



¿A QUÉ DISTANCIA PODEMOS LLEGAR A VER LAS TORMENTAS?

Consideraciones sobre la dispersión de la luz en la atmósfera y contrastes (y II)

Francisco Martín León
temperie5d2001@wanadoo.es

Francisco José Rodríguez (Mammatus)
f_jose@eresmas.net

Nota de la RAM. Al final de este trabajo hemos incluido un anexo que nos ha enviado Pablo José Ruiz, (Cumulonimbus). Este anexo incide en puntos relativos a la primera parte de este artículo que apareció en la RAM 9. Por su interés, lo reproducimos al final del documento.

Introducción

En el anterior número de la RAM (Nº 9 de marzo del 2003) analizamos las condiciones de propagación de la luz y de las ondas electromagnéticas en un medio refractario, como es la atmósfera, con objeto de estudiar a qué distancias podíamos ver los topes de las tormentas de gran desarrollo vertical. En ese estudio se tuvieron en cuenta las condiciones de propagación ideal de un rayo en una atmósfera estratificada donde el índice de refracción variara de forma estándar con la altura en una tierra curvada. No se consideraron otros efectos como la dispersión y la atenuación de los rayos luminosos en la atmósfera, contrastes de objetos, etc. , elementos que pueden condicionar los resultados obtenidos previamente.

Este trabajo es complementario al primero, y va más allá en sus objetivos. Se analizarán puntos que no fueron tratados y que hacen referencia a principios básicos de la óptica atmosférica. No trataremos aspectos relativos a la fisiología del ojo humano y a la subjetividad de la percepción que posee cada uno de nosotros. Para hacerlo más general, comentaremos otras situaciones que no están ligadas a la visualización de topes tormentosos de gran desarrollo vertical.

¿Hasta donde podemos ver en un día despejado?

Esta pregunta está íntimamente ligada a la que se realizó en el anterior número de la RAM ¿Ha que distancia podemos ver los topes nubosos convectivos en un día de aire claro?.

En el anterior número se analizó la problemática desde el punto de vista de la propagación de las ondas electromagnéticas y luminosas haciendo especial hincapié en la refracción atmosférica de los haces luminosos, las variaciones del índice de refracción con el estado atmosférico, la curvatura de la tierra, etc.. Se consideró un haz ideal que se propagaba en la atmósfera sin dispersarse y atenuarse. Topes de tormentas de 18 ó 20 km podían ser vistos, teóricamente, más allá de los 500 km de distancia.

La realidad es más compleja que lo comentado hasta ahora, pues en la percepción humana de objetos en la atmósfera influyen otros factores que no los hemos tenido en cuenta y hacen que, incluso en una tierra ficticia, plana y en día claro con buena iluminación solar, la visión de objetos está limitada a una distancia finita y menor que la comentada con anterioridad.

Partimos de estas condiciones ideales para este análisis preliminar: una tierra plana y capa de aire sin partículas externas en suspensión. Posteriormente, veremos el papel de otras partículas inmersas en la atmósfera y trataremos de dar un a respuesta orientativa para el caso de una tierra curvada.

Viendo objetos: noche y día

La visión que tenemos durante el día y la noche nos puede servir de ejemplo conceptual para fijar ideas.

Durante las noches despejadas y claras podemos ver objetos luminosos y muy lejanos. La luna, estrellas y, a veces, cometas o estrellas fugaces son las estructuras que se ven con facilidad. Algunos puntos luminosos, como las estrellas, se sitúan a distancias casi infinitas y su luz tenue llega a nuestros ojos. Durante el día, el sol, el astro rey, las elimina del firmamento y solo la luna es capaz de dejarse ver ocasionalmente. En esos momentos ocurre un hecho contradictorio: a mayor iluminación solar, menor es el rango o distancia de visión del ser humano. ¿Por qué?

El concepto de contraste: objetos luminosos en la noche y el día

Definición de contraste

Podemos definir el contraste como el grado de distinción entre áreas de diferentes niveles de brillo. Se dice que el contraste es alto cuando se comparan zonas, por ejemplo, de brillos de color blanco y negro.

El contraste, c , se puede definir ópticamente como la razón entre:

$$(I_s - I_b) / I_s$$

Donde I_b y I_s son, respectivamente, las intensidades de la luz emitida por un objeto y la parte recibida de la zona de alrededor del objeto, que para nuestro caso es el cielo. Un objeto negro sobre fondo blanco o azul, se caracteriza porque absorbe toda la luz que le llega y no emite nada, $I_b = 0$, en estos casos el contraste es máximo. Lo mismo ocurre en las noches: el contraste es notorio entre el brillo de las estrellas lejanas y el fondo negro del firmamento.

El contraste depende de la distancia. En óptica atmosférica se puede demostrar que para una distancia, s , entre observador y objeto, el contraste tiene esta expresión:

$$c = e^{-\tau(\lambda) s}$$

Donde s es la distancia, $\tau(\lambda)$ es el coeficiente de atenuación, que depende de la longitud de onda, λ . La atenuación depende, a su vez, de la dispersión y absorción de la luz por las moléculas del aire, de la dispersión y absorción de los aerosoles o partículas en suspensión que existan en la atmósfera.

Existe un valor del contraste umbral, C_r , por debajo del cual el ser humano no puede ver un objeto. Esta "constante" depende de cada persona, así como del estado de adaptación del ojo, el color, el tamaño aparente del objeto, etc..

El contraste en la noche: objetos a distancias infinitas

Basta tener el fondo de la noche como telón, un objeto luminoso con tamaño apreciable para nuestros ojos y nuestra retina puede identificar el parpadeo de tales objetos muy pequeños y lejanos. Cabría pensar que si vemos objetos luminosos a distancias cósmicas en el firmamento, podríamos ver objetos relativamente más grandes (nubes muy lejanas) durante el día.



En una noche despejada podemos ver objetos luminosos (estrellas) que se encuentran a grandes distancias. Su contraste es muy significativo con el fondo oscuro o poco luminoso

No es así. El ojo humano puede distinguir objetos de hasta un cierto tamaño angular, siempre y cuando estén contrastados respecto al fondo donde se sitúan. Por la noche, objetos poco luminosos, como las estrellas, son percibidos por nuestros ojos porque poseen fuerte contraste con el entorno: el cielo oscuro y negro. Pero aún más, la luz que nos llega no está contaminada por focos luminosos intensos, como es el sol durante el día.

La visión de las estrellas durante la noche se puede ver alterada, contaminada y reducida por las luces artificiales de las grandes ciudades. Los astros se ven mejor en zonas diáfnas y limpias de contaminación artificial.

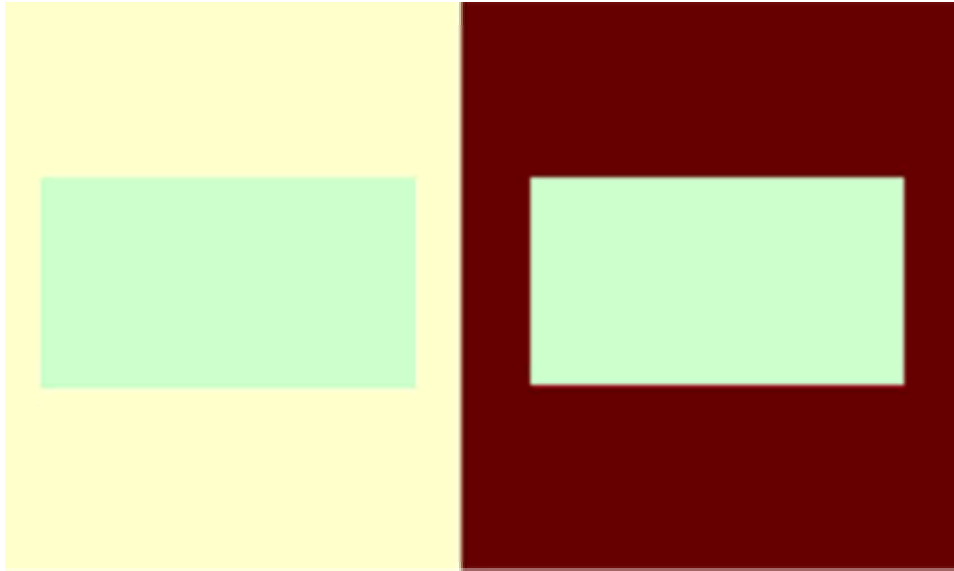
Una tormenta nocturna situada a una gran distancia, digamos a 400 km, no sería percibida por un observador al no estar iluminada, como es lógico. Solamente en el caso de que se generen descargas eléctricas en su interior podría resaltar sobre el fondo oscuro de la noche y aire limpio y claro.

Pero hay estrellas que no se ven: o su tamaño es extremadamente pequeño o su luz y su contraste es lo suficientemente débil o pequeño. Para el ser humano, el brillo relativo de un objeto respecto a su fondo debe superar un umbral de contraste para ser distinguido. Este valor mínimo depende de cada persona, del tamaño del objeto y del brillo de éste, entre otros factores. Lo que sí es importante resaltar que el contraste relativo de un objeto siempre es finito.

El contraste durante el día

Cuando llega el día, el tapiz de fondo azulado o blanquecino reemplaza al telón negro de la noche. El sol aparece inundándolo todo de un nuevo colorido, gracias a su luz y al reflejo de ella por parte de los objetos que nos rodea. Desaparecen las estrellas lejanas y vemos nuevos objetos más próximos a nosotros. Contradictoriamente, la luz del sol "apaga" los objetos que veíamos durante la noche en la lejanía infinita, pero nos abre una puerta para ver a los que se encuentran en primer plano. Pero ahora, lo sorprendente es que no vemos más allá de unas decenas o centenas de km, en el mejor de los casos. Solo la luna se puede mantener ajena a lo que acontece y hacerse visible.

¿Qué le ha ocurrido a nuestra percepción visual?. Simplemente que el sol, la atmósfera y nuestra anatomía ocular hacen que el campo y distancias de visión sean diferentes durante el día y la noche. Ni decir tiene que, estamos más limitados en las distancias diurnas que en las nocturnas pero la riqueza y detalles de lo que vemos es más notoria. Veamos el porqué.



El contraste puede afectar a cómo los colores son percibidos por el ser humano. En este caso el mismo rectángulo verde del centro aparece en ambas figuras pero el color de fondo cambia. El resultado final es que el de la derecha es mejor percibido que el de la izquierda, debido al contraste con su fondo. Si estas figuras son alejadas de nuestros ojos, existirá una distancia a la cual será imposible distinguir los rectángulos interiores. El primero en dejar de ser visto es el de la izquierda por su menor contraste con el color amarillo.

Aparentemente no vemos las estrellas durante el día porque su contraste relativo al fondo azulado ha disminuido y nuestros ojos no las pueden distinguir. Pero allí están, enviándonos su propia luz. Por el contrario, gracias a la iluminación solar percibimos muchos más objetos relativamente cercanos con una mayor riqueza de detalles y colores.

Durante el día quedarán resaltados en la lejanía los objetos que contrastan con el fondo que tenemos: cielos azules o en el peor de los casos blanquecinos. La luz del sol interacciona con los componentes de la atmósfera produciendo los fenómenos de dispersión y absorción de los rayos luminosos.

Cuando vemos un objeto en la lejanía bien contrastado (una montaña de color verdoso oscuro sobre fondo de cielo azulado o blanquecino), los rayos que nos llegan de ella sufren un proceso continuado de dispersión que hacen que su contraste a nuestros ojos disminuya. Incluso objetos negros o muy oscuros, a grandes distancias, iluminados uniformemente dejan de verse por la dispersión atmosférica. No digamos nada si a las componentes básicas de ella le añadimos otras diminutas partículas, gases, polvo en suspensión: más vapor de agua, gases contaminantes, aerosoles, etc... Nuestra capacidad de ver objetos lejanos decae significativamente.

En el ejemplo que presentamos a continuación podemos ver una escena, aunque con ángulos de visión diferentes, donde se observa como objetos oscuros con fondo blanco (día de nevada y cielo muy nublado en las cercanías de Madrid) son los que mejor se ven. Sobre la colina se divisan árboles de color oscuro. El horizonte casi desaparece y no hay sensación de la presencia de objetos lejanos.



Día muy nuboso posterior a una nevada. En estas condiciones, de tapiz y fondo blanco, los objetos oscuros aparecen muy contrastados. El horizonte no es perceptible y todo lo "blanco" se ve muy mal. La visibilidad era muy buena pero aparentemente limitada. Foto Miguel Martín del Río

La misma escena, pero con un ángulo de visión mayor, es presentada en la siguiente figura. Ahora el fondo es azulado y blanquecino. Los objetos que contrastan son también los oscuros. La visibilidad es buena y podemos apreciar montañas al fondo (40-50 km) bien contrastadas. Incluso las nubes "con panza oscura o de burro" se ven mejor en esta situación.

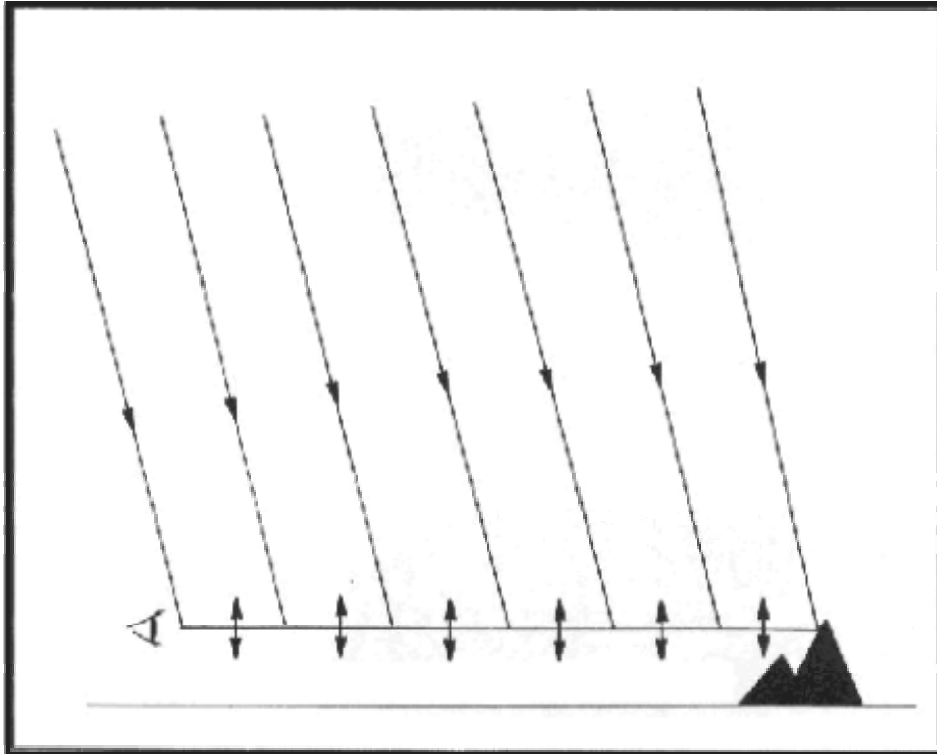


Ídem que el caso anterior, pero con un campo de visión diferentes. Se divisan montañas al fondo izquierda situadas a mas de 50 km. El fondo azulado blanquecino resalta las nubes más oscuras. La iluminación era muy uniforme Foto Miguel Martín del Río

Dispersión de la luz solar: disminución del contraste

En la siguiente figura podemos ver otro fenómeno significativo a tener en cuenta. Durante un día de aire claro los objetos lejanos son observados en la distancia al reflejar la luz que les llega. Esta, antes de alcanzar a un observador, es dispersada por las moléculas y las partículas de la atmósfera. Los rayos solares, que atraviesan la troposfera entre el objeto y el observador, también son dispersados y algunos de ellos se suman al que le llega directamente y alterado desde el objeto, en este caso una montaña.

La dispersión natural de la luz disminuye, a fin de cuentas, el contraste de los objetos que vemos. Existirá una distancia a partir de la cual el objeto, incluso bien contrastado, no será observado ya que su contraste habrá disminuido tanto que es menor que el umbral que posee el ser humano.



Una nube o montaña en la lejanía de grandes proporciones en la vertical se verá afectada por los procesos de dispersión de la luz que llega al observador. La contaminación luminosa que existe entre el objeto-observador y el grado de contraste que exista entre el objeto-fondo observado serán importantes elementos para percibir lo que vemos

Nubes tormentosas de gran desarrollo en la lejanía

En el caso anterior hemos considerado una montaña alta. Estas estructuras suelen estar bien contrastadas respecto al cielo azul o blanquecino. Si nos alejamos de una nube de grandes proporciones o la vemos a gran distancia su contraste disminuirá rápidamente y se dejará de ver, sobre todo en los días donde el horizonte y el cielo quedan "tocados" de un color blanquecino.



La presencia de partículas en suspensión en el aire y la dispersión de la luz por la atmósfera puede disminuir la distancia visual a la que se pueden ver objetos lejanos

Si entre el objeto y el observador la atmósfera deja de estar limpia, apareciendo polvo en suspensión, aerosoles, bruma, etc... los rayos reflejados que nos llegan del objeto se dispersan aún más, reduciéndose el espacio óptico entre nosotros y lo que podemos ver. Lo mismo ocurre con la contaminación luminosa que "cae" desde el sol y se dispersa por todas las partículas que se encuentran en la trayectoria objeto-observador.

Distancia máxima visual

En un día claro y limpio sin partículas en suspensión (no existen aerosoles, polvo en suspensión, etc..), al nivel del mar, y supuesta una tierra plana, la distancia máxima a la que podemos ver objetos bien contrastados y a las longitudes de onda del espectro visible, para una iluminación uniforme y de medio día para un observador "normal", se sitúa entre los 330 y 350 km.

Cuando un objeto de gran tamaño en la vertical se localiza a mayores distancias, la dispersión que experimentan los haces luminosos que nos vienen de él, hace que sea muy difícil su visión.

Si nos restringimos a la identificación de los topes de las tormentas hay que recordar que estas se desarrollan en días donde la humedad del aire es lo suficientemente significativa como para producir nubes. Estrictamente hablando el vapor de agua contribuye poco a la dispersión de la luz. El problema surge cuando se condensa en partículas de mayor tamaño y, entonces, sí que tiene un papel relevante en la disminución del rango de visibilidad de nubes lejanas.



Tormenta en la lejanía. Los elementos más perceptibles son aquellos que se encuentran bien contrastados e iluminados. En primer plano, una nube con un vórtice en su base.

Las irrupciones de aire frío dejan la atmósfera muy limpia aumentando considerablemente la visibilidad, pero reducen el poder del crecimiento de la convección.

Conclusiones

En estos dos trabajos complementarios que hemos presentado en la RAM hemos tratado de dar algunas ideas simples de la complejidad que entraña la pregunta: ¿a que distancia podemos llegar a ver las tormentas?. En este sentido hemos dividido la problemática en sus partes simple y diferenciadas.

En la RAM 9 de marzo del 2003 analizamos las condiciones de propagación de las ondas luminosas en nuestro planeta, y en condiciones de variaciones del índice de refracción estándar. La curvatura de la tierra y la variación del índice de refracción hacían que los haces luminosos se curvaran hacia abajo cuando les llegaba a un observador que viera un tope nuboso distante. Esta curvatura era menor que la de la superficie terrestre y vimos que el problema se podía reducir de forma equivalente al de una tierra plana donde el haz se curvaría hacia arriba en estas condiciones podríamos ver, teóricamente, topes nubosos a 450-500 km de distancias sin más que estos alcanzasen los 16-20 km de altura, o a veces más. A esta discusión faltaba otra, no menos importante, que había sido tratada en ese número.

Hemos visto que la interacción de luz solar con la atmósfera, reduce considerablemente la posibilidad de ver topes nubosos más allá de los 300-350 km, tanto más cuanto más "sucio" y contaminada este la escena que estamos viendo. La dispersión de los rayos del objeto observado, la presencia de partículas en suspensión en la atmósfera, ... disminuyen el contraste relativo y la visibilidad de los topes nubosos que se desarrollen a grandes distancias. Los grandes desarrollos de hasta 16 km, o más, de altura se suelen dar en las estaciones cálidas donde las partículas en suspensión reducen la visibilidad. Podemos limitar la visibilidad de los topes convectivo y las tormentas en condiciones de buena visibilidad alrededor de los 300 km-350 km, aproximadamente.

Cuando la convección muy profunda queda en la lejanía y el sol comienza a estar bajo, en el atardecer, el contraste aumenta ya que el fondo celeste se transforma y se oscurece. A lo sumo, toma colores cálidos anaranjados. Por el contrario, la luz del sol sigue iluminado las cimas de los cumulonimbos aumentando el contraste y facilitando aún mejor su visión.

En las noches limpias y cerradas podemos apreciar nubes tormentosas a grandes distancias, gracias a la iluminación fulgurante que emana de ella al producirse un rayo.



En las noches claras podemos ver, fugazmente, tormentas a grandes distancias cuando una descarga eléctrica se genera en ella.
Foto NOAA.NWS

Anexo

Algunas consideraciones complementarias, Pablo José Ruiz, Cumulonimbus

ram@meteored.com