



Radiación y Atmósfera

José M^a De Juana Sardón

El Sol es nuestra fuente primaria de energía, de forma directa o indirecta toda la energía que consumimos tiene su origen en él. Su forma esférica tiene un radio aproximado de 6,96 millones de kilómetros y nuestra distancia media a él es de 150 millones de kilómetros. La energía se produce mediante un continuo proceso de fusión, en el cual se unen 4 núcleos de hidrógeno para producir uno de helio y el defecto de masa aparece en forma de energía. Este proceso tiene lugar en el interior del Sol a una temperatura de unos 150 millones de grados.

La energía es emitida en forma de radiación electromagnética y nos llega con una intensidad prácticamente constante al exterior de nuestra atmósfera, intensidad que se denomina Constante Solar H, que es la energía que llega en la unidad de tiempo a la unidad de superficie colocada fuera de la atmósfera, perpendicularmente a la dirección de llegada. La NASA ha tomado para la Constante Solar el valor estándar

$$H = 1353 \pm 1,5\% \text{ W/m}^2$$

Su obtención se ha realizado mediante nueve largas series de medidas desde globos, aviones X-15 y sonda Mariner, durante el periodo 1967-

1970 y con diferentes instrumentos de medida. Este valor estándar ha sido adoptado por la ASTM (American Society of Testing and Materials), por la ANSI (American National Standard Institute) y por la ISO (International Standard Organization). En general, la energía recibida en la unidad de superficie por unidad de tiempo, se denomina irradiancia.

La energía solar nos llega transportada por ondas electromagnéticas de diferente longitud de onda, prácticamente todas ellas en el intervalo de 0,2 a 2,6 micras*, y la cantidad de energía que nos llega al exterior de la atmósfera en cada longitud de onda, constituye el espectro de la radiación extraterrestre. También las mismas organizaciones han adoptado el espectro de radiación solar extraterrestre que se representa en la figura 1, en línea continua. A este espectro se ajusta la distribución espectral de la energía emitida por un cuerpo negro a la temperatura de 5762 K, normalizada para el valor de la constante solar, lo que ha sido representado en la misma figura por la línea de punto y raya. Ello nos indica que la temperatura de la superficie del Sol es del orden de 5762 K.

* 1 metro = 10⁶ micras (μm)

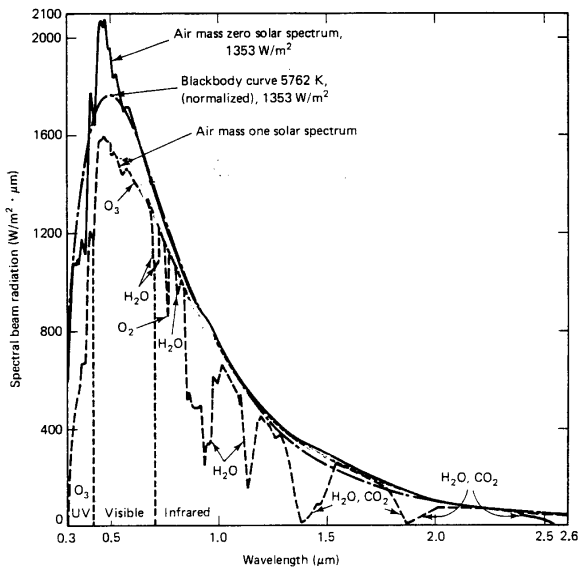


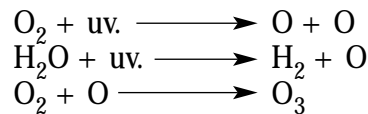
Figura 1. Espectro solar fuera de la atmósfera y a nivel de suelo. *Solar Energy Engineering*. M. Sayigh. Academic Press, Inc. 1977.

La atmósfera terrestre está formada por diferentes capas, que deben ser atravesadas por la radiación solar hasta llegar a la superficie del suelo o del mar, y en su camino la radiación es absorbida por los distintos componentes de la atmósfera, de diferente manera según su longitud de onda, quedando modificada la distribución espectral. En la figura 1 se ha representado en línea de trazos la irradiación

espectral de la radiación solar que llega a nivel del mar, perpendicular a su superficie, un día completamente claro.

Alguna onda altamente energética que pudiera llegar, con longitud de onda inferior a una milimicra, es absorbida en la capa exterior de la atmósfera, denominada Termosfera, por interacción con moléculas de oxígeno que quedan disociadas o ionizadas. Esto produce un calentamiento de la Termosfera, la cual comienza aproximadamente a los 100 km de la Tierra con una temperatura de unos 86 K y se estima que llega hasta más allá de los 500 km, donde la temperatura puede alcanzar 1000 K.

La radiación ultravioleta, $1\mu\text{m} < \lambda < 0,38\mu\text{m}$, es absorbida, aunque no totalmente, por el ozono de la estratosfera. Ozono que es producido por la propia radiación ultravioleta, a partir del oxígeno emitido por los vegetales en su función clorofílica o del contenido en el vapor de agua, según los mecanismos:



El ultravioleta es absorbido por el ozono, desdoblándolo en oxígeno atómico y molecular

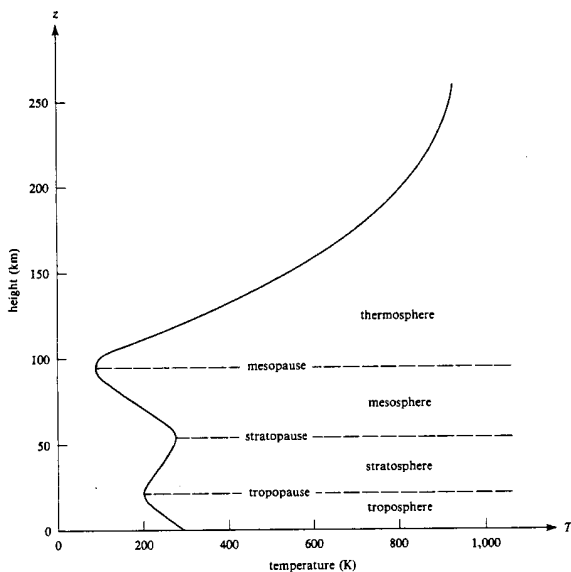
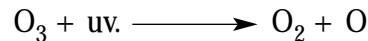


Figura 2. Estructura térmica de la atmósfera terrestre.

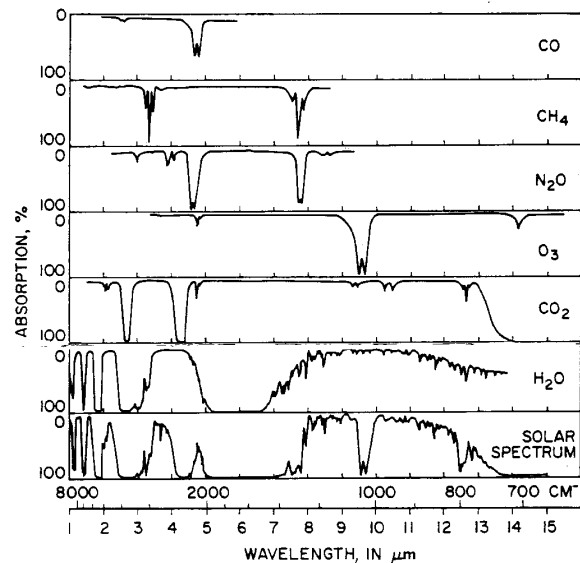


Figura 3. Absorción atmosférica del espectro solar en la banda infrarroja.



lo que realimenta el proceso de formación de ozono y asegura una continua absorción de ultravioleta. La energía así absorbida provoca un calentamiento de la Estratosfera, desde unos 200 K, a unos 18 km de altura, hasta unos 300 K a los 50 km. En la figura 2 se representan las diferentes capas atmosféricas y su temperatura en función de la altitud.

La absorción en las longitudes de onda visibles, $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$, es mínima y la absorción en el infrarrojo se realiza en la Troposfera, capa mas baja de la Atmósfera en contacto con la superficie terrestre, suelo o mar, y que llega a la altura de 18 km. La absorción tiene lugar fundamentalmente por vapor de agua y dióxido de carbono, si bien otros gases, como el monóxido de carbono, el metano o el óxido nitroso, absorben ciertas longitudes de onda de la banda infrarroja. En la figura 3 se representa la absorbancia de cada uno de los citados gases. Como se ve, en su conjunto la Atmósfera solo permitirá el paso de radiación infrarroja en unas bandas concretas, que se denominan ventanas infrarrojas y que se han representado en la figura 4 .

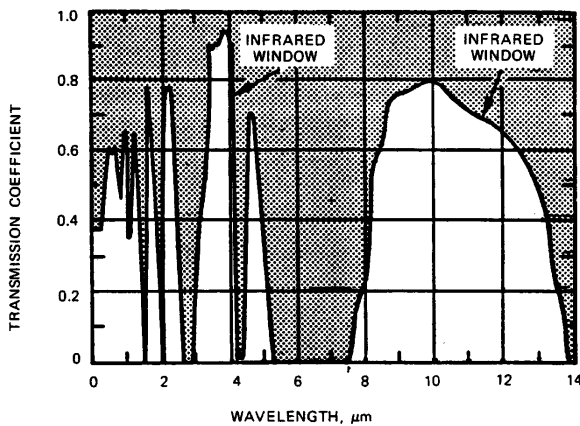


Figura 4. Ventanas atmosféricas en el infrarrojo. *Infrared Technology Fundamentals*. I. Spiro. Marcel Dekker, Inc. 1989.

La Tierra, como cualquier cuerpo, emite radiación infrarroja de acuerdo con la Ley de Stefan-Blotzmann* y según la distribución espectral dada por la Ley de Planck**, radiación que en parte

* Ley de Stefan.Boltzmann $E = \sigma T^4$
siendo, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, la constante de Stefan-Boltzmann y T, la temperatura absoluta.

** Ley de Planck

$E = \frac{A\lambda^{-5}}{e^{B/\lambda T} - 1}$, siendo A = $3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2$ y B = 0,0143 m. K

saldrá a través de las ventanas infrarrojas, pero en gran parte será absorbida por las capas bajas de la Troposfera, provocando en esta un calentamiento (Efecto invernadero). Gracias a este es posible la vida en la Tierra, pues de no existir, es decir, si la Atmósfera estuviera únicamente formada por gases no absorbentes de la radiación infrarroja, la temperatura media en la superficie terrestre se establecería en unos 50 °C por debajo de la actual, lo que haría inviables las formas de vida hoy día presentes. De una manera sencilla podemos estimar la temperatura de la superficie terrestre, en el caso citado de no existir efecto invernadero, ya que en ese caso, teniendo en cuenta únicamente los intercambios energéticos por radiación, la situación de equilibrio térmico se alcanzaría cuando la energía solar absorbida por la superficie terrestre fuese igual a la emitida de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann.

La energía solar total que llega a la Tierra es la interceptada por un círculo de radio R, la cual, en función de la constante solar se expresa

$$E = \pi R^2 H$$

siendo R el radio de la Tierra. Esta energía se debe distribuir sobre toda la superficie terrestre y por unidad de superficie, la energía recibida en la unidad de tiempo es

$$I = E/4\pi R^2 = H/4$$

Pero no toda ella es absorbida, ya que en gran parte será reflejada. Si la absorbancia media de la superficie terrestre es α , la energía absorbida por unidad de tiempo en la unidad de superficie es αI , y en la situación de equilibrio citada, debe ser igual a la emitida de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann

$$\alpha H/4 = \sigma T^4 \quad \text{de donde} \quad T = (\alpha H/4\sigma)^{1/4}$$

expresión que nos da la temperatura de equilibrio de la superficie terrestre, en el supuesto indicado, en función de las tres constantes:

$$\alpha \cong 0,5 \text{ absorbancia media de la superficie terrestre}$$

$$H = 1353 \text{ W/m}^2 \text{ constante solar}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \text{ constante de Stefan-Boltzmann}$$

Con estos valores la citada temperatura resulta ser $T = 233,7 \text{ K} = -39,8 \text{ }^\circ\text{C}$



El aumento de la concentración en la atmósfera de los gases que provocan el efecto invernadero, modifica el equilibrio energético en el sistema radiación-atmósfera-superficie terrestre, aumentando la energía absorbida y elevando la temperatura de la superficie de la Tierra, con los consiguientes efectos, como son: aumento de la evaporación, aumentando el contenido de vapor de agua en la atmósfera; dilatación de las aguas de los océanos, elevando el nivel de los mismos; fusión de los casquetes polares, provocando una disminución del albedo*; cambios drásticos en el sistema de precipitaciones, etc.

La naturaleza está dotada de mecanismos reguladores de los efectos citados, pues, si bien es cierto que un aumento de la temperatura conlleva un aumento de la evaporación, es decir un aumento del vapor de agua en la atmósfera, con lo cual aumenta el efecto invernadero y con ello habrá un mayor aumento de la temperatura, lo que parece realimenta el proceso, hay que tener en cuenta, que un aumento de vapor de agua en la atmósfera hace que aumente la nubosidad y con ello disminuye la radiación solar recibida en la superficie terrestre, lo que contribuye a disminuir la temperatura y regula el proceso anterior.

Análogamente, al aumentar la temperatura se produce una fusión del hielo de las zonas polares, con lo cual disminuye el albedo, es decir se absorbe más energía solar, pues el agua es más absorbente que el hielo y ello provoca un mayor aumento de la temperatura, lo que realimenta el proceso. Pero hay que tener en cuenta que al disminuir la superficie de hielo y aumentar la de agua, aumenta la evaporación y con ello la cubierta nubosa, lo que impide la llegada de radiación solar a la superficie terrestre y disminuirá la temperatura, efecto que es regulador del anterior.

No obstante, es un hecho cierto que la temperatura media en la superficie terrestre ha aumentado alrededor de 0,6 °C en lo que va de siglo y entorno a 0,4 °C en los últimos 40 años. Estos cambios y en general todo el cambio climático, puede ser debido a la propia variabilidad climática natural y/o al aumento de la actividad humana. Discernir cuantitativamente la

influencia de una y otra es un problema en estudio. La concentración en la atmósfera de los gases que provocan el efecto invernadero, entre otros, el dióxido de carbono, óxido nitroso y metano, puede atribuirse fundamentalmente al uso de combustibles fósiles y a los cambios en el uso de la tierra. Pero además han aparecido en la atmósfera otros gases que no se encuentran en ella de manera natural y que son debidos a la actividad industrial, nos referimos a los conocidos CFCs (Cloro-Fuor-Carbonos) y a los HCFCs (Hexa-Cloro-Fluor-Carbonos), los cuales, además de contribuir al efecto invernadero, actúan destruyendo el ozono de la capa estratosférica. La aplicación del Protocolo de Montreal hará que la concentración de estos gases vaya disminuyendo progresivamente.

La naturaleza no lineal del sistema climático hace posible una respuesta drástica o desproporcionada ante un cambio mínimo de una de sus variables. Por ello es necesario analizar con mucha precisión la variación de las variables climáticas ante cambios producidos en los elementos, sistemas y/o procesos que conforman el clima. Para lo cual se hace necesario conocer las fuentes, sumideros y ciclos biogeoquímicos de los gases de efecto invernadero, el ciclo hidrológico, los balances de energía, las diferentes interacciones y los distintos procesos de realimentación en el sistema climático.

Solamente con un conocimiento profundo y amplio de la influencia de la actividad humana en el cambio climático, podremos establecer las condiciones de desarrollo sostenible, es decir, aquellas que nos permitan satisfacer nuestras necesidades sin poner en peligro la posibilidad de que las futuras generaciones puedan satisfacer las suyas, comportamiento que no solo es lógicamente deseable, sino que éticamente parece exigible.

Madrid, Mayo de 1997.

José M^a De Juana Sardón
Catedrático de la UPM.

*Albedo: Energía reflejada, expresada en tanto por uno de la incidente.