

# Máxima distancia de visibilidad en el aire y las Ecuaciones de Maxwell

María Clara Ponce Mora  
([clariponce\\_91@hotmail.com](mailto:clariponce_91@hotmail.com))

Física 3 – ECyT Universidad Nacional de San Martín

## Resumen:

Se estudia la distancia máxima de visibilidad debido a la atenuación de la luz solar en la atmósfera. Se propone un modelo que tiene en cuenta la interacción de la radiación electromagnética con los átomos del aire. El esquema experimental consiste en medir la radiación solar en la superficie de la Tierra como función del ángulo cenital del sol, durante un día despejado.

## Introducción:

El sol irradia luz en forma de ondas electromagnéticas, lo cual se conoce como radiación electromagnética. Se trata de una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio. Las ondas electromagnéticas conducen energía y pueden transferirla a objetos que se encuentren en su trayectoria, transportando energía de un lugar a otro; y viajan a la velocidad de la luz.

James Clerk Maxwell formuló este concepto de radiación electromagnética a través de cuatro ecuaciones en las que se propone que un campo eléctrico variable en el tiempo genera un campo magnético, y a su vez, un campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico. Debido a este hecho, este tipo de ondas puede propagarse a través del espacio vacío, sin la necesidad de un medio material.

La luz del sol emitida en forma de onda electromagnética produce un campo eléctrico que afecta a los átomos del aire. La aplicación de un campo eléctrico externo a un átomo de número atómico  $Z$  y cuya nube electrónica se encuentra alrededor del núcleo formando una esfera de radio  $a$  y densidad de carga constante, provoca que el núcleo se aparte una distancia  $x$  del centro de gravedad de la nube electrónica. Esto genera un dipolo inducido  $p$  en el átomo.

La onda electromagnética induce a una frecuencia y amplitud característica, y el dipolo inducido de los átomos del aire oscilará con la misma frecuencia. Este dipolo oscilante irradia energía electromagnética.

El hecho de que haya una máxima distancia de visibilidad se debe a la extinción de la luz en la atmósfera. A medida que la luz viaja a través de la atmósfera hacia la superficie terrestre, esta se atenúa por dispersión y por absorción en las moléculas del aire, además por interacción con partículas o contaminantes que puedan encontrarse en él.

El radio de la Tierra es 1000 veces mayor que el espesor de la tropósfera, que ocupa el 75% de la masa de la atmósfera y mide alrededor de 11 Km. de espesor. Para calcular la atenuación de la luz en la atmósfera se supone una atmósfera y Tierra planas.

El hecho de la atenuación de la luz puede entenderse como una forma de la ley de Lambert-Beer. Un haz de luz incide con una intensidad absoluta sobre una muestra (en este caso, el sol y el aire, respectivamente), que tiene sustancias dispersas por unidad de volumen. Al atravesar un espesor  $dx$  de esa muestra, la atenuación de la radiación es proporcional a la cantidad de interacciones que hayan tenido las moléculas o átomos con ese haz de luz a lo largo de ese diferencial de distancia.

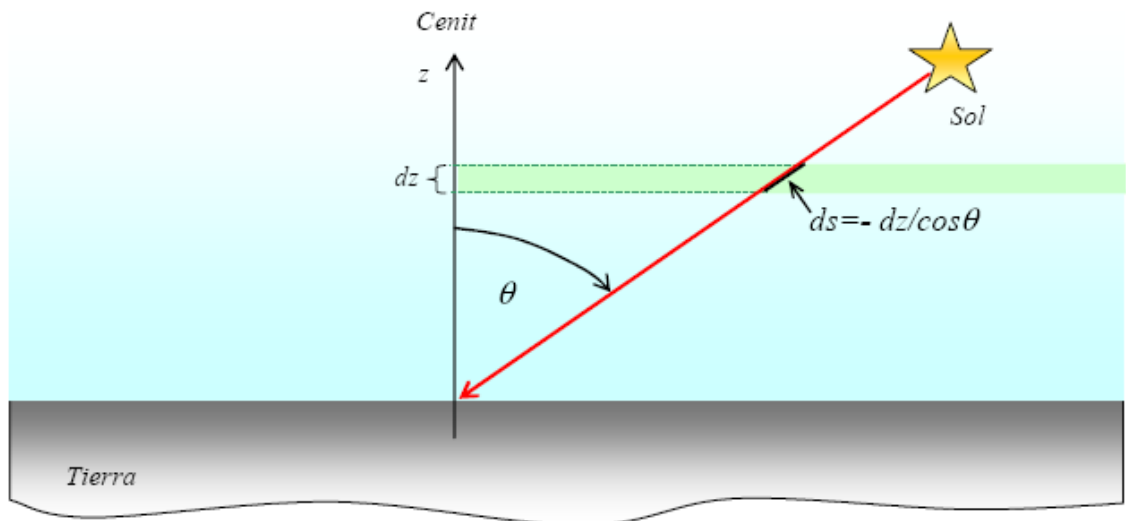
La sección eficaz,  $\sigma$ , es la probabilidad de que los centros (dispersores) interactúen con el haz. Si se conoce este parámetro, se puede relacionar la intensidad de luz incidente con la intensidad de luz saliente de la muestra.

Si ahora se hace la analogía al sistema atmósfera-Tierra, se relaciona la constante solar ( $I_{sol}$ ) con la radiación solar ( $I_0$ ) medida sobre la superficie de la Tierra, según la *ecuación 1*. En este caso sería necesario conocer el ángulo cenital ( $\theta$ ) que indica el ángulo que los rayos solares forman con la vertical del lugar.

$$Ec. 1: I_0 = I_{sol} \cdot e^{-K_{ef} \sec(\theta)}$$

La necesidad de conocer el ángulo cenital viene del hecho que esta ecuación es la integral de la variación de la intensidad de la luz solar al atravesar una longitud  $ds$ , dada por  $ds = dz / \cos\theta$ ; donde  $dz$  es una porción infinitesimal de la coordenada  $z$ , que sería el cenit, y  $\theta$  es justamente el ángulo cenital. La *ecuación 2* presenta el cálculo de esta variación de intensidad ( $dI$ ), donde  $N_A$  es el número de Avogadro, y la *figura 1* muestra un esquema al respecto con la suposición de la atmósfera y tierra planas.

$$Ec. 2: dI = -\sigma_T n(z) N_A ds \cdot I(z) = +\sigma_T n(z) N_A I(z) \cdot dz / \cos\theta$$



*Figura 1:* Esquema que muestra el ángulo cenital en el modelo de la atmósfera y tierra planas, donde  $ds$  es una porción infinitesimal de la distancia del sol al punto de medición.

Si se analiza la irradiancia solar en la superficie de la Tierra ( $I_0$ ) como función del parámetro  $\mu = \sec(\theta)$ , entonces:

$$Ec. 3: \ln(I_0) = \ln(I_{sol}) - K_{ef} \mu$$

Cuando se grafica  $\ln(I_0)$  en función de  $\mu = \sec(\theta)$ , la pendiente corresponde a  $K_{ef}$ , que es la constante que depende de la sección eficaz de las moléculas y de la presión atmosférica, como lo indica la *ecuación 4*.

$$Ec. 4: K_{ef} = N_A \sigma_T P_0 / M_{aire} g$$

Esta sección eficaz depende de las partículas en la atmósfera o aerosoles y de las moléculas del aire que atenúan la luz por la dispersión de Rayleigh.

Conociendo  $K_{ef}$  se calcula finalmente la longitud característica de extinción ( $\Lambda$ ) de la luz en la atmósfera, o la máxima distancia de visibilidad en una atmósfera despejada, según la *ecuación 5* que se muestra a continuación.

$$\text{Ec. 5: } \Lambda = h_0 / K_{ef}, \text{ donde } h_0 = RT / gM_{\text{aire}} \sim 7702,2 \text{ m,}$$

Donde  $\Lambda$  es la longitud característica de extinción de la luz o la máxima distancia de visibilidad.

Sin embargo, se puede obtener este valor teóricamente para ser más precisos, teniendo en cuenta la temperatura y la presión del lugar al momento de medición. Esto se hace con la *ecuación 6*.

$$\text{Ec. 6: } \Lambda = \frac{3}{32\pi^3} \frac{\lambda^4}{k_B (n_0^2 - 1)^2} \left( \frac{P_0}{T_0} \right)^2 \left( \frac{T}{P} \right)$$

Este valor sería el  $\Lambda_{teor}$ , que debería ser mayor al experimental, y también se comprobará.

Finalmente, otro asunto a tener en cuenta es que a una distancia mayor que  $\Lambda$  hay una disminución en la intensidad con la que el ojo observa el objeto. Esta situación está dada por la *ecuación 7*, también derivada de la ley de Lambert-Beer.

$$\text{Ec. 7: } I(x) = I_0 e^{(-x/\Lambda)}$$

Cuando  $x = \Lambda$ , la intensidad se atenúa en un factor de  $1/e$ . A medida que  $x$  aumenta respecto de  $\Lambda$ , la relación  $I(x)/I_0$  disminuye, atenuándose aún más la intensidad con la que se observa el objeto.

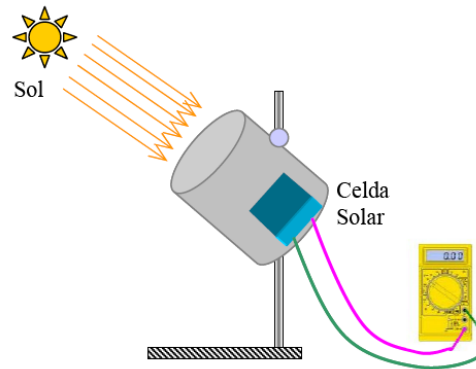
### **Método experimental:**

Para determinar la máxima distancia de visibilidad se requiere medir primeramente la intensidad relativa con la que incide el sol en la superficie terrestre ( $I_{rel}$ ). Para esto generalmente se utiliza un piranómetro (*Fig. 1*), que es un instrumento que permite medir de una manera precisa la radiación solar incidente mediante un sensor que mide la densidad del flujo de la radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) en un campo de  $180^\circ$ .



*Figura 1:* Fotografía de un piranómetro comercial que mide la radiación total, tanto la discreta como la difusa.

Sin embargo, para este trabajo se utilizó una celda solar conectada a un miliamperímetro (*Fig. 2*) que mide la corriente, que es proporcional a la intensidad de la radiación discreta. La celda solar fue cubierta a su alrededor por un tubo y debió ser colocada de tal forma que el tubo quede orientado en la dirección del sol para que la luz llegara perpendicular a la celda. La celda no mide la radiación solar en un campo de  $180^\circ$ .



*Figura 2:* Esquema de una celda solar conectada a un miliamperímetro, el cual mide únicamente la radiación solar discreta.

Por lo tanto, estos dos métodos no miden lo mismo. El piranómetro mide la radiación difusa, mientras que la celda mide la radiación incidente directa del sol.

En un día despejado, se expuso la celda a la radiación solar y se midió la magnitud de la señal de irradiancia ( $I_{rel}$ ) cada 5 o 10 minutos durante 7 horas, en forma de la corriente que pasaba por el multímetro conectado a la celda solar. La  $I_{rel}$  se midió en  $W/m^2$ . Este valor indica la irradiancia que llega a la tierra, ya atenuada. Es decir la irradiancia saliente según la ley de Lambert-Beer. También se recopilaron datos de mediciones de años anteriores que fueron comparadas.

Además fueron necesarios los valores del ángulo cenital ( $\theta$ ), que es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal del lugar. Estos valores del ángulo en función de la hora fueron extraídos de la página web del U.S. Naval Observatory (USNO)<sup>1</sup>, ingresando la información de la hora y las coordenadas del lugar de donde se expuso el piranómetro o celda solar.

Con estos valores se construyó el gráfico de  $\ln(I_{rel})$  en función de  $\mu = \sec(\theta)$ , a partir del cual se extrajo el valor de  $K_{ef}$  (Ec. 2), pendiente del mismo. Así se pudo calcular el valor de  $\lambda_{exp}$  (Ec. 4), para luego compararlo con el valor teórico de la máxima distancia de visibilidad.

Por otra parte, en un día despejado, similar al usado para las mediciones, se tomó una fotografía desde un cerro (Cerro San Bernardo, Provincia de Salta), de otros cerros lejanos que se pudieron identificar, los más lejanos que se observaban. Entonces, utilizando el programa Google Earth se determinó la distancia desde el punto del observador al cerro observado como más lejano y se comparó esta distancia con la  $\lambda_{exp}$  calculada a partir del método experimental anterior.

## Resultados:

En la *Figura 3* que se muestra a continuación se presenta el gráfico de  $\ln(I_0)$  vs.  $\mu$  para los datos tomados el día 30/10/2011, coordenadas  $34^\circ 30' S$  y  $58^\circ 29' O$ .

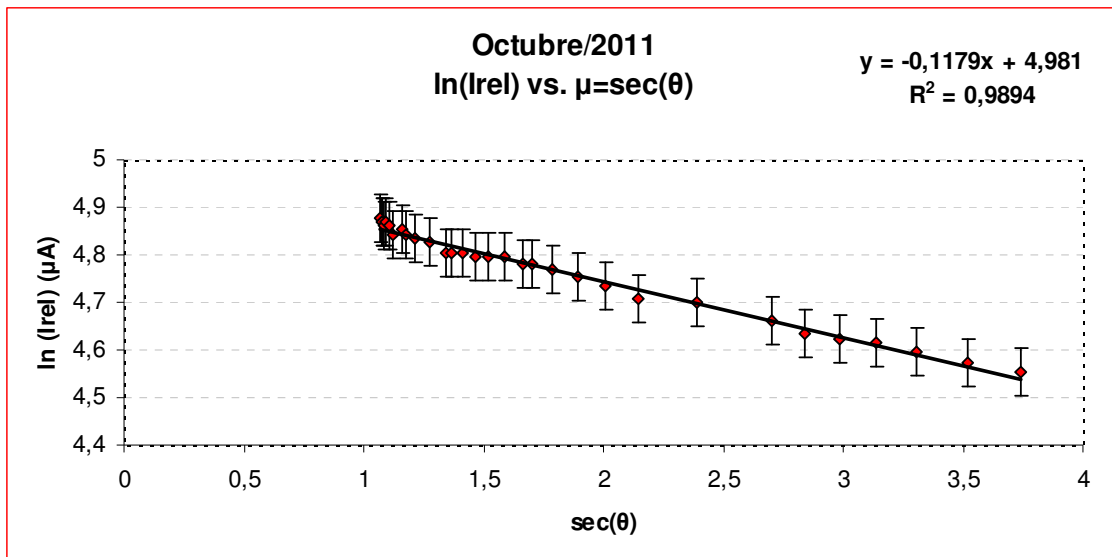


Figura 3: Gráfico del  $\ln(I_{rel})$  en función de  $\mu=\sec(\theta)$  (Buenos Aires, Octubre/2011).

A partir del gráfico anterior, los resultados obtenidos fueron los siguientes (Tabla 1):

		Error
$K_{ef}$ (pendiente)	0,117	0,002
ho (m)	7702,2	
$\Lambda$ (km)	65	1

Tabla 1: Muestra los resultados obtenidos a partir del gráfico de la Figura 3, donde  $\Lambda$  es la distancia máxima de visibilidad en el aire (Buenos Aires, Octubre/2011).

Resultados de los datos recopilados de experiencias anteriores:

- Abril/2010:

En la Figura 4 se presenta el gráfico realizado de  $\ln(I_{rel})$  en función de  $\mu=\sec(\theta)$ , de datos de intensidad tomados en abril de 2010.

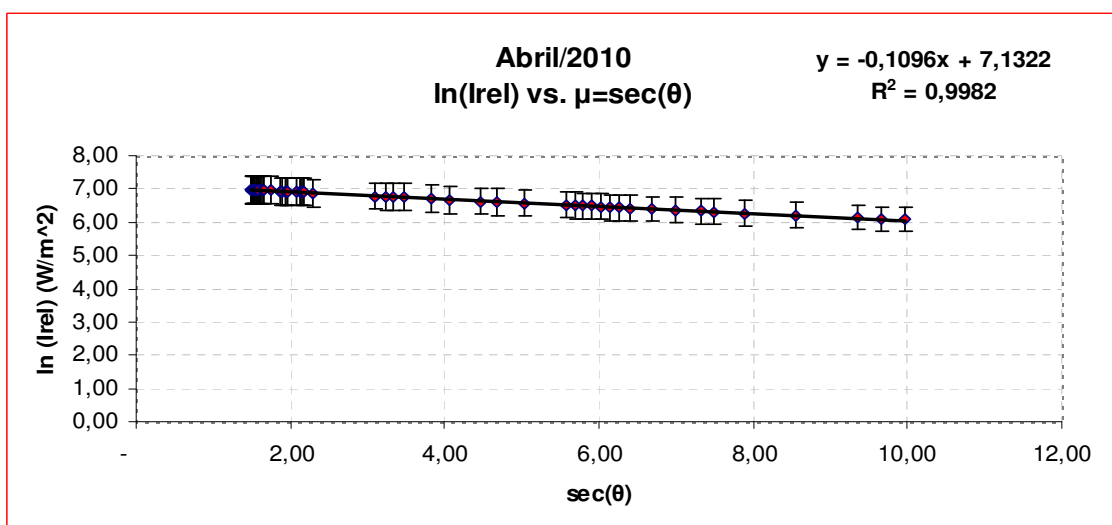


Figura 4: Gráfico del  $\ln(I_{rel})$  en función de  $\mu=\sec(\theta)$  (Buenos Aires, Abril/ 2010).

A partir del gráfico anterior, los resultados obtenidos fueron los siguientes (Tabla 2):

		Error
$K_{ef}$	0,1096	0,0006
$h_0$	7702,2	
$\Lambda$ (km)	70,3	0,4

Tabla 2: Muestra los resultados obtenidos a partir del gráfico de la Figura 4, donde  $\Lambda$  es la distancia máxima de visibilidad en el aire (Buenos Aires, Abril/2010).

- Mayo/2010  
En la Figura 5 se presenta el mismo gráfico para datos tomados en mayo de 2010.

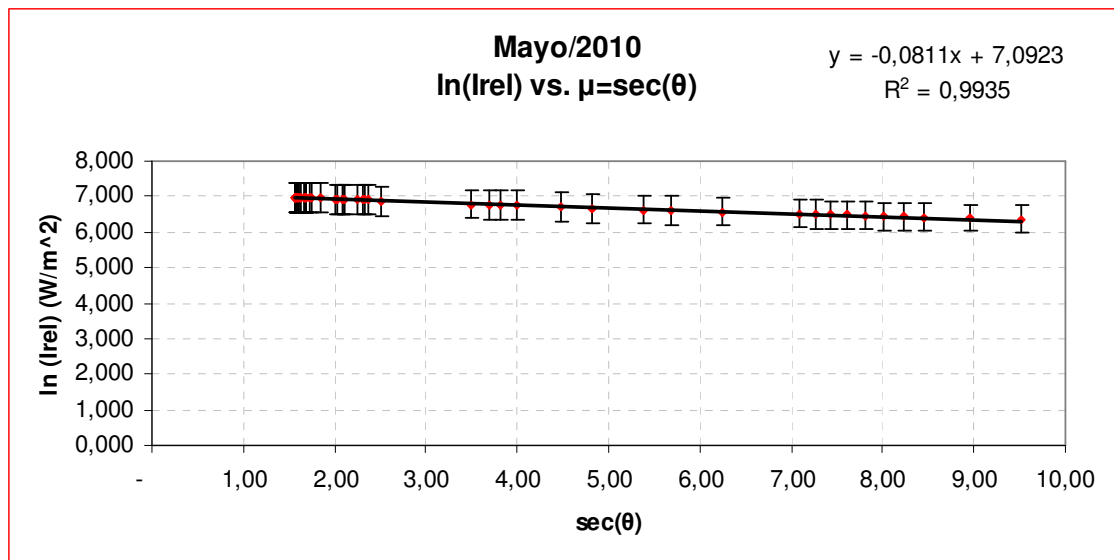


Figura 5: Gráfico del  $\ln(I_{rel})$  en función de  $\mu=sec(\theta)$  (Buenos Aires, Mayo/2010).

A partir del gráfico anterior, los resultados obtenidos fueron los siguientes (Tabla 3):

		Error
$K_{ef}$	0,08	0,00
$h_0$ (m)	7702,2	
$\Lambda$ (km)	95	1

Tabla 3: Muestra los resultados obtenidos a partir del gráfico de la Figura 5, donde  $\Lambda$  es la distancia máxima de visibilidad en el aire (Buenos Aires, Mayo/2010).

A continuación, Figura 6, se muestra la fotografía tomada desde el Cerro San Bernardo (Provincia de Salta) a cerros lejanos. A pesar de las nubes que estaban presentes se pudo identificar el cerro más lejano y con el programa Google Earth se midió la distancia.



*Figura 6:* Fotografía tomada desde el cerro San Bernardo, Salta. (Julio/2011)

El cerro identificado como más lejano es el Nevado de Chañi, el cual se ubica en el límite entre las provincias de Salta y Jujuy, siendo la máxima elevación de la Provincia de Jujuy y una de las más altas de Salta, con más de 5.000 metros de altura.

Conociendo las coordenadas de ambos cerros (San Bernardo y el Nevado de Chañi), el valor de la distancia es de **85 km**.

Por último se calculó el valor teórico (*Tabla 4*) de la distancia máxima de visibilidad como indica la *Ec. 6*, para compararlo con los valores experimentales dados en cada uno de los procedimientos anteriores.

$\Lambda$ (km)	<b>163,48</b>
----------------	---------------

*Tabla 4:* Valor teórico de la distancia máxima de visibilidad en el aire.

Valor medio de la Irradiancia solar sobre la superficie terrestre a partir de las mediciones de Abril de 2011: **872,9 W/m<sup>2</sup>**.

Valor de la constante solar a partir de datos bibliográficos<sup>2</sup>: **1367 W/m<sup>2</sup>**.

### **Discusión:**

Luego de la adquisición de los datos, para realizar los gráficos únicamente se tomaron los valores que correspondían a ángulos cenitales aproximadamente menores a los 75° u 80°, para que pueda ser válida la suposición de la tierra plana. Esto nos lleva también a una conclusión de que la tierra es redonda.

Otro factor que hubo que tener en cuenta al momento de la medición fue que el cielo estuviera totalmente despejado, para que el hecho de que haya nubes no sea el que minimice la máxima distancia de visibilidad. Además en cada medición hubo que redirigir la celda de tal modo de medir la radiación directa del sol, perpendicular, fijándose que no se observe sombra en la base de la celda.

Lo que se midió en los experimentos fue la corriente, ya que se puede correlacionar directamente con la irradiancia solar en la superficie ( $W/m^2$ ) por ser proporcionales.

La distancia máxima medida con Google Earth a partir de la foto es considerablemente más chica que la esperada. Esto puede deberse a errores en la precisión de la identificación del cerro, además que como se observa en la foto, el día en el horizonte estaba nublado interfiriendo esto en la visibilidad.

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones de la irradiancia fueron muy variables y también considerablemente más chicos que la distancia máxima de visibilidad en el aire esperada calculada en forma teórica. Esto se debe entonces, como se dijo, a la atenuación de la luz por la dispersión y por la absorción por parte de los dipolos inducidos en las moléculas del aire. Además, por la presencia en la atmósfera de otras partículas o contaminantes que interfieren con la luz irradiada por el sol, provocando una disminución en la distancia de visibilidad.

### **Conclusión:**

Se pudo medir la irradiancia solar resultante en la superficie terrestre, llegando a la conclusión de que es menor a la irradiada directamente por el sol (la constante solar), debido a la atenuación que ocurre durante su tránsito por la atmósfera, donde interacciona con los átomos del aire induciendo en ellos un dipolo, y donde se encuentran presentes sustancias o partículas contaminantes que interfieren con la luz saliente del sol. Así, se determinó la distancia máxima de visibilidad en el aire que es en definitiva dependiente de estos factores, que disminuyen la visibilidad en el aire.

### **Referencias:**

<sup>1</sup> U.S. Naval Observatory (USNO) Sun or Moon Altitude/Azimuth Tables, <http://www.usno.navy.mil/USNO/astronomical-applications/data-services/alt-az-us>.

<sup>2</sup> [http://www.solarpedia.es/index.php/Constante\\_solar](http://www.solarpedia.es/index.php/Constante_solar)

<sup>3</sup> Feynman Physics Lectures, (Inside Dielectrics, Vol. 2, Ch. 11)

<sup>4</sup> S. Gil y E. Rodriguez - Estimación de la constante solar, la luminosidad del Sol y atenuación de la luz en la atmosfera.

### **Anexo:**

En este trabajo, a continuación, también se comentará acerca de un tema relacionado con la radiación electromagnética solar y su interacción con la atmósfera. Se trata de la razón por la cual el cielo se ve azul.

Como ya se dijo, la luz del sol viaja a través del espacio en forma de onda electromagnética, y se la conoce como luz blanca, abarcando la composición de todos los colores del espectro visible (desde el violeta con menor longitud de onda, al rojo con mayor longitud de onda). La atmósfera esta compuesta en su mayor parte por moléculas de nitrógeno y oxígeno entre otros gases y compuestos, dependiendo del lugar y el clima.



Cuando la luz del sol es irradiada, se mantiene en una misma dirección hasta que interactúa con las moléculas de la atmósfera. Estas moléculas absorben parte del haz de luz, provocando luego su dispersión, con lo cual cambia la dirección inicial. Las moléculas en la atmósfera dispersan en mayor medida el color azul en las diferentes direcciones, y esta es la razón por la cual el cielo se ve azul. Irradian el color azul, ya que absorben las frecuencias mayores del espectro visible, pertenecientes a longitudes de onda de este color. Este fenómeno se denomina dispersión de Rayleigh. Así, esta es también la razón por la cual las montañas o cerros a lo lejos se ven de color azul.

Si uno mira al horizonte, el cielo se ve de color azul más pálido o blanco, debido a que aumenta la distancia que tiene que atravesar la luz dispersada hasta llegar a nuestros ojos.

Al atardecer, en la puesta del sol en el horizonte, las nubes y su alrededor se ven de color anaranjado o rojizo. El color azul sigue siendo dispersado en todas las direcciones, pero los demás colores del espectro visible de las longitudes de onda mayores pertenecientes al color naranja-rojo, en su trayectoria inciden en las nubes, iluminándolas. Esta luz se refleja a la superficie terrestre, atenuando y sobreponiéndose al color azul dispersado en la atmósfera.

El fenómeno de la dispersión de Rayleigh ocurre para partículas menores que la longitud de onda del espectro visible. Cuando se trata de partículas mayores, la luz que incide se refleja en diferentes direcciones pero en los mismos colores, es decir, luz blanca. Entonces en estos casos se observa la composición de todos los colores, luz blanca. Este es el caso de las nubes que están formadas por gotículas densas de agua.