



Halo visto desde la fuente del Prometeo en la Facultad de Ciencias, UNAM.

<https://www.facebook.com/photo.php?fbid=10206921408183830&set=a.1998640215780.119182.1536764613&type=1&theater>

De halos y arcoíris

Ricardo Pérez

Formación de cristales en la atmósfera

El pasado jueves 21 de mayo, a los habitantes de la Ciudad de México nos sorprendió un fenómeno natural inusual: el Sol radiante del mediodía estaba rodeado de un halo multicolor. Las estaciones de radio y televisión recibían llamadas del público preguntando qué sucedía. En las redes sociales empezaron a circular fotografías del fenómeno y se especulaba sobre su origen. En este artículo te explicaré qué ocurrió.

Como sabes, en la atmósfera hay vapor de agua que podemos ver en forma de nubes y en ocasiones se condensa, se hace líquido y nos damos unas empapadas tremendas si no hacemos caso a la advertencia de que debemos llevar nuestro paraguas. Pero también el agua se puede encontrar

en forma de cristales y éstos pueden tomar muchas formas, aunque sólo cuatro son importantes en efectos ópticos meteorológicos como el halo de 22 grados del 21 de mayo: planos en forma de hexágono, de los cuales hay algunos que tienen forma de columna hexagonal, los hexagonales puntiagudos y una combinación de las columnas con los planos hexagonales.

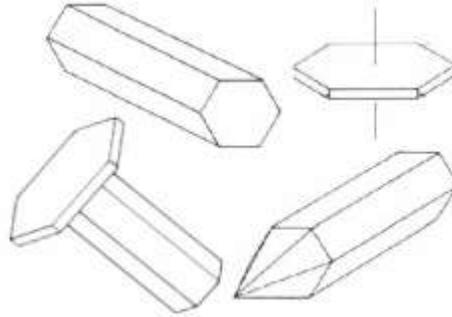


Figura 1. Cristales hexagonales de agua congelada. Figura extraída de la referencia 1.

Los cristales de hielo se forman en una atmósfera saturada de agua; cuando pasan del estado gaseoso al sólido, la forma que adoptan depende de la temperatura del entorno. Las condiciones necesarias para que se formen los cristales más interesantes se cumplen cuando la humedad relativa del aire está entre el 100 y 140% y la temperatura está entre -25 y 5°C . La humedad relativa es la cantidad de agua en forma de vapor presente en el aire, comparada con la máxima humedad que puede haber a esa misma temperatura, los valores superiores al 100% indican sobresaturación. Entre más caliente sea el aire mayor es la cantidad de agua que admite y a temperaturas bajas almacena menos agua. Cuando una masa de aire se enfría el vapor sobrante se elimina en forma de rocío o de precipitación. En caso de que la saturación sea mayor de 140% el crecimiento de los cristales es muy rápido y se forma escarcha; es decir, los depósitos no serán cristales regulares sino amorfos.

Se necesita algo más

Para que se forme un halo hay una condición más: los distintos tipos de cristales deben tener cierta orientación en el aire que cambia debido a los choques de las moléculas de la atmósfera con los cristales, puede entonces suceder que todos los cristales se alineen y se forme un halo. Cuando el tamaño de los cristales hexagonales planos es de 50 a 500 micrómetros, las corrientes de aire contribuyen a ordenar los cristales en forma horizontal gracias a su forma aplanada. Este ordenamiento se debe a una fuerza similar a la que actúa sobre el ala de un avión, y predomina sobre el movimiento browniano de los cristales; este movimiento aleatorio se genera por los choques de las moléculas de aire con los cristales. Otra situación se presenta si los cristales tienen dimensiones de 0.5 milímetros a 3 milímetros, entonces se orientan horizontalmente y se ponen a girar mientras caen en la atmósfera (ver figura 2), esto sucede con los cristales hexagonales alargados.

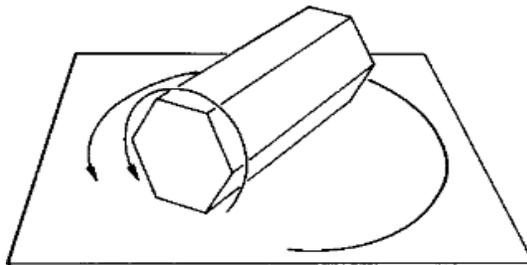
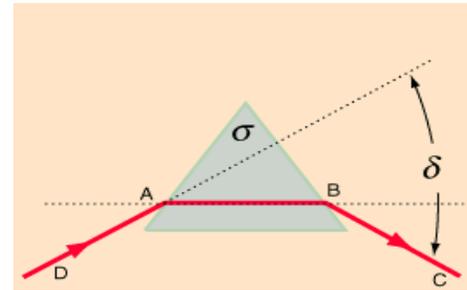
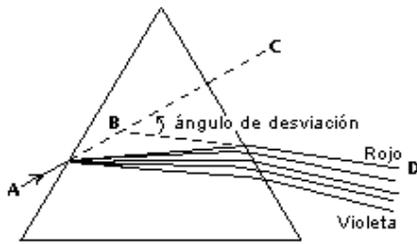


Figura 2. Cristales hexagonales orientados horizontalmente y que pueden girar libremente como se muestra. Figura extraída de la referencia 2.

¿Por qué se ve un círculo de colores?

El halo llamado de 22 grados que vimos en la ciudad de México, se puede entender si primero pensamos en un prisma que dispersa la luz. El ángulo entre el rayo incidente y el emergente se conoce como desviación del prisma (ver figura 3 a).



a)

b)

Figura 3. a) Ángulo de desviación en un prisma dependiendo la longitud de onda de la luz.

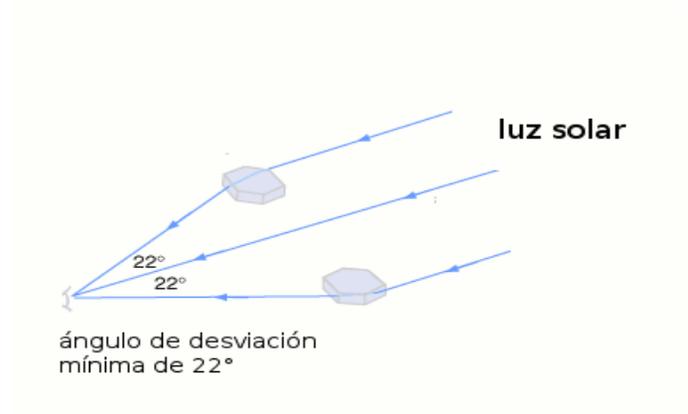
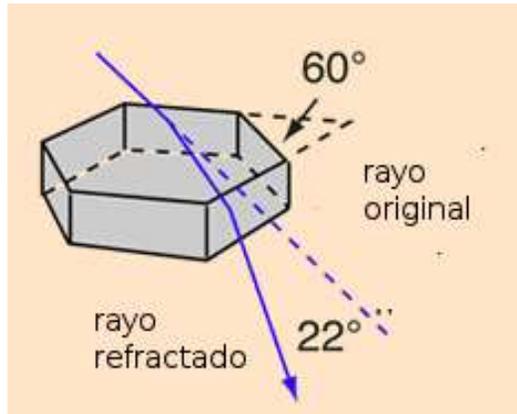
b) Ángulo de desviación mínima. Figura extraída de la dirección electrónica:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/halo22.html>

El ángulo de desviación mínima es aquel en el que el prisma desvía en menor grado la luz que incide sobre él. Es paralelo a la base del prisma formando la línea AB (figura 3b). Para la formación de los halos circulares este ángulo es de gran importancia. Como la desviación del prisma depende de las longitudes de onda de la luz, tendremos ángulos de desviación mínima para cada longitud de onda; estos ángulos están en una región cercana a la línea **AB** que es paralela a la base del prisma triangular. El valor del ángulo de desviación mínima depende del índice de refracción y del ángulo que forman los lados del prisma.

Esto mismo sucede con los cristales hexagonales ya que sus caras laterales forman un ángulo de 60° (ver figura 4a), y el hielo tiene un índice de refracción de 1.306 para la luz roja (ver figura 5). Al igual que en el prisma de Newton, en el cristal hexagonal de hielo hay un ángulo de desviación mínimo y éste es de 22° ; esto provoca que la luz proveniente del Sol se acumule en esa dirección; el halo es esa concentración de luz y es circular, pues los rayos del Sol atraviesan las caras laterales de los miles de millones de cristales orientados aleatoriamente en todas las direcciones posibles. Para visualizar lo anterior se puede hacer rotar el cristal de la figura 4a alrededor de la línea punteada, así el rayo refractado formará un cono imaginario con un ángulo de 22° ; en cuya base circular estará situado el

halo de colores.



a)

b)

Figura 4. a) Ángulo de desviación mínima (22°) en un cristal hexagonal plano. b) Esquemmatización de la formación de los halos de 22° , éstos se deben a la suma de la luz que pasa por todos los cristales en el aire. Figura extraída de la dirección electrónica: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/halo22.html>.

Es importante señalar que si no existiera la dispersión, el halo sería blanco y no se verían varios colores como los del arco iris (ver figura 3a y 5).

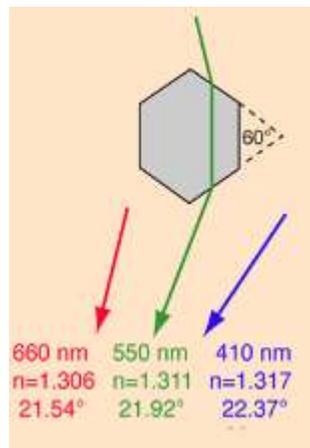


Figura 5. Ángulo de desviación mínima para distintas longitudes de onda. Figura extraída de la dirección electrónica: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/halo22.html>.

Simulación por computadora de los halos

En las explicaciones anteriores sólo se ha tomado en cuenta un sólo cristal,

para el fenómeno completo se debe considerar la refracción y dispersión de todos los posibles cristales que están en la atmósfera, su forma particular y la posición del Sol.

Es posible poner a girar la rueda de la física y obtener las ecuaciones que describen los rayos de luz que atraviesan un cristal de forma muy general, considerando cualquier orientación posible de los cristales respecto al horizonte; es de esperarse que dichas ecuaciones sean un poco complicadas. Si quisiéramos que una computadora nos diera la solución de dichas ecuaciones para todos los cristales en la atmósfera, lo más probable sería que se quede pasmada o que tendríamos que gastar mucho dinero para que nuestro equipo de cómputo fuera muy poderoso.

Los físicos con maña y colmillo pueden hacer que el cacharro (computadora) haga los cálculos unos cientos de veces para unos cientos de miles de orientaciones posibles de los cristales, y obtener así solamente las direcciones de los rayos que atraviesan los cristales. Conocer las direcciones de la luz que atraviesa los cristales equivale a saber cómo se verán en el cielo. Con esta información se realizan gráficas con puntos, donde cada punto representa el lugar adonde va a parar un sólo rayo de luz. Se debe tomar en cuenta además el hecho de que cierta cantidad de luz se pierde al atravesar los cristales. Los factores que intervienen en estas pérdidas son el ángulo de incidencia de la luz proveniente del Sol, las superficies de los cristales (las cuales se espera que no sean perfectas) y el índice de refracción del agua. Todos estos factores se combinan para saber qué tan intensa será la luz al pasar por los cristales y descartar así muchos de los puntos a graficar; con esto se obtiene la predicción del halo de 22 grados y otro halo más que es menos común.

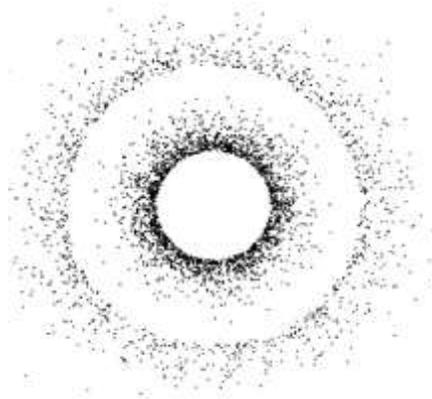


Figura 6. Simulación computacional de los halos de 22 y de 46°.

Los halos corresponden al de 22 grados (halo interior). Usualmente se le observa solo pues la intensidad del halo externo es muy baja. El halo externo se conoce como halo de 46° por la forma en que se genera. Figura extraída de la referencia 2.

El halo de 46° es más difícil de observar debido a su baja intensidad, y es resultado de la refracción y dispersión de la luz al incidir sobre las caras hexagonales de los cristales (caras superior o inferior que forman un ángulo de 90° con las caras laterales del cristal (ver figura 7), por lo que cambia el ángulo de desviación mínima de la luz que es de 46°, dando lugar al halo de 46 grados.

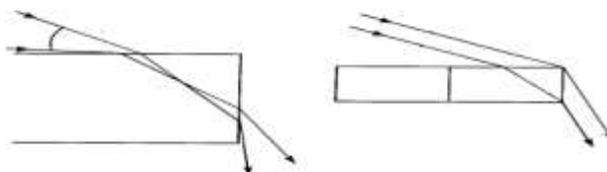


Figura 7. Ángulo de desviación mínima de 46° de los rayos que atraviesan por las caras superior e inferior de los cristales hexagonales. Figura extraída de la referencia 2.

Para rematar, los parahelios

Puede suceder que los cristales planos hexagonales se alineen paralelos casi horizontalmente. Si el Sol se encuentra en una posición baja, cercana al horizonte, se observarán unas líneas a los lados del halo de 22 grados que

son de color blanco porque la luz que las forma se mezcla. La forma de los parahelios cambia con la elevación del Sol y al hacer simulaciones computacionales de diferentes posiciones del Sol se obtienen los siguientes parahelios.

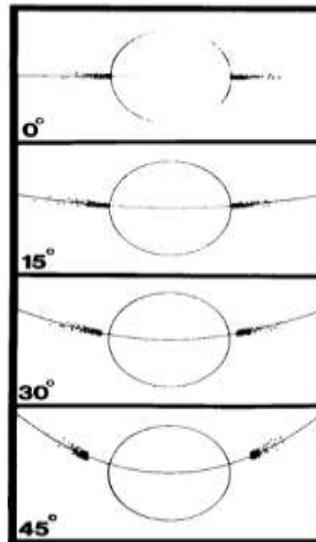


Figura 8. Simulación computacional de los parahelios que se forman a los lados del halo de 22° . Figura extraída de la referencia 2.

Halos en todos lados

La formación de halos encima, debajo y alrededor del halo de 22 grados, se debe a los cristales hexagonales alargados que se orientan horizontalmente (ver figura 2). Al realizar simulaciones en las que estos cristales se consideren orientados aleatoriamente en el plano horizontal y considerando diferentes elevaciones del Sol, se obtienen las siguientes figuras alrededor del halo de 22 grados representado por el círculo marcado. Las áreas sombreadas corresponden al horizonte que limita la visión del halo según sea la posición del Sol.

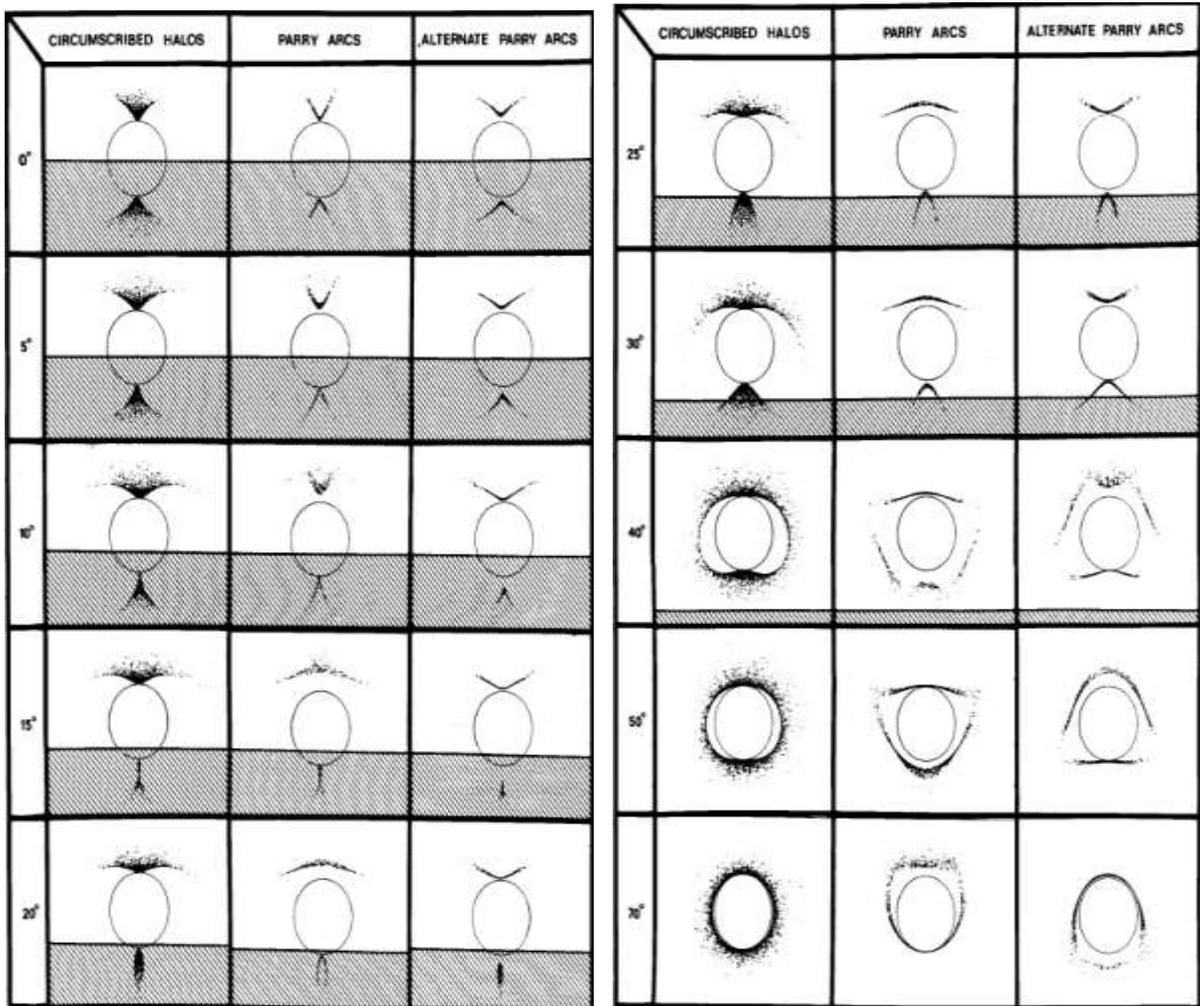


Figura 9. Simulaciones de la formación de halos alrededor del halo de 22° según varias posiciones del Sol en el horizonte. Figura extraída de la referencia 2.

Para finalizar se presentan algunas imágenes obtenidas en el polo sur junto con la simulación computacional de los distintos halos, que se obtienen considerando diferentes tipos de cristales, orientaciones y elevaciones del Sol.

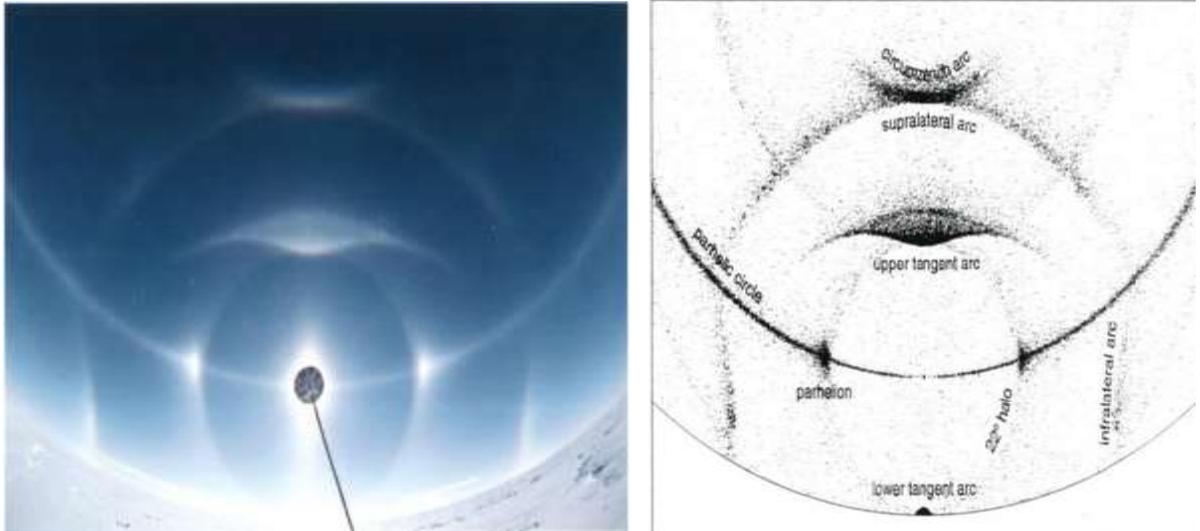


Figura 10. Halo fotografiado en el polo sur y a la derecha la simulación por computadora. El punto negro es un obstáculo para disminuir la intensidad de la luz del sol; esto permite tomar mejores fotografías y el círculo que rodea este punto es el halo de 22 grados.

Figura extraída de la referencia 4.

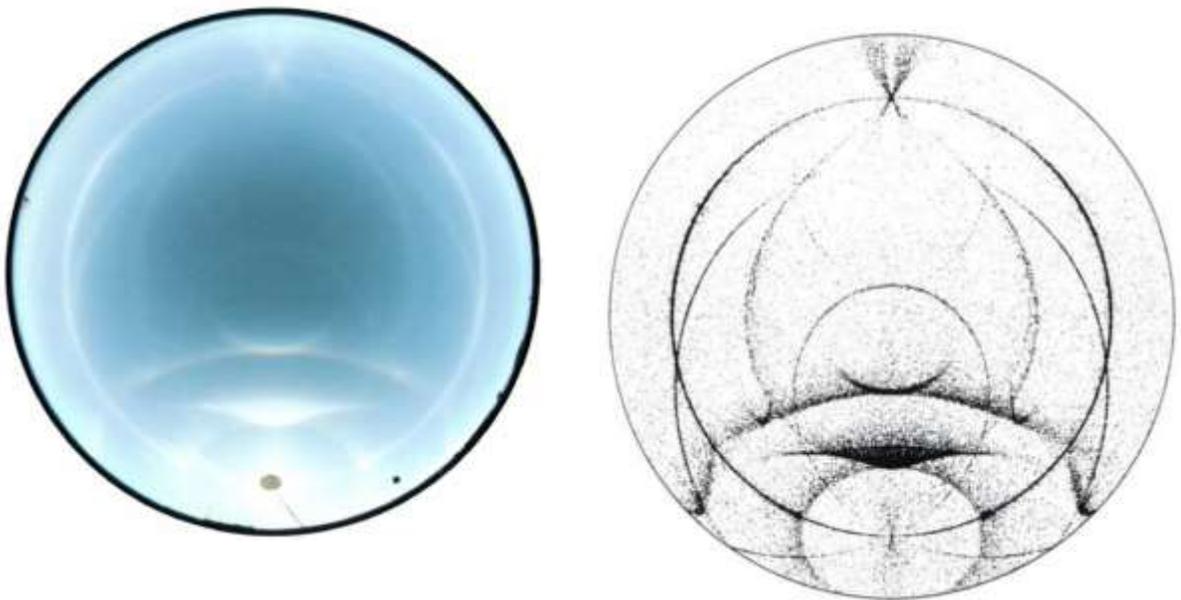


Figura 11. Halo fotografiado en el polo sur y a la derecha la simulación por computadora. El punto negro es un obstáculo para disminuir la intensidad de la luz del sol; esto permite tomar mejores fotografías y el círculo que rodea este punto es el halo de 22 grados.

Figura extraída de la referencia 4.

Referencias

1. Felix Franks (Ed), *Water, a comprehensive treatise*, Plenum press, Bedjord, Inglaterra, 1972.
2. Robert Greenler, *Rainbows, halos, and Glories*, Cambridge University Press, Cambridge, 1980.
3. Walter Tape and Jarmo Moilanen, *Atmospheric halos and the search for angle x* , American Geophysical Union Books, Florida, 2006.
4. Walter Tape, *Atmospheric halos*, American Geophysical Union Books, Florida, 2009.