

CONCEPTOS BASICOS DE RADIACION SOLAR.

La tierra recibe anualmente $1,5 \times 10^{18}$ Kwh. de energía solar lo que corresponde a 10.000 veces el consumo mundial de energía en ese período. Este hecho indica que además de ser responsable por la manutención de vida en la tierra, la radiación solar constituye una inagotable fuente energética, existiendo un enorme potencial de utilización por medio de sistemas de captación y conversión en otra forma de energía (térmica, eléctrica, etc.).

Nuestro planeta en su movimiento anual en torno al sol, describe en trayectoria elíptica un plano que esta inclinado aproximadamente $23,5^\circ$ con relación al plano ecuatorial. Esta inclinación es responsable por la variación de la elevación del sol en el horizonte con relación a la misma hora, a lo largo de los días, dando origen a las estaciones del año y dificultando los cálculos de la posición del sol para una determinada fecha.

1 EL SOL.

Como energía renovable se tiene la energía solar derivado del astro rey que regula nuestra vida. El sol es una estrella enana de aproximadamente 1.392.000 Kilómetros de diámetro (casi 100 veces el de la Tierra y 10 veces el del Júpiter), que se formó a partir de una nube de gas compuesta principalmente de hidrógeno.

Su centro es extremadamente caliente, con temperaturas suficientemente elevadas para permitir la fusión del hidrogeno en helio. Esta fusión que se produce en el centro solar emite energía en forma de una radiación electromagnética de alta frecuencia que se transmite lentamente a la superficie mediante una sucesión de procesos radiactivos.

La radiación que finalmente llega a la tierra proviene de una estrecha región de la superficie solar bastante opaca a la luz visible, llamada fotosfera. La producción de energía del sol requiere la combustión o conversión de masa en energía al ritmo de 4.2×10^6 toneladas por segundo. Considerando que la masa total del sol es de 22×10^{26} toneladas, se puede calcular fácilmente que el astro continuara irradiando energía durante dos billones de años más.

La Tierra, que se encuentra a 150 millones de Km. de distancia del sol intercepta solo una parte de la radiación producida por este. La cantidad de energía que llega a la superficie de la tierra en un año es hasta de 50 veces mayor que las estimaciones actuales de toda la energía disponible (proveniente) de las reservas conocidas de combustibles fósiles y 35.000 veces mayor que el consumo mundial de energía por año.

1.1 Composición y Estructura: La energía solar se crea en el interior del Sol. Es aquí donde la temperatura ($15.000.000^\circ\text{C}$) y la presión (340 mil veces la presión del aire en la Tierra al nivel del mar) son tan intensas que se llevan a cabo las reacciones nucleares. Estas reacciones causan que cuatro átomos de hidrógeno se fusionen y formen una partícula alfa ó núcleo de helio. La partícula alfa tiene cerca de 0.7 % menos masa que los cuatro protones.

La diferencia en la masa es expulsada como energía y es llevada a la superficie del Sol, a través de un proceso conocido como convección, donde se liberan luz y calor. La energía generada en el centro del Sol tarda un millón de años para alcanzar la superficie solar. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso el sol libera grandes cantidades de energía; por lo cual, el Sol cada vez se vuelve más ligero.

2 RADIACIÓN.

La radiación es transferencia de energía por **ondas electromagnéticas**, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. La radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión :

$$\lambda \nu = c \quad (1)$$

son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad $c = 299.792$ Km./s.

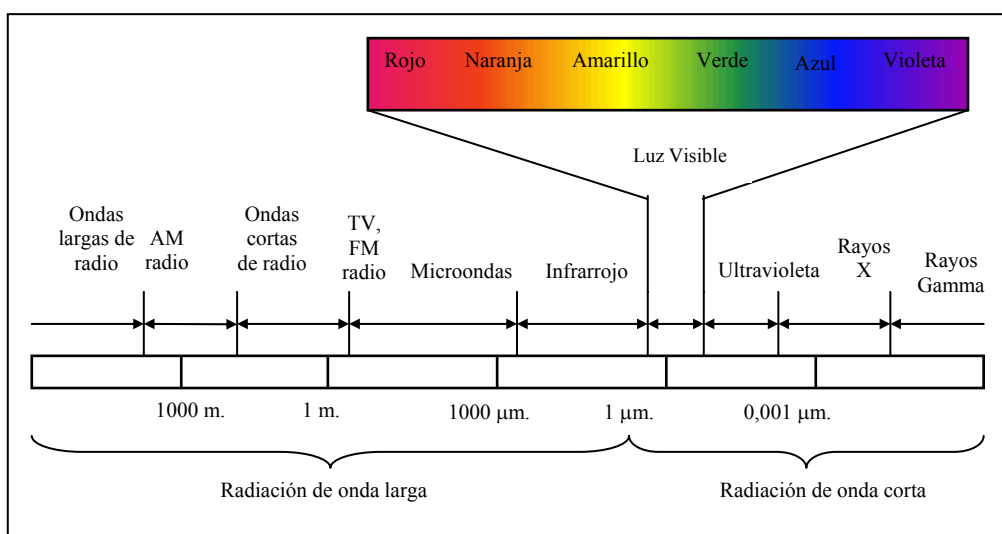
3 ESPECTRO DE RADIACIÓN.

La radiación electromagnética, puede definirse como un conjunto de ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. Las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la rapidez de la luz c , transportando energía y cantidad de movimiento desde alguna fuente a un receptor. Existen muchas formas de ondas electromagnéticas que se distinguen por sus frecuencias y longitudes de onda, que varían en un amplio rango, como se muestra en la figura 1, definiendo el espectro electromagnético. Esta variación se produce porque las fuentes que producen las ondas son completamente diferentes. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior. La **luz**, llamada también **luz visible** o **luz blanca**, es uno de los componentes del espectro electromagnético, y se define como aquella parte del espectro de radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas) hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Por orden creciente de longitudes de onda (o decreciente de frecuencias), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.

Los rayos gamma y los rayos X duros tienen una longitud de onda de entre $5 \cdot 10^{-6}$ y $5 \cdot 10^{-4}$ micrómetros (un micrómetro, símbolo μm , es una millonésima de metro). Los rayos X blandos se superponen con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los $5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$. La región ultravioleta, a su vez, da paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 0.4 hasta 0.8 μm .

Figura 1. Espectro *electromagnético*.



Fuente: *Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile .*

La radiación del Sol es emitida en todas las longitudes de onda, pero tiene un máximo en la región de luz visible. La luz visible está compuesta por varios colores, que cuando se mezclan forman la luz blanca, por lo que también se le da ese nombre. Cada uno de los colores tiene una longitud de onda específica, con límites entre 0.43 y 0.69 μm . Considerando desde las longitudes de onda más cortas a las más largas, los diferentes colores tienen los valores centrales de longitudes de onda que se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Colores del espectro visible y sus extremos.

Color	(λ) μm
Ultravioleta	< 0.35
Violeta	0.4
Azul	0.45
Verde	0.5
Amarillo	0.55
Naranja	0.6
Rojo	0.7
Infrarrojo	> 0.75

Fuente: *Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile.*

Estos colores están dentro de un rango de longitudes de onda, por ejemplo el violeta esta en el rango entre 0.4 y 0.45 μm . Son los colores que forman el arco iris. En sus extremos se tienen el ultravioleta y el infrarrojo. La mayor cantidad de energía radiante del Sol se concentra en el rango de longitudes de onda del visible y visible cercano del espectro.

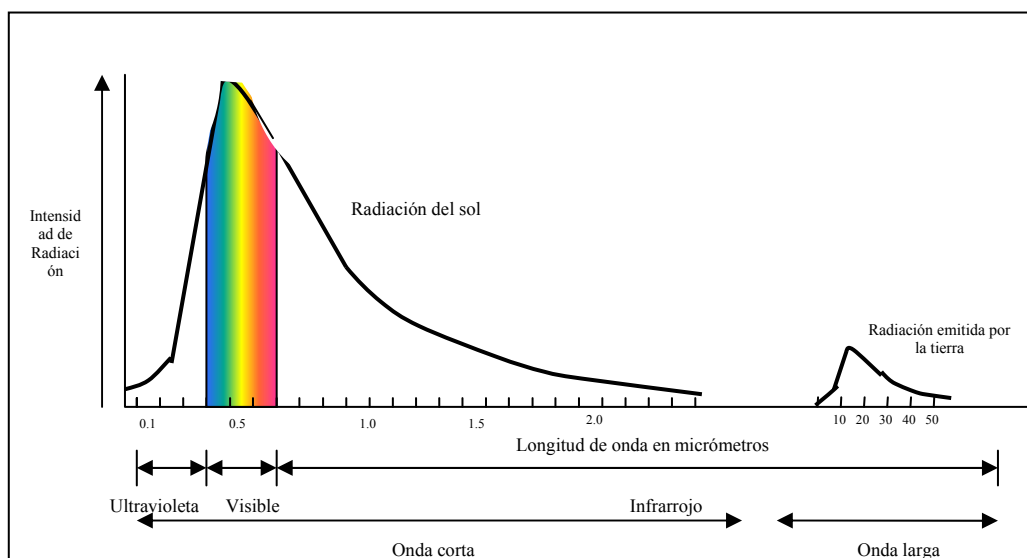
4 LEYES DE RADIACIÓN.

Para entender mejor como la energía radiante del Sol interactúa con la Atmósfera de la Tierra y su superficie, se deben conocer las leyes básicas de radiación.

1. Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, por ejemplo el Sol, la Tierra, la atmósfera, los Polos, las personas, etc.
2. Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Por ejemplo el Sol con una temperatura media de 6000 K en su superficie, emite $1.6 \cdot 10^5 = (6000/300)^4$ veces más energía que la Tierra con una temperatura media en superficie de 290 K = 17° C .
3. Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas más cortas. Por ejemplo el máximo de energía radiante del Sol se produce para longitudes de onda $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$, para la Tierra en $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$. (Figura 3)
4. Los objetos que son buenos absorbedores de radiación son también buenos emisores. Este es un principio importante para comprender el calentamiento en la atmósfera, porque sus gases son absorbedores y emisores selectivos en longitud de onda. Así, la atmósfera es aproximadamente transparente (no absorbe) a ciertas longitudes de onda de radiación y aproximadamente opaca (buen absorbedor) en otras longitudes de onda. Por ejemplo es transparente a la luz visible, que llega a la superficie. La nieve es también absorbedor selectivo: es mal absorbedor de la luz visible ya que refleja ~90% y es buen absorbedor (y emisor) de la radiación infrarroja de longitud de onda larga.

Un absorbedor perfecto se llama “**cuerpo negro**”, que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie. No se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente.

Figura 2. Esquema de la cantidad de radiación solar y terrestre.



Fuente: Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile

El Sol, la Tierra, la nieve, etc., bajo ciertas condiciones se comportan como un cuerpo negro. En teoría, un cuerpo negro sería también un emisor perfecto de radiación, y emitiría a cualquier temperatura la máxima cantidad de energía disponible. A una temperatura dada, emitiría una cantidad definida de energía en cada longitud de onda. A raíz del fracaso de los intentos de calcular la radiación de un cuerpo negro ideal según la física, se desarrollaron por primera vez los conceptos de física cuántica.

5 RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE.

5.1 Constante Solar: La constante solar (G_{sc}), es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. Esta energía corresponde a una radiación electromagnética formada por distintas longitudes de onda (espectro solar) agrupadas en tres bandas: ultravioleta (UV), visible e infrarrojo (IR). Cada banda transporta una cantidad de energía determinada, siendo a este respecto las más importantes el visible y el IR.

La referencia radiométrica mundial WRR (WRR: World Radiometric Reference) del WRC (World Radiarion Center) es :

$$G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2} = 433.3 \frac{Btu}{(ft^2 * h)} = 1.96 \frac{Cal}{(cm^2 * min)} \quad (2)$$

Con una desviación estándar de 1.6 W/m^2 y una desviación máxima de $\pm 7 \text{ W/m}^2$.

5.2 Variación de la Radiación Solar Extraterrestre: Debido a que la intensidad de la radiación solar varía de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia tierra-sol durante el año, da lugar a una variación de la radiación solar extraterrestre $G(n)$:

$$G(n) = G_{sc} * \left[1 + 0.333 * \cos\left(360 * \frac{n}{365}\right) \right] \quad (3)$$

En donde n es el número del día ($1 < n < 365$). Esta función tiene una variación de 3.3 %, con el máximo de 1412 W/m^2 el 1 de enero y el mínimo de 1322 W/m^2 el 1 de julio.

La Tierra, en su movimiento alrededor del Sol, describe una órbita elíptica, de escasa excentricidad, de forma que la distancia entre el Sol y la Tierra varía aproximadamente un $\pm 3\%$.

- La distancia media Tierra-Sol es, $d = 149$ millones de Km.
- En el solsticio de verano, la Tierra está alejada una distancia del Sol máxima, $d_{\text{máx}} = 1,017 \text{ d}$
- En el solsticio de invierno, la Tierra se halla a la distancia mínima del Sol, $d_{\text{min}} = 0,983 \text{ d}$.

La radiación al atravesar la atmósfera, es parcialmente absorbida y difundida por ciertos componentes de la misma; en las últimas décadas, al disponer de satélites artificiales, se han podido realizar mediciones directas de la intensidad solar, libres de la influencia de la atmósfera terrestre.

El espectro se suele dividir en las tres regiones siguientes:

1. La región llamada **visible** ($0.35 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro del cual están los colores violeta ($0.4 \mu\text{m}$), azul ($0.45 \mu\text{m}$), verde ($0.5 \mu\text{m}$), amarillo ($0.55 \mu\text{m}$), anaranjado ($0.6 \mu\text{m}$) y rojo ($0.70 \mu\text{m}$).
2. La región invisible más allá del rojo ($\lambda > 0.75 \mu\text{m}$), conocida como **infrarrojo lejano** o región de las ondas de calor.
3. La región invisible antes del violeta ($\lambda < 0.35 \mu\text{m}$), denominada **ultravioleta**.

De acuerdo con lo anterior, a cada región corresponde una fracción de la constante solar, distribuida así: 7 % al ultravioleta (95.7 W/m^2), 47.3 % al visible (646.6 W/m^2) y 45.7 % al infrarrojo (624.7 W/m^2).

6 RADIACION SOLAR TERRESTRE.

La energía solar es afectada por la atmósfera terrestre tanto es su dirección como en su intensidad. La radiación solar que llega al sistema tierra-atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación de onda corta, por los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar.

La atmósfera en su mayoría es transparente a la radiación solar entrante. Considerando, que al tope de la atmósfera llega un **100 %** de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie (esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre). Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de este valor, la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %.

Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación.

6.1 Concepto De Masa Atmosférica: La radiación procedente del Sol que llega a la superficie terrestre tiene que atravesar la capa atmosférica que envuelve la Tierra, cuyo espesor aproximado es de unos 9 Km. en condiciones normales, contados desde el nivel del mar hasta el nivel más alto de la vertical de la misma. Dicha radiación es difundida y absorbida, cuando no reflejada, por las moléculas gaseosas en suspensión dentro de la atmósfera, tanto más, cuanto mayor sea el número de partículas en suspensión.

No obstante hay una cierta cantidad de radiación solar que no ha encontrado obstáculo y ésta es la **radiación directa** que llega del Sol, es decir, la radiación solar recibida desde el Sol sin cambio de dirección. La **radiación difusa** se define como la radiación solar recibida desde el Sol después de que la reflexión y la difusión por la atmósfera hayan modificado su dirección. El camino óptico recorrido por la radiación solar es diferente según sea la altura cenital del Sol y ello conduce a la introducción del concepto de masa de aire m , o **masa atmosférica** atravesada por la radiación.

Se considera el paso vertical a través de la atmósfera a nivel del mar como $m = 1$, es decir, Sol en la vertical del lugar y como la presión media a nivel del mar es de 760 mm de mercurio, el valor de la masa de aire atmosférico vale, siendo P la presión atmosférica del lugar:

$$m = OA = \frac{P}{760} \quad (4)$$

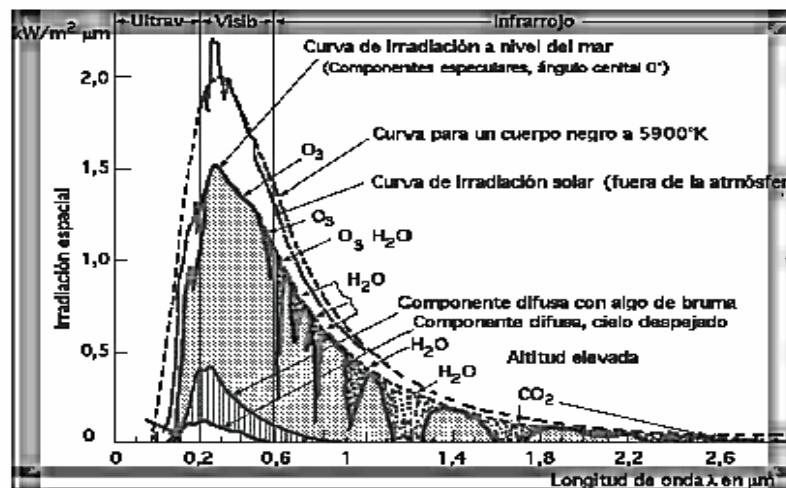
para una dirección de la radiación solar directa que forme un ángulo φ con la horizontal, el camino (OM) recorrido por la misma en función de la presión atmosférica p es:

$$OM = \frac{OA}{\text{Sen } \varphi} = \frac{P}{760 * \text{Sen } \varphi} \quad (5)$$

6.2 Atenuación de la Radiación Directa: La radiación incidente normal recibida del Sol, sobre la superficie terrestre, está sujeta a variaciones debidas fundamentalmente a:

- a) Variaciones de la distancia Tierra-Sol.
- b) Variaciones de la difusión, debidas a las moléculas de aire, vapor de agua y polvo.
- c) Variaciones en la absorción atmosférica por el O_3 , H_2O y el CO_2

Figura 3. Distribución espectral de la radiación solar



Fuente: Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile

La radiación solar normal incidente en la atmósfera terrestre tiene la distribución espectral indicada en la Figura 3. Los rayos X y otras radiaciones de onda corta del espectro solar, son absorbidos en gran proporción en la ionosfera por el N_2 , O_2 y otros componentes atmosféricos. La mayor parte del ultravioleta queda absorbido por el O_3 . Para longitudes de onda superiores a 2,5 mm se produce la radiación terrestre y una fuerte absorción por el CO_2 y el H_2O de la atmósfera, por lo que al suelo llega muy poca energía. En consecuencia, y desde el punto de vista de las aplicaciones terrestres de la energía solar, solamente interesan las radiaciones comprendidas en las longitudes de onda de 0,29 mm hasta 2,5 mm, que son las que a su paso a través de la atmósfera van a sufrir las variaciones debidas a la difusión y a la absorción.

6.3 Dispersión: La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. Esto explica como un área con sombra o pieza sin luz solar esté iluminada, le llega luz difusa o radiación difusa. El 26 % de radiación difusa desde la atmósfera llega a la tierra.

Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente en las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que en longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Cuando amanece o anochece, la radiación solar recorre un mayor espesor de atmósfera y la luz azul y violeta es dispersada hacia el espacio exterior, pasando

mayor cantidad de luz roja y naranja hacia la Tierra, lo que da el color del cielo a esas horas.

Las partículas más grandes asociadas con niebla, smog o bruma también dispersan luz en longitudes de onda tal que el cielo se ve del blanco al gris. La dispersión de la luz solar por gotas de agua, bruma o partículas de polvo hacen posible observar bandas de luz solar llamadas **rayos crepusculares**, que se ven por ejemplo cuando la luz solar cruza los claros entre las nubes.

6.4 Reflexión: Aproximadamente el 30 % de la energía solar que llega al tope de la atmósfera es reflejada al espacio, un 20% reflejado por las nubes, 6% desde la atmósfera y un 4% desde la superficie de la tierra. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera. La fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie, se llama **albedo**, por lo tanto el albedo planetario es en promedio de un 30 %.

El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. Las nubes contribuyen con un alto porcentaje de albedo (~ 20 %).

La Luna tiene sólo un 7 % de albedo, porque no tiene atmósfera y en las noches de luna llena da un buen brillo, pero la Tierra brilla aún más sobre la noche lunar, por lo que en la Luna las noches de tierra llena son mas claras que en la Tierra las noches de luna llena. En la tabla 2 se da el albedo de algunas superficies comunes.

Tabla 2. Valores típicos del albedo.

SUPERFICIE	ALBEDO %
Nieve fresca	80-85
Arena	20-30
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo Seco	15-25
Agua (sol cerca del horizonte)	50-80
Agua (sol cerca del cenit)	3-5
Nube gruesa	70-80
Nube Delgada	25-30
Tierra y atmósfera global.	30

Fuente: Radiación Solar y Terrestre. Juan Inzunza. Meteorología Descriptiva. Chile

6.5 Difusión: Las moléculas de aire son muy pequeñas, en comparación con las longitudes de onda de la radiación más significativas en el espectro de la energía solar. La difusión de ésta radiación por las moléculas del aire se puede estudiar por la teoría de Rayleigh, según la cual, el coeficiente de difusión varía aproximadamente como la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación λ^{-4} ; esto se ha verificado experimentalmente y a partir de los datos obtenidos se ha propuesto como factor de transmisión monocromática asociado a la difusión atmosférica, el dado por la expresión:

$$F_{\lambda (moléculas \text{ .aire})} = 10^{-0.00389 * \lambda^{-4}} \quad (6)$$

en la que λ viene dada en micras, $m = 1$, y la presión atmosférica es 760 mm de mercurio. La difusión por partículas de polvo, que por supuesto tienen un tamaño

mucho mayor que las moléculas que componen el aire y que además varían de tamaño y concentración según el lugar, la altura y el momento, es mucho más difícil de determinar. Moon desarrolló un factor de transmisión similar al utilizado para las moléculas de aire, de la forma:

$$F_{\lambda (polvo)} = 10^{-0.0353 * \lambda^{-0.75}} \quad (7)$$

en la que $m = 1$, siendo el término medio de la concentración de las partículas de polvo de 800 por cm^3 a nivel del suelo. La difusión debida al vapor de agua contenido en la atmósfera, con el Sol en su cenit y con una presión de saturación (presión parcial promediada del vapor de agua en la atmósfera) de 26 mbars, se representa en la forma:

$$F_{\lambda (vapor\ de\ agua)} = 10^{-0.0075 * \lambda^{-2}} \quad (8)$$

por lo que el efecto total de la difusión sobre la radiación se puede expresar aproximadamente por:

$$F_{total} = \left[F_{\lambda (moléculas\ aire)} * \frac{P}{760} * F_{\lambda (polvo)} * \frac{r}{800} * F_{\lambda (vapor\ de\ agua)} \frac{W}{26} \right] * m \quad (9)$$

siendo:

- F_{total} es la transmitancia atmosférica monocromática para la radiación directa
- p es la presión total de la atmósfera en mm de mercurio
- r es la concentración de partículas de polvo, a nivel del suelo, (partículas por cm^3)
- W es la cantidad de agua precipitable en la atmósfera, por encima del lugar de observación, en mm de Hg.
- m es la masa de aire.

La difusión molecular, en la práctica, sólo es función de la presión atmosférica a nivel del suelo y de la posición del Sol, valores que se pueden medir y calcular, midiéndose el coeficiente de turbidez con un pirheliómetro.

6.6 Absorción: Los gases de la atmósfera son absorbedores selectivos de radiación solar, es decir que absorben gran cantidad para algunas longitudes de onda, moderadas en otras y muy poca en otras. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura. Los gases que son buenos absorbedores de radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera.

La absorción de la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre es debida fundamentalmente al ozono en el ultravioleta, $\lambda < 0,3$ mm, y un poco por, $0,5 < \lambda < 0,6$ mm, y al vapor de agua confinado en las capas bajas de la atmósfera en la banda del infrarrojo, $\lambda > 0,7$ mm; más allá de 2,3 mm la transmisión a través de la atmósfera es muy baja, debido a la absorción por el H_2O y CO_2 , por lo que en el espectro de energía solar extraterrestre, la energía es inferior al 5% de la total del espectro solar, siendo pequeña la energía recibida a nivel del suelo.

Las transmitancias por absorción se deben combinar de la misma manera que por difusión y la transmitancia monocromática resultante para la radiación directa se puede escribir como:

$$F_{\lambda} = F_{\lambda(s)} * F_{\lambda(abs)} = F_{\lambda(s)} * F_{\lambda(abs.\ ozono)} * F_{\lambda(abs.\ vapor\ de\ agua)} \quad (10)$$

donde uno de los factores de absorción, bien el del ozono o el del vapor de agua, es la unidad, puesto que las bandas de absorción correspondientes al O_3 y H_2O no se relacionan entre sí.

Un modelo presentado por Unsworth y Monteith (1998) que se ha examinado y comprobado en diferentes lugares de Inglaterra y del Sudán, contempla un **coeficiente de turbidez** s mediante el cual se pueden relacionar la irradiancia solar normal directa I_{s0} con la irradiancia normal directa en el aire limpio I_0 (o flujo solar entrante en la atmósfera), mediante la ecuación:

$$I_{s0} = I_0 * e^{-\sigma s} \quad (11)$$

siendo I_0 la irradiancia normal de la radiación solar para una atmósfera limpia que contiene CO_2 , O_3 y H_2O , como elementos que absorben y emiten radiación.

La relación $\frac{I_{s0}}{I_0}$ representa la fracción de la potencia transmitida. La fracción extinguida

α_s que es absorbida por la atmósfera es, $\alpha_s = \frac{I_0 - I_{s0}}{I_0}$.

7 RADIACIÓN SOLAR SALIENTE.

La energía solar directa no es un efectivo calentador de la atmósfera, sino que, como veremos ahora, ésta es calentada por contraradiación desde la Tierra, generando la dinámica de la máquina del tiempo. Como ya se dijo, aproximadamente el 51% de la energía solar que alcanza el tope de la atmósfera, llega a la superficie de la Tierra directa o indirectamente y es absorbida en el suelo. La mayor parte de esta energía es reirradiada hacia el cielo.

Pero como la Tierra tiene una temperatura mucho menor que la del Sol, la radiación terrestre es emitida en longitudes de onda mucho más larga que la radiación solar de onda corta. La radiación terrestre se emite en longitudes de onda comprendida entre 1 y 30 μm , dentro del rango infrarrojo del espectro, con un máximo en 10 μm , por esta razón se llama también radiación de onda larga o radiación infrarroja.

Algunos gases de la atmósfera pueden absorber parte de la radiación que la Tierra emite al espacio, evitando que esta se pierda hacia el espacio exterior. Por ejemplo el vapor de agua y el dióxido de carbono son importantes absorbedores de radiación en el infrarrojo.

El vapor de agua absorbe aproximadamente cinco veces más radiación terrestre que todos los otros gases combinados, contribuyendo a elevar la temperatura de la baja troposfera, lugar donde se desarrolla la vida. Es de notar que entre 8 y 11 μm la atmósfera absorbe muy poca radiación de onda larga, como también el vapor de agua y el CO_2 . Esta región se llama "ventana atmosférica" debido a que en esa longitud de onda la atmósfera no absorbe radiación, la que se escapa al espacio exterior. Entonces, la atmósfera es transparente a la radiación de onda corta del Sol, pero absorbe la radiación terrestre de onda larga; por lo tanto la atmósfera no es calentada por la radiación solar, sino que se calienta desde el suelo hacia arriba.

2.8 BALANCE DE CALOR.

La Tierra tiene una temperatura media constante en el tiempo, por lo que existe un balance entre la cantidad de radiación solar entrante y la radiación terrestre saliente, si no se calentaría o enfriaría continuamente. Por otra parte algunas regiones del planeta reciben mas radiación solar que otras, pero la radiación terrestre saliente es aproximadamente la misma en cualquier lugar del planeta. Por lo tanto debe existir un balance de calor, que se produce en dos formas:

1. Balance de energía total tierra/atmósfera. La cantidad de energía que llega a la superficie de la Tierra desde el Sol y desde la atmósfera, tiene que ser igual a la cantidad de energía que se refleja desde la superficie mas la que emite la Tierra al espacio.
2. Balance de energía entre diferentes zonas del planeta. En promedio la zona latitudinal entre 35°N y 35°S reciben más energía que la que pierden y lo contrario ocurre en zonas polares. Es conocido que las zonas centradas en el ecuador son las regiones más cálidas del planeta, lo contrario se produce en altas latitudes, donde se pierde más calor por emisión de radiación de onda larga que la recibida en onda corta del Sol. Pero estas zonas no se calientan ni enfrían continuamente, por lo que existe un transporte de calor desde las regiones con exceso a las regiones con déficit de calor. Es un transporte desde el ecuador hacia los polos y viceversa, que lo realizan la atmósfera y los océanos a través de los vientos y las corrientes en tres formas:
 - a) Se consume calor sensible en la evaporación en los trópicos, el vapor de agua es transportado hacia los polos por los vientos y liberado como calor latente cuando se produce la condensación del vapor para formar las nubes.
 - b) Calor transportado por las corrientes oceánicas cálidas hacia los polos (por ejemplo corriente de Brasil) y transporte de frío desde altas latitudes hacia zonas ecuatoriales por las corrientes frías .
 - c) La circulación general de la atmósfera participa en el balance de calor con los grandes sistemas de vientos, huracanes y ciclones que transportan calor desde zonas tropicales hacia los polos y frío desde zonas polares hacia el ecuador.