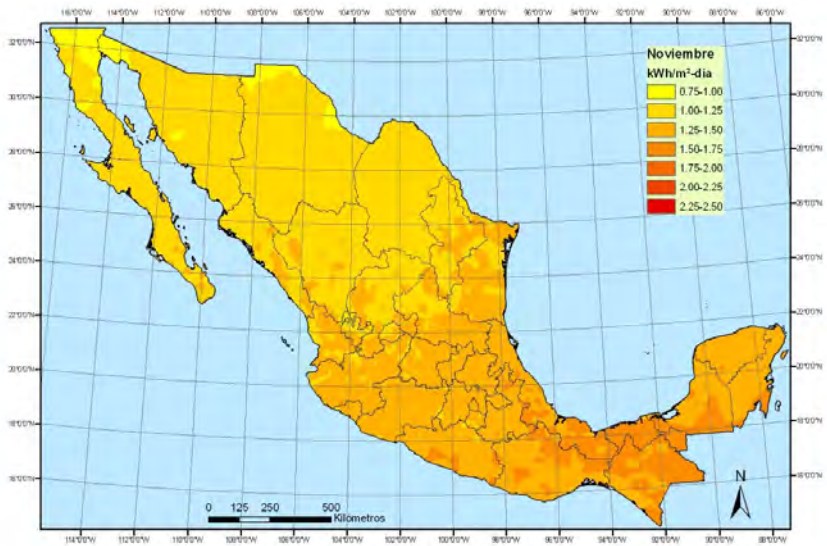
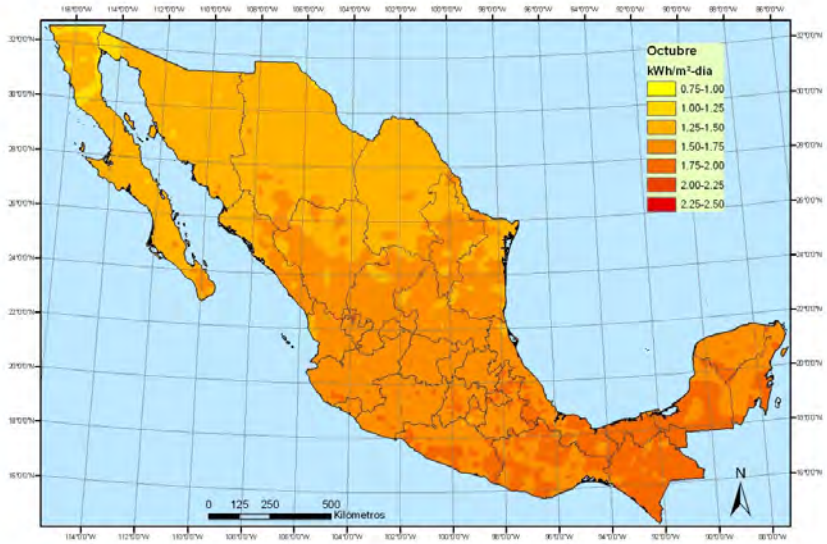


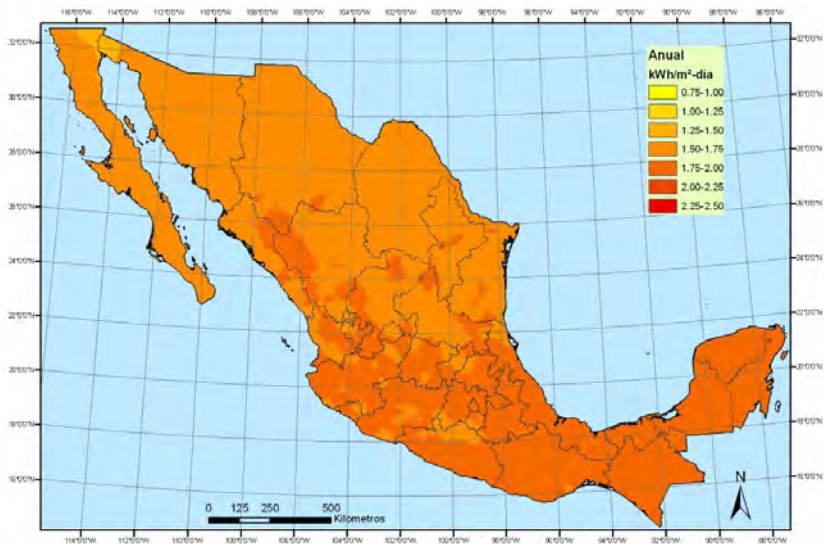












ANEXO II

PROGRAMAS, APLICACIONES Y BASES DE DATOS DE INTERÉS DISPONIBLES EN LA WEB

Programas de cómputo

Apogee Instruments

Estima la radiación global en un plano horizontal utilizado para comparar principalmente calibraciones entre equipos de medición. <http://clearskycalculator.com/pyranometer.htm>.

Arqueosol

Programa desarrollado en Excel para determinar los rumbos del orto y el ocaso y la altura solar al medio día de un determinado día proporcionado por el usuario. Determina también la localización de relieves en el horizonte. Útil para identificar trazos directrices en sitios arqueológicos relacionados con la posición del Sol y las elevaciones prominentes del horizonte. De acceso gratuito.

Autodesk Ecotect Analysis

Software no gratuito auxiliar en el análisis para el diseño sostenible. El módulo Solar Tool auxilia en el proceso de diseñar envolventes en concordancia con la posición relativa del sol y su aporte energético. <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>.

Climate Consultant

Programa gratuito capaz de estimar la radiación captada por una superficie (en Wh/m² por día) y hacer comparaciones entre múltiples

escenarios. Visualiza gráficas solares y analiza dispositivos de sombreado.

<http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>.

Gaisma

Detalla información básica de la salida y puesta del Sol, datos de radiación solar y variables meteorológicas y gráficos de la trayectoria solar.

<http://www.gaisma.com/en/dir/001-continent.html>.

Global Solar Map GOOGLE

Mapa de valores de radiación solar horizontal en superficie.

http://maps.google.com/gallery/details?id=zJuaSgXp_WLc.kzhA-8d4O7_mk&hl=en.

Grafisol

Programa desarrollado en Excel que permite visualizar diagramas solares equidistantes de proyección tanto horizontal como vertical. Auxiliar en el diseño de dispositivos de sombreado para fachadas. De acceso gratuito.

Luz do sol

Software gratuito que visualiza diagramas solares equidistantes, hace cálculo de radiación solar y de iluminación natural y ofrece herramientas para construir relojes solares para las latitudes de Brasil.

<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/luz-do-sol>.

NASA

Datos climáticos y de energía solar mensuales en superficie.

<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca>.

NOAA solar calculator

Salida y puesta de sol en cualquier sitio del planeta.

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>.

NREL

Mapa de valores de radiación solar horizontal en superficie.

<http://maps.nrel.gov/SWERA>.

Passive Design Assistant tool

Programa gratuito que entre otras funciones estima la reducción de la temperatura interior de un espacio con el empleo de protecciones solares en la ventana.

https://www.concretecentre.com/online_services/design_tools_and_software/passive_design_assistant_tool.aspx.

Pveducation

Gráficas de salida, puesta y horas de sol.

<http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation>.

Radiasol

Programa desarrollado en Excel para calcular la irradiación instantánea a determinada fecha y hora, así como la radiación diaria global, sobre cualquier plano. Considera condiciones de cielo despejado así como condiciones de nublado según datos aportados por el usuario. De acceso gratuito.

Santa Clara University School of Engineering

Cálculo de la radiación solar extraterrestre al tope de la atmosfera.

http://www.engr.scu.edu/~emaurer/tools/calc_solar.cgi.pl.

Solar noon

Cálculo de calendario del medio día solar.

<http://www.solar-noon.com>.

SOLRPATH

Software didáctico para el diseño de protecciones solares (sombreado, ángulos y datos de radiación solar).

<http://esl.tamu.edu/>.

Stellarium

Es programa gratuito de código abierto para la visualización astronómica computarizada de cuerpos celestes, alimentada con imágenes de diferentes telescopios astronómicos de todo el mundo.

<http://www.stellarium.org/es/>.

SunCalc

Muestra el movimiento del Sol y las fases de luz solar durante el día, para una ubicación específica: salida, puesta y trayectoria.

<http://www.suncalc.net/#/51.508,-0.125,2/2014.04.17/13:17>.

Sunpath

Programa desarrollado en Excel que visualiza las trayectorias solares en elevación. De acceso gratuito.

http://windland.ch/tools/Sun_path.xls.

Sustainable by Design

Herramientas sencillas para el diseño y la radiación solar (sombreado, ángulos y datos de radiación solar).

<http://www.susdesign.com/tools.php>.

Aplicaciones

MrSun

Ubica la posición Solar.

App Store.

Stellarium Mobile

Es un programa para dispositivos móviles con pantalla táctil y giroscopio.

App Store.

Sun & Moon

Factor de sombra, acimut y ángulo de elevación solar.

App Store.

Sun Seeker

Factor de sombra, acimut y ángulo de elevación solar.

App Store.

Sun Surveyor Lite

Muestra los horarios de salida y puesta del sol así como su trayectoria, empleando la pantalla de dispositivos móviles con cámara.

App Store.

Sunrise

Gráfica de la salida y puesta de sol.

App Store.

Teodolito Droid

Simula el funcionamiento de un teodolito para establecer los ángulos de altura y acimut de obstrucciones como montañas, edificios, árboles, etcétera.

App Store.

Bases de datos

Compilación de bases de datos de radiación solar. Diversas bases de radiación solar en el mundo.

<http://photovoltaic-software.com/solar-radiation-database.php>.

AUTORES

Camilo Caicedo Moncayo. Arquitecto por la Universidad del Valle, Colombia, y maestro en arquitectura bioclimática por ISTHMUS, Panamá y por la Universidad de Colima, México. Es consultor y docente en arquitectura solar y modelado energético de edificios. Se desempeña como director de diseño de proyectos arquitectónicos en una oficina privada en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Carlos Escobar Del Pozo. Ingeniero mecánico, maestro en ingeniería y doctor en ingeniería por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Actualmente es profesor e investigador de la Universidad de Colima, donde investiga sobre modelación numérica de dinámica de fluidos, transferencia de calor y de masa, aplicado a dispositivos arquitectónicos.

Ivonne M. García-Martínez. Licenciada en ciencias atmosféricas de la Universidad Veracruzana y maestra en ciencias en oceanografía por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Gabriel Gómez-Azpeitia. Doctor en arquitectura por la UNAM y maestro en diseño bioclimático por la Universidad de Colima. Su área de investigación incluye aspectos de geometría solar, confort térmico y dispositivos de enfriamiento pasivo en cubiertas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1 y académico de la Universidad de Colima desde 1983.

Pohema de Jesús González Viveros. Licenciada en ciencias atmosféricas con especialización en diagnóstico y gestión ambiental por la Universidad Veracruzana y maestría en ciencias de la Tierra por la UNAM. Actualmente estudia el doctorado en ciencias de la Tierra.

Ernesto López Velázquez. Licenciado en ciencias atmosféricas con especialización en métodos estadísticos por la Universidad Veracruzana (UV); para la obtención de ambos títulos hizo análisis estadísticos de la radiación difusa en Xalapa, Veracruz.

José V. López-Méndez. Licenciado en ciencias atmosféricas de la Universidad Veracruzana y maestro en ciencias de la física de la atmósfera por la UNAM. Actualmente trabaja en PEMEX en la modelación y adquisición de datos meteorológicos y oceánicos para la exploración en aguas profundas.

Irving R. Méndez-Pérez. Licenciado en ciencias atmosféricas por la Universidad Veracruzana, maestro y doctor en geografía por la UNAM. Ha trabajado en temas relacionados con la radiación neta, el bioclima humano y la historia de la climatología en México. Es investigador del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana.

Ubaldo Miranda-Miranda. Físico con maestría en sistemas de información geográfica. Es investigador de la Gerencia de Energías no Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas, donde ha dirigido el Laboratorio Nacional para la Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables en México (LERM), que está acoplado con el sistema de información geográfica para las energías renovables (SIGER), diseñado por él mismo.

Adalberto Tejeda Martínez. Es doctor en geografía y maestro en geofísica por la UNAM. Trabaja en el área de climatología aplicada. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2 y académico de la Universidad Veracruzana desde 1985.

Erik Eduardo Vázquez Fernández. Ingeniero mecánico electricista por la Universidad de Colima y maestro en ciencias en ingeniería eléctrica por el Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente es candidato al grado de doctor y profesor por asignatura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima.

Prontuario solar de México, compilado por Adalberto Tejeda Martínez y Gabriel Gómez-Azpeitia, fue editado en la Dirección General de Publicaciones de la Universidad de Colima, avenida Universidad 333, Colima, Colima, México, www.ucol.mx. La digitalización se terminó en abril de 2015. En la composición tipográfica se utilizó la familia Veljovic Book. El tamaño del libro es de 22.5 cm de alto por 16 cm de ancho. Programa Editorial: Alberto Vega Aguayo. Gestión Administrativa: Inés Sandoval Venegas. Diseño: José Luis Ramírez Moreno. Cuidado de la edición: Myriam Cruz-Calvario.

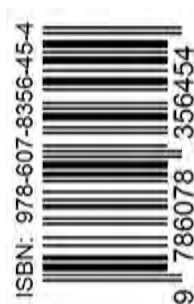
Este *Prontuario solar de México* enumera, alfabéticamente, los conceptos generales de la radiación y la geometría solar, la descripción de los principales instrumentos de medición y de las bases físicas; presenta algunos métodos prácticos de estimación de la irradiación solar global, difusa y directa para México, y muestra mapas de los meses representativos de las estaciones del año (enero, abril, julio y octubre) obtenidos con esos métodos simples. También detalla los procedimientos de estimación de la radiación solar e incluye mapas de irradiación solar global, directa y difusa de México para todos los meses, lo que prácticamente constituye una climatología solar del país. Asimismo presenta las aplicaciones al diseño arquitectónico para el aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos y colectores planos. Finalmente enlista los softwares de fácil acceso para cálculos o representaciones gráficas de radiación o de geometría solar.

Adalberto Tejeda Martínez

Doctor en geografía y maestro en geofísica por la UNAM. Trabaja en el área de climatología aplicada. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2 y académico de la Universidad Veracruzana desde 1985.

Gabriel Gómez Azpeitia

Doctor en arquitectura por la UNAM y maestro en diseño bioclimático por la Universidad de Colima. Su área de investigación incluye aspectos de geometría solar, confort térmico y dispositivos de enfriamiento pasivo en cubiertas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1 y académico de la Universidad de Colima desde 1983.



UNIVERSIDAD
DE COLIMA



Universidad Veracruzana