

# *Radiación Solar en la Capa exterior de la Atmósfera Terrestre y sobre la Superficie Terrestre (Suelo y Océano)*

Por Biól. Nasif Nahle Sabag

7 de junio de 2011

Cita a este artículo:

Nahle Sabag, Nasif. *Radiación Solar en la Capa Exterior de la Atmósfera Terrestre y Sobre la Superficie Terrestre (Suelo y Océano)*. *Biology Cabinet*. 7 de junio de 2011.

## *Reconocimientos:*

Este artículo ha sido revisado por personal académico de la [Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México](#).

Estoy agradecido con Patricia Martínez Moreno, M. C., Directora de la [Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México](#), por su valiosa orientación y por haber hecho posible el que yo haya tenido acceso a la División de postgrado de la Facultad.

Estoy agradecido con el Dr. José Rubén Morones Ibarra, Ph. D., Director de la División de postgrado de la [Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México](#), por haber empleado buena parte de su tiempo en la revisión de este artículo.

Estoy agradecido con el Dr. Jonathan Walsh, Ph. D., matemático (retirado), por su valiosa orientación sobre las matemáticas aplicadas en varios de mis artículos.

## *Resumen:*

A través de las fórmulas usuales en Física Solar, en este artículo presento varios procedimientos matemáticos para calcular la Irradiación Solar que se recibe en la capa más externa de la atmósfera terrestre y la atenuación que dicha irradiación solar sufre en su paso a través de la atmósfera hasta incidir en la superficie de la Tierra.

## *Introducción:*

El Sol es la fuente absoluta de energía para el planeta en que vivimos.

La existencia de los animales no sería posible en ausencia de los organismos fotosintéticos y éstos no existirían si nuestro planeta no tuviese un aporte continuo y efectivo de radiación solar.

Por esta razón, es altamente prioritario que los biólogos, y en general los científicos, conozcamos los aspectos relacionados con el flujo de potencia solar en nuestro planeta, empezando por las emisiones de radiación desde el Sol.

No solamente los seres vivos están relacionados estrechamente con la energía que nos llega desde el Sol; los climas del mundo obedecen a esta relación Sol-Tierra, así como también muchos fenómenos geológicos.

La ciencia encargada del estudio de las estrellas es la Astrofísica. El Sol es una estrella, por lo cual el Sol es estudiado por la Astrofísica.

Los astrofísicos pueden especializar su carrera en Física Solar. Los biólogos, por su parte, pueden especializarse en astrobiología, por lo cual, el estudio de la dinámica estelar y otros aspectos de la astrofísica son particularmente importantes para sus investigaciones.

### *Sección I: La constante Solar:*

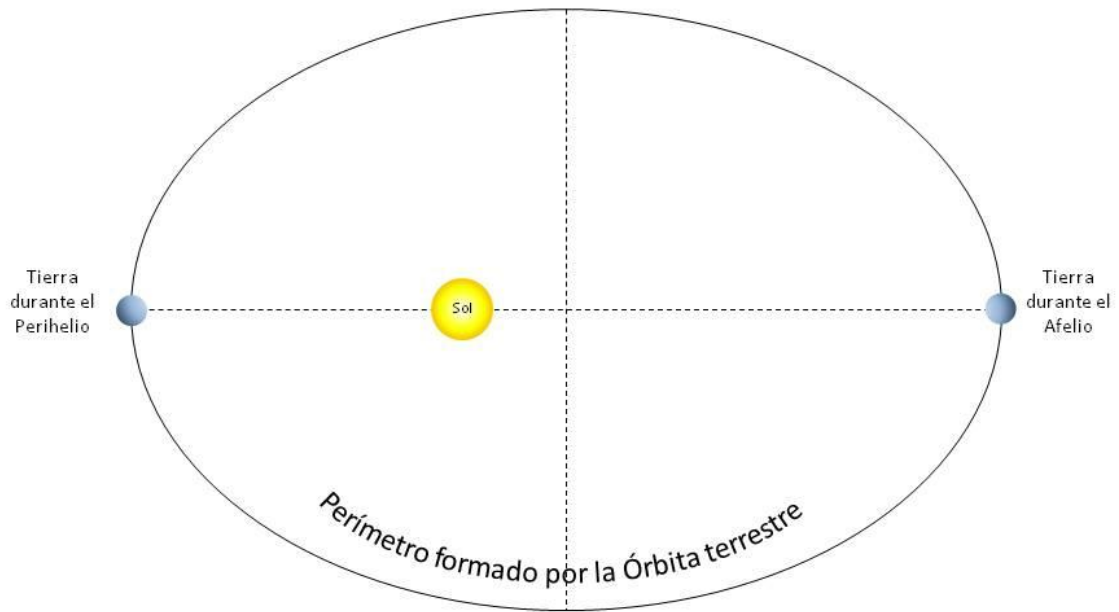
La constante solar es una cantidad medible y calculable a través de procedimientos matemáticos. Ambos argumentos son válidos porque la irradiación solar que incide en la capa más exterior de la atmósfera terrestre ya ha sido cuantificada a través de instrumentos satelitales. El valor obtenido a través de las mediciones coincide perfectamente con los valores calculados.

Así mismo, la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, sea en suelo firme o en los océanos, ha sido cuantificada a través de mediciones realizadas por instrumentos ajustados para detectar, exclusivamente, la radiación solar incidente a ras del suelo.

El valor de 1368 W es la cantidad de potencia solar recibida por cada metro cuadrado de la superficie formada por la esfera orbital de la Tierra, es decir,  $1368 \text{ W/m}^2$ . Dicha esfera se denomina Esfera Exterior y tiene un radio igual a la distancia entre el Sol y la Tierra.

Sabemos que dicha distancia varía a través del año porque la órbita de nuestro planeta es elíptica, no completamente circular, además de que el Sol no se encuentra exactamente en el centro de dicha elipse (Fig. 1).

## Órbita de la Tierra (perímetro exterior)



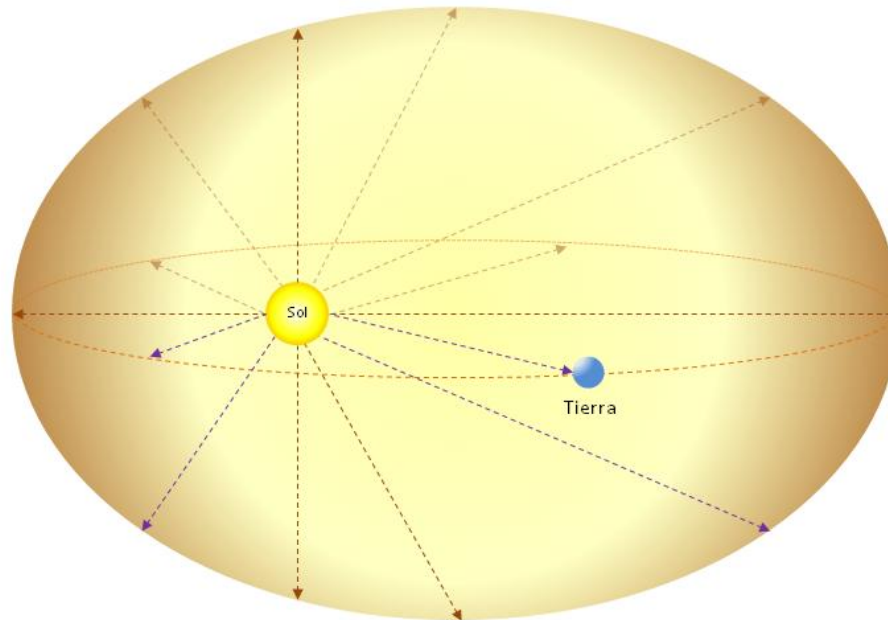
La órbita terrestre no es perfectamente circular y el Sol no se encuentra exactamente en el centro del óvalo formado por la Tierra en su tránsito alrededor del Sol.

*Por Biól. Nasif Nahle Sabag*

Figura 1: La esfera exterior posee una forma elíptica con el Sol colocado entre el primer tercio y el tercio central de la elipse.

La Tierra se encuentra en el perímetro de la esfera elíptica (elipsoide), con una inclinación de  $23^\circ$ , aproximadamente (Fig. 2).

## Esfera Exterior



La Esfera Exterior está determinada por la órbita terrestre y la irradiación solar en todas direcciones. El promedio del radio de la esfera exterior es de  $1.49587971 \times 10^{11} m$ . El Sol irradia la misma cantidad de potencia hacia todas direcciones y la Esfera Exterior recibe la misma cantidad de potencia solar en cada metro cuadrado de su superficie.

Por Biól. Nasif Nahle Sabag

Figura 2: La esfera exterior recibe una cantidad de potencia solar que se ve atenuada por la distancia debido a la ampliación angular de los rayos de fotones (que a partir de aquí les llamaré ondas cuánticas). Esta atenuación se ve amplificada por la dispersión de los rayos solares que separa en sus componentes individuales, es decir en ondas cuánticas paralelas desfasadas.

Nuestro planeta, por encontrarse en el perímetro de la esfera exterior, recibe la misma cantidad de potencia solar por metro cuadrado que la misma esfera, es decir,  $1368 W$ ; por esta razón, a la magnitud  $1368 W/m^2$  se le denomina constante solar.

La constante solar es el promedio de las cantidades de potencia recibida por cada metro cuadrado de superficie de la esfera exterior a lo largo de un año, poniendo énfasis en que durante el perihelio, cuando la Tierra está más cerca del Sol, la atenuación de la potencia debida a la distancia es mucho menor que durante el afelio, cuando la Tierra está más alejada del Sol (Fig. 4).

### *Cálculo de la Constante Solar:*

Para calcular la constante solar, debemos conocer los siguientes datos:

*Diámetro del Sol ( $\theta_{\odot}$ ) =  $1.391 \times 10^9 m$*

*Radio del Sol ( $R_{\odot}$ ) =  $6.955 \times 10^8 m$*

Área de Superficie Total del Sol ( $A_{\odot}$ ) =  $6.079 \times 10^{18} \text{ m}^2$

Diámetro de la Tierra ( $\theta_{\oplus}$ ) =  $1.27562 \times 10^7 \text{ m}$

Radio de la Tierra ( $r_{\oplus}$ ) =  $6.3781 \times 10^6 \text{ m}$

Área de Superficie Total Hemisférica de la Tierra ( $A_{\oplus \text{ hemis}}$ ) =  $3.834 \times 10^{14} \text{ m}^2$

Radio de la Esfera Exterior ( $d_{\text{OS}}$ ) =  $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$

Área de Superficie de la Esfera Exterior ( $A_{\text{OS}}$ ) =  $1.7975 \times 10^{23} \text{ m}^2$

Temperatura de la Superficie del Sol ( $T_{\odot}$ ) =  $5804.135 \text{ K}$

### *Primer procedimiento – Cálculo de la Potencia Bolométrica desde el Área Total de la Superficie Solar como una Esfera*

Bolométrica(o) significa *total en todas las bandas del espectro*.

Para calcular la potencia bolométrica desde el área total de la superficie solar como una esfera, recurrimos a la siguiente fórmula (Ecuación de Stefan-Boltzmann):

$$P_{\odot \text{ net}} = (\epsilon_{\odot}) (A) (\sigma) (T)^4 \quad (\text{Fórmula 1})$$

En donde  $P_{\odot \text{ net}}$  es para la potencia bolométrica neta emitida por el Sol desde toda su superficie ( $4\pi r^2$ ),  $\epsilon_{\odot}$  es la emisividad total del Sol (0.9875),  $A$  es el área total de la superficie solar,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $0.56697 \text{ (erg/s)/(m}^2 \text{ K}^4)$ ), y  $T$  es la temperatura de la superficie solar ( $5804.135 \text{ K}$ ).

El área total de la superficie del Sol es:

$$A_{\odot} = 4 * \pi * (R_{\odot})^2 = 4 * 3.141593 * (6.955 \times 10^8 \text{ m})^2 = 6.0786 \times 10^{18} \text{ m}^2. \quad (\text{Fórmula 2})$$

Conocidos estos valores, procedamos a introducir dichas magnitudes en la ecuación:

$$P_{\odot \text{ net}} = (0.9875) (6.0786 \times 10^{18} \text{ m}^2) (0.56697 \text{ ((erg/s)/(m}^2 \text{ K}^4)) (5804.135 \text{ K})^4 = 3.86235 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

Para conocer el Flujo de Potencia del Sol desde su superficie, dividimos la cantidad de potencia bolométrica entre el área total de la superficie solar:

$$f_{\odot} = (3.86235 \times 10^{33} \text{ erg/s}) / ((6.0786 \times 10^{18} \text{ m}^2) = 6.354 \times 10^{14} \text{ ((erg/s) / m}^2) \quad (\text{Fórmula 3})$$

$6.354 \times 10^{14} \text{ ((erg/s) / m}^2)$  es el flujo de potencia solar emitida desde cada metro cuadrado de la superficie solar, hacia todas direcciones.

### *Cálculo de la potencia solar neta recibida por la esfera exterior*

La potencia neta recibida por la esfera exterior, en toda su superficie, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{OS\ net} = f_{OS} * A_{OS}$$

(Fórmula 4)

En donde  $P_{OS\ net}$  es la potencia neta recibida por toda el área de superficie de la esfera exterior,  $f_{OS}$  es el flujo de potencia solar sobre cada metro cuadrado del área de superficie de la esfera exterior, y  $A_{OS}$  es el área total de la superficie de la esfera exterior formada por la proyección de la órbita de la Tierra.

Dado que no conocemos el valor de  $f_{OS}$ , procederemos a su cálculo mediante la siguiente fórmula:

$$f_{OS} = f_{\odot} * (R_{\odot} / d)^2$$

(Fórmula 5)

En donde  $f_{OS}$  es el flujo de potencia solar recibida por la esfera exterior,  $f_{\odot}$  es el flujo de potencia emitida por el Sol desde su superficie ( $6.354 \times 10^{14}$  ((erg/s) /  $m^2$ )),  $R_{\odot}$  es el radio solar en metros ( $6.955 \times 10^8$  m), y  $d$  es la distancia promedio a través de un año terrestre desde el Sol hasta la superficie de la esfera exterior ( $1.496 \times 10^{11}$  m).

*Introduciendo magnitudes:*

$$f_{OS} = ((6.354 \times 10^{14} \text{ (erg/s)/m}^2) * ((6.955 \times 10^8 \text{ m}) / (1.496 \times 10^{11} \text{ m}))^2 = 1.37334 \times 10^{10} \text{ (erg/s) / (m}^2)$$

$$1.37334 \times 10^{10} \text{ (erg/s) / (m}^2) = 1373.34 \text{ W / (m}^2)$$

Luego pues, la constante solar, o flujo de potencia solar sobre cada metro cuadrado de la esfera exterior es de  $1373.34 \text{ W / (m}^2)$ , cantidad que coincide con las mediciones de satélite.

Ya que conocemos la variable  $f_{OS}$ , procederemos a introducir magnitudes en la ecuación  $P_{OS\ net} = f_{OS} * A_{OS}$ :

$$P_{OS\ net} = 1.37334 \times 10^{10} \text{ (erg/s) / (m}^2) * 1.7975 \times 10^{23} \text{ m}^2 = 2.4689 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

Entonces,  $2.4689 \times 10^{33} \text{ erg/s}$  es la potencia solar neta que la esfera exterior recibe desde el Sol. Dicha cantidad en ergios/s equivalen a una potencia de  $2.4689 \times 10^{26}$  Watts.

$$f_{OS} = (2.4689 \times 10^{26} \text{ W}) / (1.7975 \times 10^{23} \text{ m}^2) = 1373.52 \text{ W/m}^2$$

$f_{OS}$  es pues, la constante solar en cualquier punto de la órbita terrestre dado que forma parte del perímetro de la esfera exterior. Dadas estas condiciones, la constante solar es la cantidad de potencia por metro cuadrado que la Tierra recibe en la capa más externa de su atmósfera.

Es importante señalar que la constante solar no es la cantidad de potencia recibida por la superficie de la Tierra, sino por la capa más externa de su atmósfera, la que está en contacto con el espacio sideral.

### *Cálculo de la Potencia Solar Recibida por la Capa Exterior de la Atmósfera Terrestre*

Para calcular la potencia solar neta recibida por la Tierra en la capa más externa de su atmósfera ( $P_{\oplus\ atm\ hemis}$ ), es decir, en la capa de la atmósfera en contacto con el espacio exterior del hemisferio de cara al Sol, empleamos dos procedimientos.

1. Para calcular la potencia solar neta desde el hemisferio solar de cara hacia la Tierra, usamos la siguiente ecuación:

$$P_{\odot hemis} = (\varepsilon_{\odot})(A_{\odot hemis})(\sigma)(T)^4 \quad (\text{Fórmula 6})$$

En donde  $P_{\odot hemis}$  es para la potencia emitida por el Sol desde su hemisferio de cara a la Tierra,  $\varepsilon_{\odot}$  es la emisividad total del Sol (0.9875),  $A_{hemis}$  es el área del hemisferio solar de cara a la Tierra ( $3 * \pi * r^2$ ),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $0.56697 \text{ (erg/s)/(m}^2 \text{ K}^4)$ ), y  $T$  es la temperatura de la superficie solar (5804.135 K).

*Del ejemplo anterior, introducimos magnitudes:*

$$\begin{aligned} P_{\odot Hemis} &= 0.9875 \times (3 * 3.141593 (6.955 \times 10^8 \text{ m})^2)(0.56697 \text{ (erg/s)/(m}^2 \text{ K}^4)) (5804.135 \text{ K})^4 = \\ &= 2.897 \times 10^{33} \text{ erg/s} \end{aligned}$$

2. Para calcular la potencia solar neta recibida por el hemisferio de la Tierra de cara al Sol sobre la capa más externa de su atmósfera, usamos la siguiente fórmula:

$$P_{\oplus atm hemis} = f_{OS} * (3 * \pi * (r_{\oplus})^2) \quad (\text{Fórmula 7})$$

El área de la superficie hemisférica de la capa más externa de la atmósfera enfrentando al Sol es  $3.834 \times 10^{14} \text{ m}^2$ . El flujo de potencia recibido por cada metro cuadrado de la superficie de la esfera exterior ( $f_{OS}$ ) es la constante solar, es decir,  $1.37334 \times 10^{10} \text{ (erg/s) / (m}^2)$ .

Introduciendo valores en la ecuación, obtenemos:

$$P_{\oplus atm hemis} = 1.37334 \times 10^{10} \left( \frac{\left( \frac{\text{erg}}{\text{s}} \right)}{\left( \text{m}^2 \right)} \right) * (3.834 \times 10^{14} \text{ m}^2) = 5.2654 \times 10^{24} \left( \frac{\text{erg}}{\text{s}} \right)$$

La potencia solar neta recibida por la capa más externa de la atmósfera terrestre, en el hemisferio diurno, es  $5.2654 \times 10^{24} \text{ erg/s}$

En este punto, debo recordarle al lector algo de suma importancia, a saber, la cantidad de potencia incidente sobre la capa más externa de la atmósfera terrestre no es la misma cantidad de potencia que penetra hasta la superficie de la Tierra.

La potencia solar que penetra la atmósfera hacia la superficie se ve atenuada por dos propiedades propias de la atmósfera, la reflexión y la absorción.

Otro procedimiento para calcular el flujo de potencia que incide sobre la capa más externa de la atmósfera terrestre es mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$I = \frac{[f_{\odot} * (4\pi * (R)^2)_{\odot}]}{(4\pi * (r)^2)_{OT}} \quad (\text{Fórmula 8})$$

En donde  $I$  es la intensidad de la potencia solar incidente sobre la capa más externa de la atmósfera terrestre,  $f_{\odot}$  es el flujo de potencia emitida por el Sol por cada metro cuadrado de su superficie ( $6.354 \times 10^{14} \text{ ((erg/s) / m}^2)$ ),  $(4\pi * (R)^2)_{\odot}$  es el área total de la esfera solar, y  $(4\pi * (r)^2)_{OT}$  es el área total de la esfera exterior en donde la Tierra orbita alrededor del Sol.

Introduciendo magnitudes en la ecuación, obtenemos el siguiente resultado:

$$I = \frac{\left[ 6.354 \times 10^{14} \left( \frac{\text{erg}}{\text{s}} \right) * (6.087 \times 10^{18} \text{ m}^2)_{\odot} \right]}{(2.79 \times 10^{23} \text{ m}^2)_{OS}} = 1.386 \times 10^{10} \left( \frac{\text{erg}}{\text{s}} \right) \left( \frac{1}{\text{m}^2} \right)$$

Este resultado coincide con el resultado obtenido anteriormente y también con las mediciones satelitales. Recuerde que la constante solar es un promedio anual del flujo de potencia solar recibida por cada metro cuadrado de la superficie de la esfera exterior, por lo cual varía dentro de ciertos límites.

Existe un procedimiento más para calcular la constante solar. Este es a través de la siguiente ecuación:

$$G_{PL} = Q_{SUN} / (4\pi (P_{OR})^2) \quad (\text{Fórmula 9})$$

En donde  $G_{PL}$  es la constante solar en lo alto de la atmósfera planetaria,  $Q_{SUN}$  es la cantidad total de potencia solar emitida desde su superficie ( $3.86235 \times 10^{26} \text{ W}$ ), y  $(4\pi (P_{OR})^2)$  es la superficie de la esfera exterior u orbital.

Introduciendo magnitudes obtenemos que la Constante Solar es:

$$G_{PL} = (3.86235 \times 10^{26} \text{ W}) / (2.812 \times 10^{23} \text{ m}^2) = 1376.56 \text{ W/m}^2$$

Como podemos ver, la potencia recibida por la Tierra, sobre la capa más externa de su atmósfera, puede obtenerse por procedimientos matemáticos variados.

Las diferencias entre los resultados de los diversos procedimientos es mínima y todos los resultados obtenidos concuerdan con las mediciones hechas por instrumentos montados en satélites; por ejemplo, radiómetros y pyrómetros.

Concluyendo esta sección, la Constante Solar es la cantidad de energía que la Esfera Exterior recibe desde el Sol por metro cuadrado de superficie.

Dicha cantidad de energía es exactamente la misma que recibe la Tierra en sus límites con el espacio exterior.

Cada segundo, la capa externa de la atmósfera terrestre recibe, aproximadamente, 1368 J de energía ( $1368 \text{ W} = 1368 \text{ J/s}$ ;  $1368 \text{ J/s} * 1 \text{ s} = 1368 \text{ J}$ ).

Esta cantidad de energía penetra en la atmósfera terrestre, en donde es atenuada por absorción, reflexión y dispersión difusa.

## *Sección II: Insolación*

Insolación es la cantidad de energía solar que incide sobre la superficie de la Tierra en un lugar determinado.

Como hemos visto en la sección anterior, la cantidad de energía que la Tierra recibe en lo alto de la atmósfera es atenuada por diversos mecanismos naturales. Luego pues, la cantidad de energía solar



incidente sobre la superficie de la Tierra es menor que la cantidad de energía incidente sobre la capa externa de la atmósfera.

En general, podemos decir que, durante un día claro, en una localidad situada perpendicularmente con respecto a la radiación solar, la cantidad de energía incidente sobre la superficie por cada metro cuadrado durante un segundo es de 1000 J/m<sup>2</sup>.

En este caso, empleo las unidades de Joule/metro cuadrado (J/m<sup>2</sup>) porque estoy refiriéndome a energía solar, no a potencia solar (Watt). Luego pues, 1000 J/m<sup>2</sup> es el flujo de la energía solar recibida sobre una área de superficie terrestre de un metro cuadrado, sobre tierra firme o sobre la superficie del océano, en un día claro y con un ángulo latitudinal de incidencia de 0°, es decir, perpendicular a la superficie.

La atenuación de la energía solar que entra en la atmósfera terrestre se realiza de la siguiente manera:

1. Aproximadamente, el 30% de la energía entrante es reflejada hacia el espacio exterior por las nubes, el polvo suspendido y los aerosoles. Esto causa una reducción de la Constante Solar igual a 410.4 Joules, quedando una energía entrante de solamente 957.6 Joules.
2. Aproximadamente, el 14% de la energía restante (957.6 Joules) es absorbida por el ozono en la estratósfera, el vapor de agua en la tropósfera, el polvo y los aerosoles (134.064 Joules). La cantidad restante que continúa su trayectoria hacia la superficie es de 823.536 Joules.
3. Aproximadamente, el 7% de la energía restante (823.536 Joules) es dispersada por difusión hacia el espacio exterior, quedando únicamente 765.9 Joules de energía solar, la cual es la energía incidente sobre la superficie de la Tierra.

Dado que dicha cantidad incide sobre un área de un metro cuadrado de superficie terrestre, el flujo de energía solar incidente sobre la superficie, o insolación, es de 766 J/m<sup>2</sup>, cada segundo.

Sin embargo, la Tierra no es un disco plano, sino una esfera y esta esfera solamente recibe radiación solar durante el día, es decir, sobre un hemisferio cada vez.

Adicionalmente, la esfericidad del planeta causa que los rayos de ondas cuánticas solares incidan oblicuamente sobre la superficie. La oblicuidad de incidencia de la radiación solar es determinada por la latitud de la localidad que se está estudiando, por la época del año solar (ángulo solar incidente) y la hora del día.

Debido a estos factores modificadores, nuestra fórmula para calcular el flujo de potencia solar incidente sobre la superficie debe incluir latitud, ángulo de incidencia de los rayos solares y hora del día.

La siguiente fórmula es usada para calcular la insolación en cualquier sitio del planeta:

$$I = S * (\text{Cos } Z) \quad (\text{Fórmula 10})$$

En donde I es la insolación a conocer, S es el flujo de potencia solar a nivel de la superficie terrestre (1000 W/m<sup>2</sup>), y Z es el valor del ángulo Zénith obtenido al considerar la latitud, el ángulo de incidencia solar y la hora del día.

Para calcular ángulo Z, usamos la siguiente fórmula:

$$Z = \cos^{-1}(\sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos H) \quad (\text{Fórmula 11})$$

En donde  $Z$  es el ángulo del zénith,  $\Phi$  es la latitud de la localidad estudiada,  $\delta$  es el ángulo de declinación solar (de acuerdo con el día del año solar), y  $H$  es el ángulo por la hora del día.

Para obtener  $H$  (ángulo por la hora del día) usamos la siguiente fórmula:

$$H = (\text{Hora local} - 12 \text{ hr}) * 15^\circ \quad (\text{Fórmula 12})$$

Por ejemplo, si la hora del día en tiempo local en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, es las 15 hrs, el ángulo proyectado por la hora del día es:

$$H = ((15 \text{ hr}) - 12 \text{ hr}) * 15^\circ = (3 \text{ hr}) * 15^\circ = 45^\circ$$

Para conocer el ángulo de declinación solar  $\delta$ , podemos hacer uso de la siguiente tabla:

Equinoccio de Verano, 21/22 de marzo	$\delta = 0^\circ$
Solsticio de Verano, 21/22 de junio	$\delta = +23.5^\circ$
Equinoccio de Otoño, 21/22 de septiembre	$\delta = 0$
Solsticio de Invierno, 21/22 de diciembre	$\delta = -23.5^\circ$

A partir de esta tabla, podemos calcular el ángulo de declinación solar para cualquier fecha específica en el calendario gregoriano. Para ello, hacemos uso de la siguiente fórmula:

$$\delta = -23.45^\circ * \cos \left[ \left( \frac{360^\circ}{365.25} \right) * (N + 10) \right] \quad (\text{Fórmula 13})$$

En donde  $\delta$  es el ángulo de declinación solar, y  $N$  es el número del día del año considerando 365.25 días del año.

Por ejemplo, si deseamos conocer el valor  $\delta$  para el día 23 de octubre, esta fecha es el día número 296 del año, por lo tanto:

$$\delta = -23.45^\circ * \cos \left[ \left( \frac{360^\circ}{365.25} \right) * (296 + 10) \right] = -23.45^\circ * 0.524 = -12.288^\circ$$

Para el 21 de diciembre que es el día número 355 del año, el ángulo de declinación solar  $\delta$  es:

$$\delta = -23.45^\circ * \cos \left[ \left( \frac{360^\circ}{365.25} \right) * (355 + 10) \right] = -23.45^\circ * 0.999991 = -23.4498^\circ$$

### *Cálculo de Insolación en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México a las 15:00 hr tiempo local del día 28 de abril de 2011:*

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, está situado a  $25^\circ 48'$  latitud Norte y  $100^\circ 19'$  longitud Oeste. Siendo las 15:00 hrs tiempo local del día 28 de abril de 2011, calcule la insolación dada bajo condiciones de día claro, sin contaminación atmosférica de importancia.

En primer lugar, calcularemos los valores  $H$  y  $\delta$  por medio de las ecuaciones 12 y 13, respectivamente. Luego, usaremos las fórmulas 10 y 11 para completar nuestro cálculo.

Introduciendo valores en la Fórmula 12:

$$H = ((15:00 \text{ hr}) - 12 \text{ hr}) * 15^\circ = 45^\circ$$

Introduciendo valores en la fórmula 13, sabiendo que el día 28 de abril es el día 118 del año:

$$\delta = -23.45^\circ * \cos \left[ \left( \frac{360^\circ}{365.25} \right) * (118 + 10) \right] = -23.45^\circ * -0.59 = 13.84^\circ$$

Procedamos con la fórmula 11:

$$Z = \cos^{-1}(\text{sen } \Phi \text{ sen } \delta + \text{cos } \Phi \text{ cos } \delta \text{ cos } H)$$

Datos conocidos:

$$\Phi (\text{latitud}) = 25^\circ 48' \text{ Norte} = 25.3^\circ \text{ Norte}$$

$$\text{Sen } \Phi (\text{latitud}) = 0.42736$$

$$\text{Cos } \Phi (\text{latitud}) = 0.9042$$

$$\delta = 13.84^\circ$$

$$\text{Sen } \delta = 0.239$$

$$\text{Cos } \delta = 0.971$$

$$H = 45^\circ$$

$$\text{Cos } H = 0.5253$$

Introduciendo valores en  $Z = \cos^{-1}(\text{sen } \Phi \text{ sen } \delta + \text{cos } \Phi \text{ cos } \delta \text{ cos } H)$ :

$$Z = \cos^{-1} ((0.42736 * 0.239) + (0.9042 * 0.971 * 0.5253)) = 0.9724^\circ$$

Ahora procedamos al cálculo de la Insolación en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, a las 15:00 hr, tiempo local, del día 28 de abril de 2011. Para ello, haremos uso de la fórmula 10:

$$I = S * (\text{Cos } Z)$$

Valores conocidos:

$$S = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$Z = 0.9724^\circ$$

Introduciendo valores conocidos en la fórmula:

$$I = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * (\text{Cos } (0.9724^\circ)) = 563.341 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

Concluyendo esta sección, hemos visto que la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, sea suelo sólido o superficie oceánica, es un valor cercano, menor o mayor, a  $1000 \text{ W/m}^2$ .

También hemos descubierto que la Constante Solar es igual en cada punto de la Esfera Exterior demarcada por la órbita terrestre y que la radiación solar incidente sobre la capa externa de la atmósfera no es  $249 \text{ W/m}^2$ , sino  $1368 \text{ W/m}^2$ .

La práctica de dividir la insolación entre cuatro para conocer el promedio de la insolación mundial es absolutamente incorrecto debido a que la insolación es local y no ocurre en todo el globo terráqueo al mismo tiempo, esto es, tenemos día y noche porque solamente un hemisferio está expuesto a la radiación solar.

### *Sección III: Número de Ondas Cuánticas (Fotones) en la Constante Solar*

A partir de los datos obtenidos en las secciones I, II y III, podemos conocer la cantidad de ondas cuánticas que forman parte de una corriente de ondas cuánticas, tanto de la constante solar en lo alto de la atmósfera terrestre (ionósfera) como de la insolación a nivel de la superficie de la Tierra.

*Cálculo de las ondas cuánticas incidentes sobre la ionósfera:*

Para calcular la cantidad de ondas cuánticas que inciden en la capa más exterior de la atmósfera, recurrimos a la siguiente fórmula:

$$f_{\odot OC} = \frac{(f_{\odot})}{\left(E_{OC} * 1.6 * 10^{-12} \left(\frac{\text{erg}}{\text{eV}}\right)\right)} \quad (\text{Fórmula 14})$$

En donde  $f_{\odot OC}$  es la cantidad de ondas cuánticas formando una corriente de ondas cuánticas,  $f_{\odot}$  es el flujo de potencia solar incidente sobre un área cualquiera ( en este caso, es la constante solar  $1.37454 \times 10^{10} \text{ (erg/s) / (m}^2\text{)}$ ,  $E_{OC}$  es la energía de una onda cuántica  $1.4 \text{ eV}$ , y  $1.6 \times 10^{-12} \text{ (erg/eV)}$  es el factor de conversión de eV a ergs.

Sustituyendo valores en la fórmula obtenemos la cantidad de ondas cuánticas:

$$f_{\odot OC} = \frac{\left(1.37334 \times 10^{10} \left(\frac{\text{erg}}{\text{m}^2 \text{ s}}\right)\right)}{\left(1.4 \text{ eV} * 1.6 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{erg}}{\text{eV}}\right)\right)} = 6.13 \times 10^{21} \left(\frac{OC}{\text{m}^2 \text{ s}}\right)$$

Si usted así lo prefiere, puede decir que  $6.13 \times 10^{21}$  fotones inciden sobre un metro cuadrado de la ionósfera terrestre durante cada segundo.

*Cálculo de las ondas cuánticas incidentes sobre la superficie terrestre (suelo y océanos):*

En este caso empleamos la misma fórmula, pero introducimos el valor de la insolación en lugar de la constante solar. Recuerde que la insolación es la cantidad de energía incidente sobre la superficie de la Tierra en una localidad determinada (en este caso, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México), en tanto que la constante solar es la cantidad de energía incidente sobre la capa más externa de la atmósfera terrestre (la ionósfera), antes de que dicha energía penetre en la atmósfera.

De acuerdo con los cálculos de insolación realizados en la Sección II, el número de ondas cuánticas incidentes sobre cada metro cuadrado de terreno durante un segundo es el siguiente:

$$f_{\odot qw} = \frac{\left( 5.63341 \times 10^9 \left( \frac{\text{erg}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right) \right)}{\left( 1.4 \text{ eV} * 1.6 \times 10^{-12} \left( \frac{\text{erg}}{\text{eV}} \right) \right)} = 2.515 \times 10^{21} \left( \frac{\text{OC}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right)$$

Al igual que en el ejemplo anterior, usted puede referirse a las ondas cuánticas (OC) como *fotones*; por lo tanto, usted puede decir que el número de fotones incidentes sobre el suelo, en la localidad de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, el día 28 de abril de 2011, a las 15 hrs, tiempo local, fue de  $2.515 \times 10^{21}$  fotones por metro cuadrado de suelo durante cada segundo.

Concluyendo esta sección, queda demostrado que la atenuación de la energía solar incidente sobre la superficie terrestre no es debida a una disminución de la energía contenida por los fotones, sino por una disminución en el número de los fotones incidentes sobre la superficie.

La atenuación realizada por la atmósfera, pues, se debe a la absorción, reflexión y dispersión por disipación de las ondas cuánticas, no únicamente de la energía contenida en cada onda cuántica.

### *Bibliografía y Sitios en la Red Consultados:*

[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce\\_05.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce_05.php)

[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce\\_02.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce_02.php)

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>

<http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>

<http://edmall.gsfc.nasa.gov/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>

[http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/SolarCells/res00026/CH2\\_Solar\\_radiation.pdf](http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/SolarCells/res00026/CH2_Solar_radiation.pdf)

Curtis, Helen. *Biology*. Worth Publishers, Inc. 1983, New York, New York.

Lang, Kenneth. 2006. *Astrophysical Formulae*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Vol. 1. Sections 1.11 and 1.12.

Maoz, Dan. *Astrophysics*. 2007. Princeton University Press. Princeton, New Jersey.

Odum, Eugene P. and Barrel, Gary W. *Fundamentos de Ecología-Quinta Edición*. 2006. International Thompson Editores, S. A. de C. V. México, Distrito Federal.

Sutton, David B., Harmon, N. Paul. *Ecology: Selected Concepts*. 2000. John Wiley & Sons, Inc. New York.