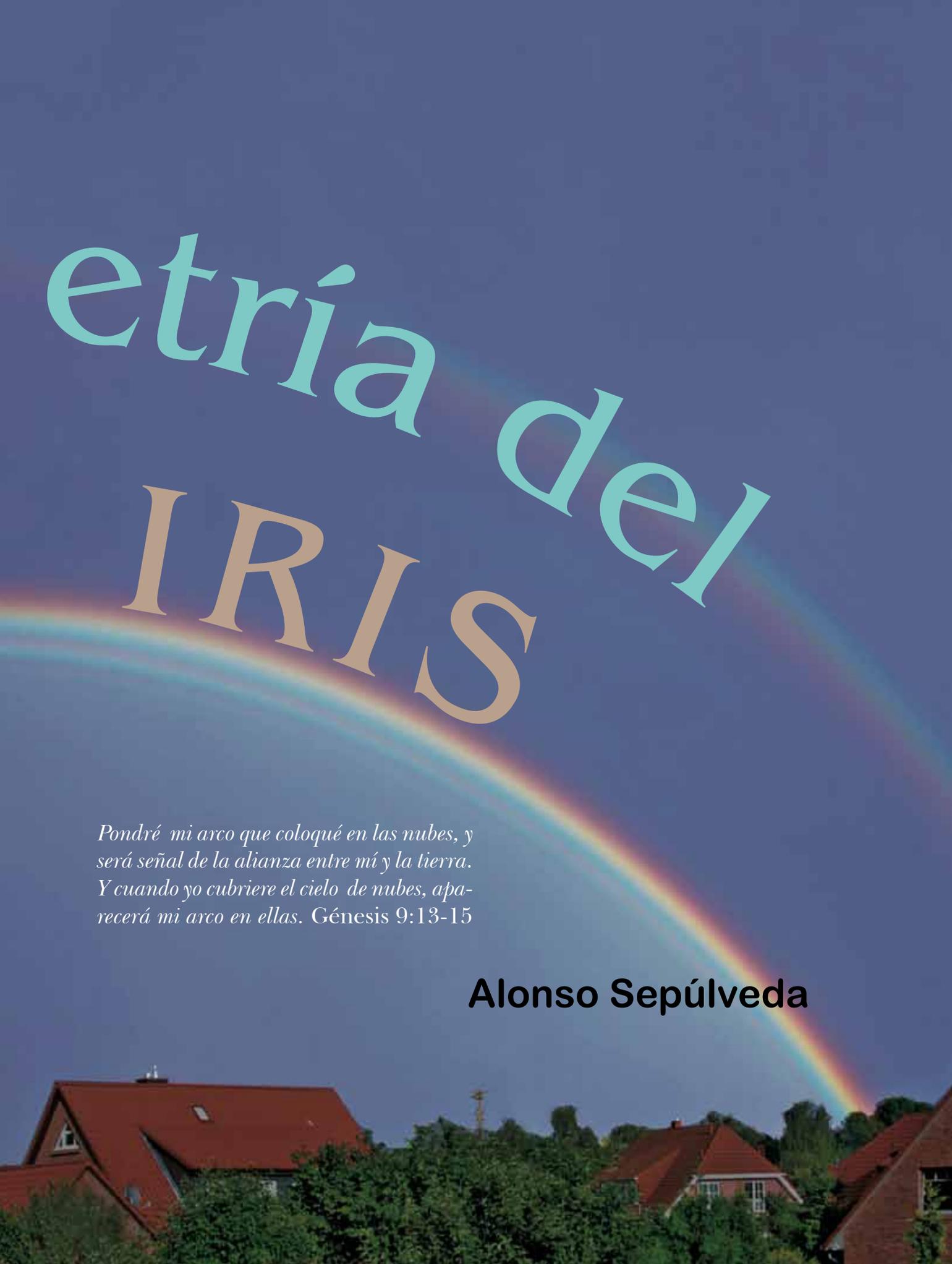


La geom ARCO





etría del IRIS

Pondré mi arco que coloqué en las nubes, y será señal de la alianza entre mí y la tierra. Y cuando yo cubriere el cielo de nubes, aparecerá mi arco en ellas. Génesis 9:13-15

Alonso Sepúlveda

En los primeros años del siglo XIV, el monje alemán Teodorico de Freiberg, miembro de la Orden de los Predicadores, propuso una idea simple y de una estética singular, según la cual es suficiente una gota de agua para explicar el arco iris. La inspirada idea de Teodorico sugiere que los rasgos esenciales de este fenómeno pueden describirse analizando la luz que atraviesa las gotas de agua que permanecen en el aire después de la lluvia, o las que saltan desde el fondo de una cascada. Teodorico probó su conjetura en experimentos con una burbuja esférica de vidrio llena de agua, con la que pudo estudiar el camino individual de los rayos de luz en su interior.

Una antigua idea, sustentada por Aristóteles unos diecisiete siglos antes, afirmaba que el arco iris asociado al Sol se debía a la reflexión de su luz por las nubes, reflexión que al ocurrir a un ángulo fijo da lugar a un cono de luz, al que se conoció como los “rayos del arco iris”. Aristóteles sugirió —no se sabe si por primera vez— que no se trataba de un objeto ubicado en una posición definida en el espacio, sino sólo de un conjunto de direcciones a lo largo de las cuales viaja la luz hasta el ojo.

Los logros del monje alemán pasaron desapercibidos durante unos tres siglos hasta que el tema fue retomado por Descartes, quien en 1637 publicó resultados que redescubrieron y perfeccionaron los hallazgos de Teodorico. Ambos demostraron, cada uno en su época, que el arco iris se debe a rayos de luz que, después de penetrar una gota de agua, se reflejan una vez en su superficie interna regresando luego al exterior. Esta descripción es suficiente para explicar la formación del arco iris primario, ese arco brillante que en presencia del Sol nos sorprende tantas veces después de la lluvia. En condiciones afortunadas, y sólo para ojos atentos, puede verse un segundo arco de radio mayor que el primero, más tenue y con los colores en orden invertido; es el arco secundario. Pocas personas han visto el arco secundario.

El orden de los colores en el arco primario, contando desde el interior, es violeta, añil, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Son los siete

colores del arco iris que en verdad son sólo seis. Ocurre que siete es el número de los cuerpos celestes vistos desde la Tierra que se mueven entre las estrellas: Sol, Luna, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno. Este hecho, observado por todas las culturas antiguas, inició una secuencia de siete que daría lugar al número de los días de la semana —cada uno asignado a un planeta y al dios correspondiente— a los siete metales, hierbas, piedras preciosas, números cósmicos, órganos del cuerpo, y a los siete colores del arco iris, cuando la observación muestra que hay un solo azul, o más bien, que pudo —en vez de dos azules— haber dos tonos del naranja o del amarillo, con tal de lograr la permanencia del siete.

Ahora bien, mientras en el arco primario hay una sola reflexión en el interior de cada gota, en el secundario la luz sufre internamente dos reflexiones antes de salir. La doble reflexión explica la menor intensidad del segundo arco, pues en cada reflexión disminuye la energía disponible.

Tanto Teodorico como Descartes descubrieron que, cuando se observa la luz que sale de la gota o la esfera de vidrio con agua, a lo largo de cada dirección diferente de salida solo puede verse un color a la vez, debido al quiebre del rayo de luz al atravesar la superficie. El ángulo de refracción, asociado al quiebre, depende del ángulo de incidencia y de la frecuencia de la luz incidente, como fue brillantemente descrito por Newton utilizando sus prismas. Este fenómeno, conocido como refracción, fue estudiado en profundidad por Willebrord Snell, quien formuló su ley matemática en 1621. Por su parte, en el fenómeno de reflexión los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, como se supo desde la Antigüedad clásica. Esta pareja de fenómenos es la responsable de los detalles esenciales del arco iris.

La intensidad de los colores del arco iris depende de los diversos tamaños de las gotas: las pequeñas producen arcos pálidos de colores pastel; las grandes los producen de colores muy vivos. La distorsión en la forma de las gotas grandes en su caída libre da lugar a colores intensos en la base del arco iris. Tal vez este brillo acentuado responda por la leyenda de los tesoros dorados al final del arco iris.

El arco iris es un fenómeno natural de orden personal; esto significa que una vez que alguien se detiene frente al arco iris, lo que ve es su arco iris, formado en su retina por la reflexión-refracción de la luz en ciertas gotas de agua. Si otro observador se sitúa al lado del primero, el arco iris que observa se debe a la reflexión-refracción de otros rayos de luz en otras gotas de agua. Si el observador cambia de posición, la luz de su arco iris vendrá de gotas diferentes; y si camina, el arco iris se moverá con él, de modo que éste no está en verdad fuera del ojo de quien lo observa. El arco iris es una imagen que está en el ojo (más bien en el cerebro), es decir, no es un arco de luz que objetiva y realmente está ahí afuera como un objeto normal del mundo. Una prueba es que es imposible alcanzarlo, observarlo de perfil o situar-

se debajo de él. Así pues, el arco iris no presenta uno de los detalles centrales de la perspectiva de los objetos reales, cual es el de mostrar diferentes perfiles a medida que el observador cambia de sitio. El arco iris, para todos los que lo observen, es siempre el mismo, parece estar todas las veces a la misma distancia y no tiene facetas, pues aparece siempre frente al observador.

El final del arco iris es inalcanzable porque no está fuera del ojo, porque retrocede a medida que avanzamos hacia él. De ahí —seguramente— las leyendas sobre los tesoros que se ocultan al final del arco iris. ¿Quién cuida estos tesoros? Obviamente, seres imaginarios: los Gnomos, pues solo seres como estos pueden proteger tesoros en la base de un arco de colores que, en principio, solo existe en el ojo, en el mundo puro de una sensación. Por eso nunca sabremos de qué clase, qué tan fantásticos, son los tesoros del arco iris.

Aún más, lo que hay afuera ni siquiera son colores, sino solo la respuesta de nuestros cerebros a lo que reciben nuestros ojos, simples órganos

sensoriales. Al ojo, en verdad, llegan desde ciertas direcciones especiales ondas electromagnéticas (más bien fotones) que nuestros cerebros perciben como colores.

Así pues, como lo anticipó Aristóteles, el arco iris es una ilusión óptica, lo que no obsta para que sea fotografiable, pues en verdad una cámara fotográfica es un ojo artificial, aunque la luz que recibe es tan real como la que reciben nuestros ojos.

La geometría asociada al arco multicolor involucra un observador situado siempre de espaldas al Sol, después de una llovizna o una tormenta.

El arco iris es un fenómeno natural de orden personal; esto significa que una vez que alguien se detiene frente al arco iris, lo que ve es su arco iris, formado en su retina por la reflexión-refracción de la luz en ciertas gotas de agua.

Siempre veremos el arco iris frente a nosotros y además en un plano perpendicular a los rayos del Sol. Como el ángulo es siempre de 42 grados, cuanto más

bajo se encuentre el Sol más alto se observará el arco luminoso. Cuando es observable, el arco secundario está por encima del primario, es tenue, y presenta la anunciada inversión de colores. Si se mira con atención se verá que la zona entre los dos arcos es más oscura que fuera de ellos, lo que incluso se observa en la parte exterior del primer arco en ausencia del segundo. En esta banda es muy poca la luz devuelta por las gotas de agua. Esta zona oscura fue descrita por el filósofo griego Alejandro de Afrodisias, un afamado comentarista de Aristóteles, a finales del siglo II y comienzos del III; se le llama la franja oscura de Alejandro.

Para el amarillo en el arco iris primario, el ángulo medido desde la horizontal es de 42 grados; el arco secundario está unos ocho grados más alto en el cielo. Estos ángulos fueron medidos por vez primera en 1226 por Roger Bacon, fraile, teólogo y alquimista inglés. Estos ángulos son independientes del tamaño de las gotas, y son los mismos para la luz que emanan las pequeñas gotas que flotan en el aire después de la lluvia o



Arco iris doble

las que salen del globo de vidrio lleno de agua con el que Teodorico y Descartes realizaban sus experimentos. Utilizando sus medidas del índice de refracción del agua, y suponiendo la luz del Sol conformada por rayos paralelos, Newton dedujo que el ángulo del arco primario debería ser de 42 grados dos minutos para el color rojo y 40 grados diecisiete minutos para el violeta. Al tomar además en cuenta el tamaño aparente del Sol —lo que hace que sus rayos luminosos no sean paralelos— obtuvo un ancho angular del arco iris primario de dos grados quince minutos.

Tal vez lo más notable en este despliegue de colores es la forma de arco, lo que le da su nombre, y que corresponde a las direcciones posibles en el cielo desde las cuales puede llegar luz a un observador específico. De hecho, cuando la luz del Sol incide sobre las gotas, el resultado de las reflexiones y refracciones es que el cielo completo se inunda de luz dispersada en todas las direcciones, de las cuales las que confluyen en cada punto del espacio forman un círculo interrumpido por el horizonte. Cada gota produce todos los colores pero solo uno de ellos es observado, y puede demostrarse que

el conjunto de las gotas que produce el mismo color se sitúa sobre un círculo; los arcos de colores distintos están a un ángulo ligeramente diferente respecto al piso, de modo que el arco total está formado por arcos concéntricos de diferentes colores. El ancho de la cortina de gotas en el que ocurre la dispersión, y su concentración, es lo que determina cuán brillante veremos el arco iris.

Analizando el fenómeno con un poco más de detalle, podemos razonar así: la luz del Sol, considerada por simplicidad como un haz paralelo, incide sobre una gota; cada rayo del haz tiene la posibilidad de incidir tangencialmente por arriba o con diferentes ángulos —respecto a la superficie— a medida que el rayo incide desde más abajo. Un rayo particular incidirá de modo perpendicular sobre la gota, y los siguientes incidirán oblicuamente hasta que el último de ellos pasará rasante a la superficie inferior de la gota.

A continuación deberá analizarse el camino recorrido por cada rayo de luz cuando penetra la gota y se refleja una o dos veces en la superficie interna para luego salir. En el primer caso se generará un rayo primario, en el otro

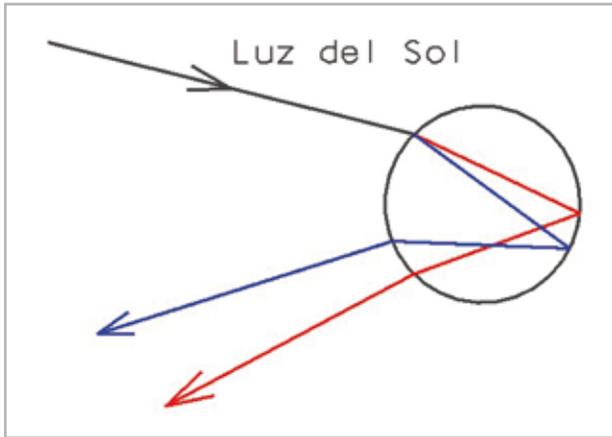


Fig. 1 El arco iris primario se forma con dos refracciones y una reflexión interna.

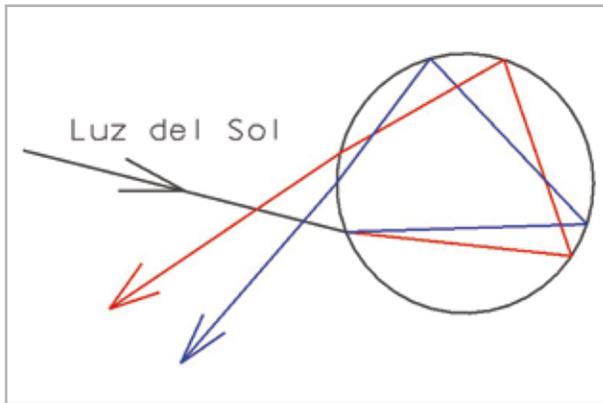


Fig. 2 El arco iris secundario se forma con dos refracciones y dos reflexiones internas.

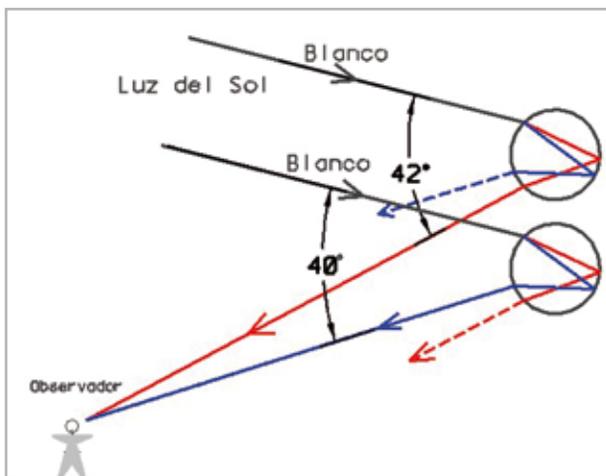


Fig. 3 El arco iris secundario está por encima del primario con los colores invertidos.

uno secundario. En principio, la luz puede reflejarse varias veces antes de salir, solo que, como la intensidad disminuye cada vez que hay una reflexión (porque a esta la acompaña una refracción que se lleva parte de la energía) no alcanzan normalmente a observarse más de dos arco iris. Como la gota es iluminada por el Sol de modo uniforme, sus rayos inciden sobre la gota cubriendo toda su superficie; resulta que la mayor concentración de luz desviada —lo que genera un máximo brillo— ocurre para el arco primario alrededor de los 42 grados.

Por lo demás, si se observa el arco iris con lentes polarizadas se verá que su intensidad varía con solo girar los polarizadores, lo que indica que su luz está polarizada. La del arco primario es perpendicular a la del secundario. Esta propiedad viene del carácter ondulatorio de la luz.

Los fenómenos descritos hasta este punto hacen uso de la óptica geométrica.

Anotemos finalmente que en ocasiones, cuando los arcos primario y secundario son muy intensos, pueden observarse arcos supernumerarios de colores rosados y verdosos, el tercer arco es más interno que el primario y hay un cuarto más allá del secundario. El efecto físico tras la existencia de estos nuevos arcos, que no describiremos aquí, es la interferencia de la luz, fenómeno rico en posibilidades descubierta por Thomas Young en 1803, y que invoca la teoría ondulatoria. ■

Alonso Sepúlveda (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia, con estudios de posgrado en el Hunter College de la Universidad de Nueva York. Ha publicado: *Los conceptos de la física, Electromagnetismo, Física matemática y Estética y simetrías*. Ha participado en proyectos de investigación sobre dinámica de galaxias con el grupo de astrofísica de la Universidad de Roma.

Notas

Este artículo está basado, en buena medida, en “Teoría del arco iris”, de H. Moysés Nussenzveig, artículo publicado en la revista *Investigación y Ciencia* en junio de 1977.