

REDUCCIÓN CROMÁTICA Aunque los daltónicos ven menos colores, son capaces de realizar actividades en las que los estímulos cromáticos desempeñan un papel importante. La clave consiste en seleccionar los colores adecuados y usar información redundante

Daltonismos, vidas de distinto color

JULIO LILLO, HUMBERTO MOREIRA Y ANNA MELNIKOVA

«**S**oy ciego a los colores y lo sé desde niño. Nunca me pareció una limitación. A los 17 años me presenté esperanzado para aprender a volar, pensando que tenía una posibilidad razonable de pasar el test de visión de los colores [...] Estaba claro que algunas profesiones estaban vedadas para mí», explica Donald McIntyre en *Colour blindness: Causes and effects*, libro que publicó en 2002. «Mi nombre es John O'Brien. He volado durante quince años. Dispongo de una licencia de vuelo [...] al máximo nivel; la conseguí hace ocho años», indica John O'Brien en la

página web de la Asociación de Pilotos con Visión Cromática Limitada (www.cvdpa.com).

Las citas corresponden a dos personas daltónicas con un mismo diagnóstico, protanopia, pero con diferente destino. A McIntyre, ese tipo de daltonismo le impidió superar el «test de los colores» de Ishihara, por lo que tuvo que renunciar a su sueño de convertirse en piloto. Por el contrario, la protanopia de O'Brien, que confirmaron otras pruebas, no supuso un impedimento para que obtuviera la licencia de piloto comercial. McIntyre y O'Brien viven en países diferentes y utilizan expresiones distintas para referirse a su daltonismo. El primero habla

En síntesis: Una visión del color diferente

1 Nuestra retina dispone de tres tipos de conos (células fotosensibles), que difieren en sensibilidad espectral (a qué responden más). En las personas daltónicas falla alguno de estos conos.

2 El daltonismo es casi siempre de origen genético, afecta a ambos ojos y se presenta más en hombres que en mujeres. En España, un 5 por ciento de los varones son daltónicos.

3 Los daltónicos compensan sus limitaciones con estrategias. Una es atender distintas informaciones simultáneas de un mismo estímulo (como la posición que ocupa la luz del semáforo).



GETTY IMAGES / SVENIGNE / ISTOCK

VISIÓN

EN BREVE: VISIÓN CROMÁTICA Y DALTONISMOS

TRICRÓMATAS

Personas con tres tipos de células fotosensibles o conos (L, M y C) en la retina, es decir, con una visión de los colores normal.

DICRÓMATAS

Daltónicos que solo disponen de dos tipos de conos. Se subdividen en dos grupos: los **protanopes**, que carecen de los conos que responden más a las luces con longitudes de onda larga (L), y los **deuteranopes**, a los que les faltan los conos que responden más a las longitudes de onda media (M).

TRICRÓMATAS ANÓMALOS

Tienen una visión cromática reducida, pero disponen de tres tipos de conos. Se encuentran a mitad de camino entre los tricrómatas comunes y los dicrómatas. Se subdividen en **protanomómalos** (personas con dos versiones del cono que responde más a las longitudes de onda medias, M y M') y **deuteranomómalos** (personas con dos versiones del cono que responde relativamente más a las luces de longitudes de onda largas, L y L').

de «ceguera a los colores»; el segundo, en cambio, de «visión cromática limitada».

La expresión «ceguera a los colores» era frecuente el siglo pasado. No obstante, debería evitarse porque lleva a pensar que los daltónicos ven su entorno como en una película en blanco y negro. Esa idea no se corresponde con la realidad: estas personas sí ven colores, aunque menos que los individuos con visión normal. La diferencia se debe a la existencia de los estímulos pseudoisocromáticos, los cuales son de diferente color las personas sin daltonismo, pero de colores similares para las daltónicas. Este fenómeno se observa, por ejemplo, cuando unos y otros miran un mapa de las líneas de metro (*véase el recuadro* «¿Cómo ven los colores los daltónicos?») o llevan a cabo la típica prueba visual de Ishihara, en la que se pide al sujeto que indique el número (punteado de colores similares) que aparece en la lámina.

Claves sobre la percepción cromática

En 1730, Isaac Newton (1643-1727) escribía: «[...] ya que los rayos, si se desea hablar adecuadamente, carecen de color. En ellos no hay más que cierta capacidad o disposición para generar la sensación de uno u otro color». Muchas personas creen, de forma errónea, que el color es una propiedad física que el sistema visual se limita a detectar. Piensan que la luz reflejada por la sangre es de

color rojo. También suponen que nuestros ojos poseen tres tipos de «detectores de colores», los cuales responden, respectivamente, a las luces rojas, verdes o azules. Desde esta perspectiva equivocada, parece lógico pensar que la carencia de «receptores de rojo» debe producir una «ceguera al rojo» y la incapacidad para detectar la presencia de dicho color en la luz.

Newton estaba en lo cierto al considerar que «los rayos carecen de color» y que es el sistema visual el que crea los colores en respuesta a algunas propiedades físicas de la luz. Las luces no son rojas —de hecho, no tienen ningún color—, pero las luces que acumulan más energía en las longitudes de onda largas (propiedad física) las vemos rojas (propiedad perceptiva que crea nuestro cerebro). De modo semejante, es la actividad del sistema visual (cerebro incluido) la que hace que un estímulo de 400 nanómetros (nm) suela verse violeta; otro de 450 nm, azul; uno de 500 nm, verde, etcétera.

Los humanos disponemos de dos tipos de células fotosensibles en la retina: los bastones (para ver en la penumbra) y los conos, que necesitan más luz pero posibilitan la visión en color. Hay tres tipos de conos que se diferencian según las longitudes de onda ante las que responden más. Así, los conos L responden sobre todo a las longitudes de onda más largas; los conos M a las medias, y los C, a las cortas. En la nomenclatura clínica



LOS AUTORES

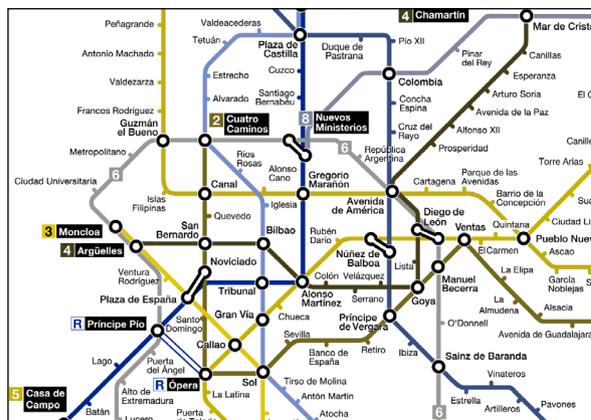
Julio Lillo, catedrático de ergonomía, Humberto Moreira, doctor en psicología, y Anna Melnikova, psicóloga, investigan la percepción del color en la Universidad Complutense de Madrid.

¿Cómo ven los colores los daltónicos?

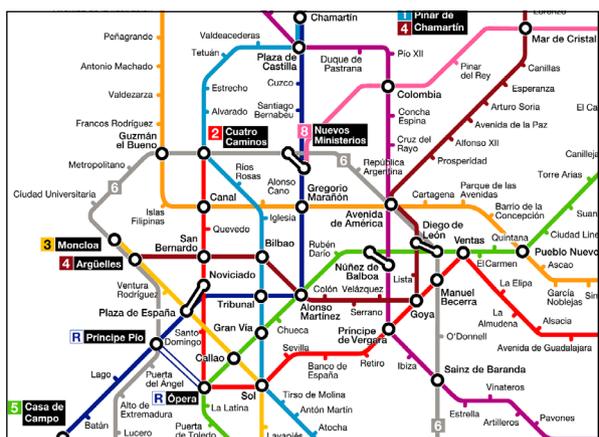
Fijese en estos mapas del metro de Madrid. El primero (A) muestra la amplia gama de colores (verde, naranja, rosa, rojo, etcétera), perceptible para las personas sin limitaciones en su visión cromática. El segundo (B) simula cómo ve el mismo mapa un usuario con daltonismo protanope (carente de los conos que responden más a las longitudes de onda largas). El tercero (C) corresponde a la visión de un daltónico deuteranope (carente de los conos de onda media). En ambos daltonismos se observa una importante reducción de la gama cromática de las líneas de metro. Y se aprecian estímulos pseudoisocromáticos, de diferente color para las personas comunes pero similares para los daltónicos. Por ejemplo, las líneas de metro verde y naranja en el mapa original (A) se ven amarillentas en la simulación protanope (B). Sin entrar en detalles, puede decirse que en estos daltonismos, la ausencia del cono L impide el funcio-

namiento del mecanismo rojo-verde. Por tanto, las líneas de color rojo-amarillento (naranja) y verde-amarillento pasan a verse solo amarillentas.

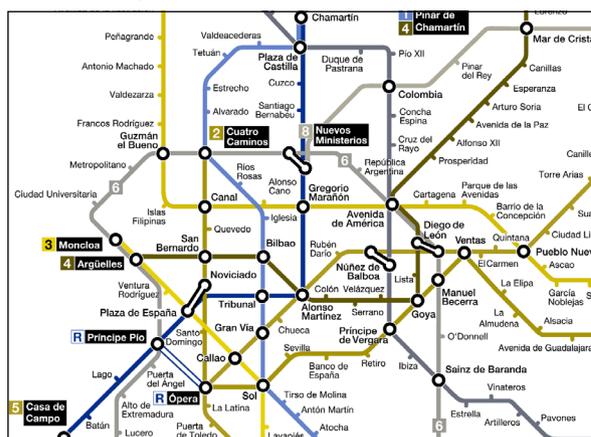
B. Protanope



A. Visión normal



C. Deuteranope



se llaman, respectivamente, protoconos (del griego *prōtos*, «primero»), deuterconos (*deúteros*, «segundo») y tritaconos (*trítos*, «tercero»).

Protanopes y deuteranopes son dicrómatas por tener dos, y no tres, tipos de conos en sus retinas. Sin embargo, la ausencia de conos L (protoconos) o M (deuterconos) no hace a estas personas «ciegas al rojo» o «ciegas al verde», puesto que los protoconos no son «detectores de rojo» ni los deuterconos «detectores de verde». Veamos el porqué.

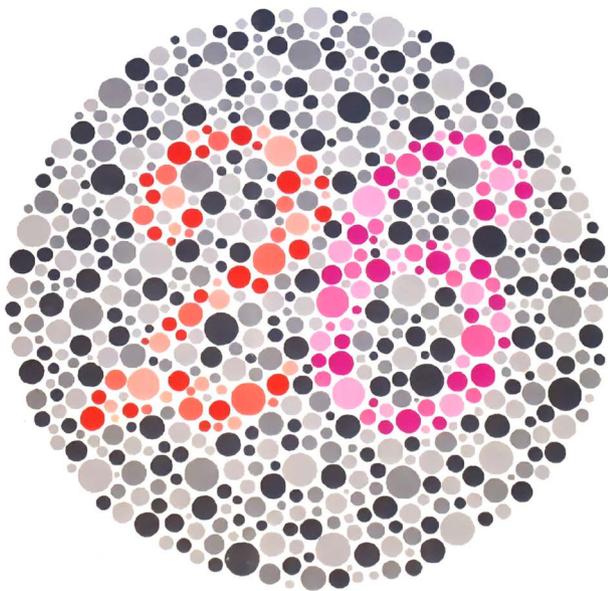
Todos los conos retinianos responden ante una gama amplia de longitudes de onda. En el caso de los L, la respuesta no solo se da ante las que se ven rojizas, sino ante anaranjadas, amarillentas y verdosas. Más aún, su máxima respuesta se produce ante una estimulación de unos 565 nm (verde-amarillenta) y no ante las de más de 620 nm (rojizas). Entonces, ¿qué efectos tiene la ausencia de conos L en los protanopes? Entre otros, hace que

perciban menos brillantes las luces que una persona común ve rojas. Esencialmente, porque las retinas de esta última responden con dos tipos de conos (M y L), mientras que los protanopes solo disponen de la muy débil respuesta que se genera en los conos M.

Confusión entre colores

Pensar que la activación de los protoconos produce experiencias de rojo, la de los deuterconos, de color verde, y la de los tritaconos, de azul, es tan absurdo como suponer que las cosas que vemos blancas deberían verse rojo-verde-azuladas porque mandan energía en muchas longitudes de onda a la retina y, con ello, activan los tres tipos de conos. Sin embargo, como ahora detallaremos, analizar las respuestas de los conos permite explicar la existencia de estímulos pseudoisocromáticos.

Simplificaremos la explicación considerando solo cinco niveles de respuesta en los conos: muy alto (++),



Shinobu Ishihara (1879-1963), profesor de la Universidad de Tokio, creó en 1917 el test que lleva su nombre, uno de los más antiguos y, sin duda, el más utilizado para detectar el daltonismo. Una persona sin problemas de visión reconoce en la lámina dos dígitos, el 2 y el 6, porque ve los puntos que los forman de colores diferentes a los del fondo. En cambio, un daltónico protanope (sin conos L) no ve el 2: para él, los puntos rojizos son isocromáticos (similares) a los grises del fondo. Lo mismo le sucede a un daltónico deuteranope (sin conos M) respecto al número 6.

alto (+), medio (0), bajo (-) y muy bajo (--). Así, el patrón de respuesta para una experiencia de blanco podría ser ++, ++, ++, esto es, respuestas muy altas en los conos L, M y C (de izquierda a derecha). La respuesta correspondiente a la experiencia de negro podía ser --, --, -- (mínima en los tres tipos de conos). Lógicamente, el patrón 0, 0, 0 correspondería a un gris medio.

Consideremos ahora los colores que permiten ver los números 2 y 6 en la lámina del test de Ishihara que aparece sobre estas líneas. Las tonalidades rojizas que forman el 2 derivan de que las respuestas de los conos L son mayores que las de los conos M y C. Por ejemplo, los rojos oscuros podrían producir el patrón de respuesta 0, -, -, y los rojos claros el +, 0, 0. En ambos casos, el valor L sería superior a los otros dos.

Analicemos ahora qué sucede en los protanopes. Solo disponen de dos tipos de conos funcionales (M y C), que tendrían para los rojos respuestas similares a las que producen los grises de claridad media (0, 0) o reducida (-, -). Tales grises serían, para estas personas, del mismo color que los rojos: serían pseudoisocromáticos, lo que haría imposible ver el número 2. Un análisis similar

permitiría explicar por qué los deuteranopes confunden ciertos morados (como el 6 en la lámina de Ishihara) con los puntos grises del fondo.

Además de la protanopia y la deuteranopia, los daltonismos incluyen dos tricromatismos anómalos: la protanomalia y la deuteranomalia. Los avances en genética han revelado que los daltónicos «anopes» y los «anómalos» se parecen en un aspecto esencial: ambos carecen del tipo de cono incluido en su denominación. De esta manera, protanopes y protanómalos no poseen conos L, y deuteranopes y deuteranómalos no disponen de conos M. ¿En qué se diferencian, entonces? Simplemente, en que los tricromatas anómalos disponen de dos versiones de un mismo tipo de cono: M y M', en el caso de los protanómalos, y L y L', en el de los deuteranómalos. Puesto que las diferencias en las respuestas en estos pares son menores que las que se producen entre los conos L y M de una persona con visión normal, los tricromatas anómalos presentan una menor capacidad para diferenciar estímulos y ven una gama de colores reducida. Puede decirse que, en muchos sentidos, su visión se encuentra a mitad de camino entre la de los tricromatas y la de los dicromatas.

El término daltonismo tiene su origen en John Dalton (1766-1844), un importante científico que trabajó a caballo de los siglos XVIII y XIX y que produjo notables contribuciones en los ámbitos de la química, las matemáticas y la meteorología. También describió su forma peculiar de ver el color, que comparó con la de las personas con una visión normal. Tales descripciones llevaron a pensar que Dalton era protanope, aunque los análisis genéticos posteriores indicaron que era deuteranope.

Los daltonismos son casi siempre de origen genético, binoculares (se presentan de manera similar en ambos ojos), tienen una frecuencia relativamente alta y afectan más a los hombres que a las mujeres, ya que se transmiten con carácter recesivo asociados al cromosoma X (parecido a lo que ocurre con la calvicie y la hemofilia). En España, algo más del 5 por ciento de la población masculina presenta daltonismo.

¿Debe impedirse pilotar a los daltónicos?

O'Brien obtuvo, en Australia, autorización para trabajar como piloto de una línea aérea, a pesar de sus limitaciones para diferenciar colores. En muchos países, este hecho se consideraría una temeridad, pues se supone que pilotar un avión comercial exige una visión cromática perfecta. En cambio, la Asociación Australiana de Pilotos con Visión Cromática Limitada (CVDPA) entiende ese argumento como una discriminación laboral hacia los daltónicos, ya que impide ejercer una actividad profesional a personas capacitadas para ella. ¿Quién tiene razón?

En gran parte del mundo se siguen las recomendaciones de la Organización Internacional de Aviación Civil (OIAIC). Entre estas destaca la evaluación de la visión cromática mediante el test de Ishihara o alguna otra

prueba similar incluida en la exploración médica de los candidatos a piloto. Si se manifiestan alteraciones, por lo general solo se podrá obtener una licencia de piloto privado para volar durante el día. En cambio, si se superan esas pruebas, se obtendrá la licencia ATPL que permite pilotar cualquier tipo de avión (particular o comercial), en cualquier rol (capitán, copiloto, etcétera) y a cualquier hora (de día y de noche). La OIAC fundamenta su recomendación con dos argumentos principales: en primer lugar, el color constituye una fuente de información habitual en los entornos de vuelo; segundo, debido a lo anterior, pilotar de forma segura exige una buena visión cromática. En la actualidad, Australia es el único país que permite que una persona con daltonismo pueda ejercer de piloto comercial, derecho que ha costado años de lucha en los juzgados.

La primera premisa de la OIAC resulta incuestionable. En múltiples situaciones, tanto en la cabina del avión como en el exterior, los colores son un medio de información para los pilotos: aparecen en las pantallas y los controles, en los mapas y las cartas de vuelo, en las balizas de los aeropuertos y las luces de navegación, en las guías de pista, etcétera. Pero este hecho no implica que la segunda premisa sea cierta: que las informaciones cromáticas de un entorno posibiliten efectuar una tarea no implica la exigencia de emplearlas. Si así fuese, no se permitiría conducir coches a los daltónicos. Incluso desplazarse como peatones por la ciudad podría suponerles un peligro, puesto que no sabrían interpretar la señal de los semáforos. Veamos por qué no es así.

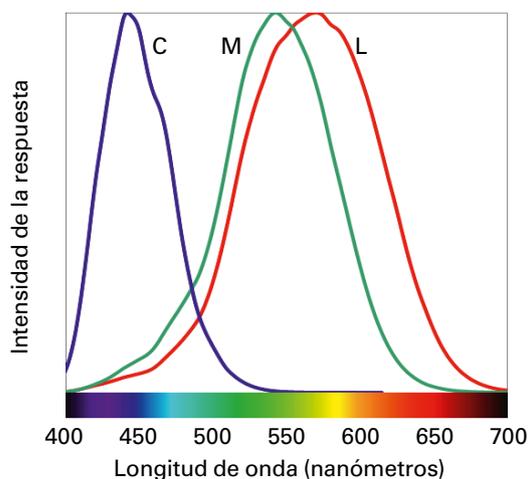
Por lo general, los peatones se guían por el color de la luz de los semáforos: se detienen cuando se enciende el disco rojo y cruzan cuando se ilumina el verde. Eso no impide que existan otras alternativas de uso. Una sería atender a la posición de la luz: no se debe cruzar cuando se ilumina la de arriba pero sí cuando lo está la de abajo. Otra estrategia consiste en poner atención al sonido que emiten los semáforos adaptados para peatones invidentes. Este es solo un ejemplo de los numerosos dispositivos y

las múltiples situaciones cotidianas que son informativamente redundantes de acuerdo a las recomendaciones internacionales. De este modo, personas de distinta índole con o sin limitaciones actúan de forma adecuada, aunque atiendan a claves distintas.

Diferenciación y categorización de colores

Las personas sin dificultades en la visión cromática, es decir, tricrómatas comunes, diferencian más de dos millones de colores, pero utilizan un número mucho menor de palabras para denominarlos. Con frecuencia usan uno de los términos básicos de color (TBC). En español son: rojo, verde, azul, amarillo, blanco, negro, gris, naranja, morado (o violeta), rosa y marrón. Cada TBC se aplica a numerosos colores discriminables entre sí, pero que tienen algo en común, por lo que conforman una categoría. Por ejemplo, el término-categoría *verde* incluye estímulos más o menos claros, más o menos azulados, más o menos amarillentos, más o menos vivos, etcétera. Todos estos colores tienen algo en común: permiten apreciar una tonalidad verdosa (*véase el recuadro «Reducción de la gama de colores»*).

Los daltónicos ven una gama reducida de colores porque no experimentan algunas de las sensaciones que normalmente se usan para agrupar colores en una misma categoría (por ejemplo, las de verdoso, rojizo, anaranjado, etcétera). Si todosuviésemos daltonismo, muy probablemente nuestro idioma incluiría solo cinco o seis TBC. Sin embargo, los daltónicos son una minoría que se ve obligada a usar un sistema de once TBC muy adecuado para los tricrómatas, pero no para ellos. Con todo, desarrollan algunas estrategias que les permiten utilizar los TBC de forma parcialmente similar a la de la mayoría de las personas. Un ejemplo: los daltónicos protanopes y deuteranopes ven azules muchos estímulos que los sujetos con visión normal ven azules o, alternativamente, morados. Por ello tienen dificultades para saber cuándo usar cada una de estas categorías. Sin embargo, pueden aprender que el término «morado» tiende a emplearse

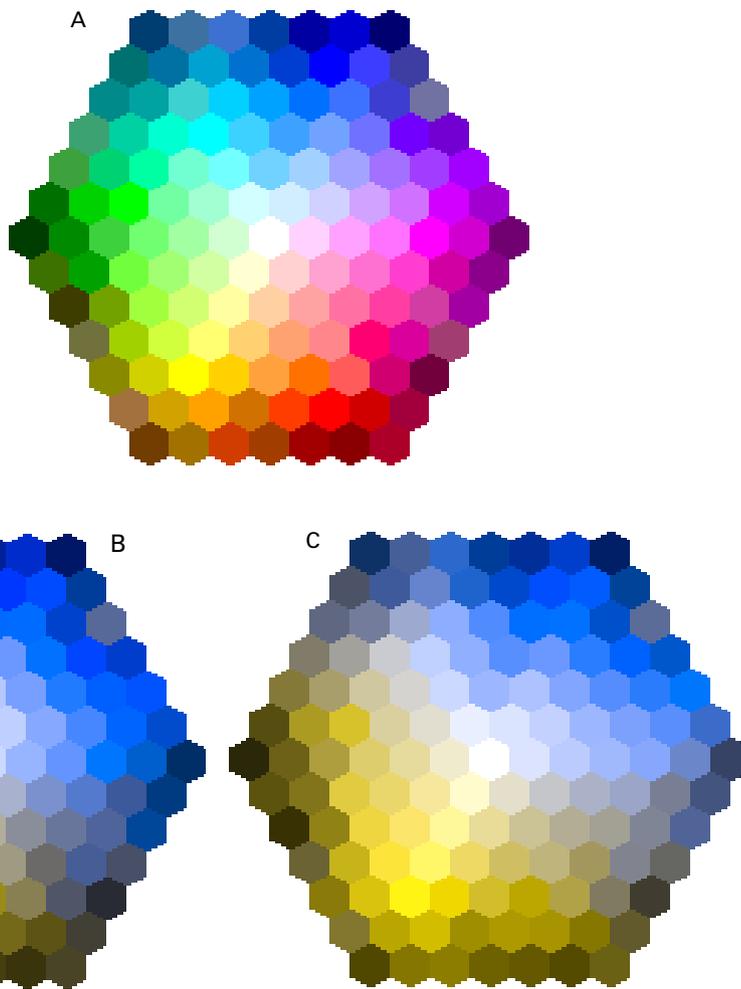


Los tres tipos de conos retinianos responden a una amplia gama de longitudes de onda. Los más sensibles a las largas (conos L) dan su máxima respuesta ante estímulos puros (monocromáticos) de unos 565 nanómetros (nm). Los más sensibles a las longitudes medias (conos M) y cortas (conos C) lo hacen ante estímulos de, respectivamente, 545 y 440 nm. Con todo, los tres tipos de conos responden ante una gran gama de longitudes de onda. Por ejemplo, los L lo hacen de manera notable entre unos 490 y 650 nm.

VISIÓN

Reducción de la gama de colores

El hexágono grande *A* presenta una muestra de colores (un color en cada hexágono pequeño). Para una persona sin daltonismo, todos son diferenciables (no hay dos iguales), aunque algunos puedan incluirse en una misma categoría (rojo, naranja, verde, azul, amarillo, etcétera). Por ejemplo, la categoría *verde* incluye colores verdosos que, además, son claros, oscuros, saturados, algo amarillentos o azulados, etcétera. Las figuras *B* y *C* simulan las gamas de colores que experimentan los daltónicos protanopes (sin conos L) y deuteranopes (sin conos M) al ver la imagen original (*A*). Comparar estas simulaciones con el original permite localizar estímulos pseudoisocromáticos, es decir, aquellos que los daltónicos ven de colores idénticos pero que las personas comunes perciben de colores diferentes (rojo, morado o naranja). Aunque los daltónicos carezcan de algunas sensaciones cromáticas, no es extraño que utilicen los mismos nombres («rojo», por ejemplo) para denominar estímulos que ellos ven de otro color.



cuando ellos experimentan azules poco vivos. A partir de esa información, se acostumbran a emplear la palabra «morado» en esas circunstancias y a denominar «azules» a los estímulos que perciben de un azul más vivo o saturado.

El accidente de aviación de Tallahassee

La noche del viernes 26 de julio de 2002, un Boeing 727 de la compañía FedEx Express que viajaba sin pasajeros se estrelló al aterrizar en el aeropuerto de Tallahassee, en Florida. Ninguno de los tres tripulantes (capitán, copiloto e ingeniero de vuelo) resultó herido de gravedad, aunque el avión quedó destrozado. El informe oficial del accidente señalaba la limitada visión cromática del copiloto como posible causa del percance. Supuestamente, su daltonismo le dificultó usar la información del Indicador de Trayectoria de Aproximación, un dispositivo de luces (más conocido entre los profesionales como PAPI, por su acrónimo inglés) que indica desde la pista

de aterrizaje la adecuación de la posición del avión para tomar tierra. La importancia del accidente de Tallahassee radica en su excepcionalidad: es el único que se menciona en el *Manual de medicina aeronáutica civil*, texto de referencia de la OIAC para justificar la recomendación de limitar el acceso de los daltónicos a la aviación comercial.

El PAPI emplea cuatro luces horizontales, de color variable, para indicar la adecuación del ángulo de aproximación a la pista. Un piloto con visión normal ve dos luces rojas y dos blancas cuando el ángulo es correcto. Cualquier otra combinación indica ángulos inadecuados por exceso (más luces blancas) o defecto (más luces rojas). Aunque protanopes y deuteranopes no ven en el PAPI los mismos colores, pueden interpretar su información de manera adecuada: dos pares de luces con colores distintos indican que el ángulo es correcto.

Dos son las principales razones para descartar que el accidente de Tallahassee se debiese al daltonismo del

Información para el aterrizaje

El Indicador Preciso de Trayectoria de Aproximación (PAPI, por sus siglas en inglés) informa a los pilotos sobre el ángulo de aproximación a la pista de aterrizaje mediante un código de colores. Para una persona sin problemas de visión cromática (A), un ángulo correcto produce dos luces rojas a la izquierda y dos blancas a la derecha. Más de dos luces blancas indican un ángulo excesivo (el avión se aproxima desde muy arriba), y más de dos rojas, uno escaso. Las simulaciones muestran que los daltónicos protanopes y deuteranopes (B y C) ven colores distintos, pero tienen acceso a la misma información: dos pares de luces con colores diferentes indican un ángulo correcto; cualquier otra combinación indica que el ángulo es incorrecto.



copiloto. En primer lugar, como acabamos de mostrar, aunque los daltónicos vean colores diferentes en el PAPI, esto no afecta a su capacidad para interpretar la información. En segundo lugar, los otros dos miembros de la tripulación, que no eran daltónicos, tuvieron acceso a la misma información que el copiloto, y tampoco la utilizaron adecuadamente. Que los tres respondiesen de forma similar no debe sorprender si se considera que los sistemas de vuelo se diseñan primero sin colores y que estos se añaden posteriormente, tras comprobar que el dispositivo funciona de manera adecuada.

En la aviación, como en otras muchas profesiones y actividades, no debe restringirse «por norma» el acceso a las personas con visión cromática limitada. Antes hay que comprobar si la disfunción supone un problema real para que este tipo de personas desempeñen las tareas de forma correcta. Si es así, debe considerarse la posibilidad de modificarlas. Por ejemplo, imagine que algunos golfistas daltónicos se quejasen de que les cuesta localizar pelotas naranjas sobre el césped de un campo de golf. La razón sería que verdes y naranjas pueden ser pseudoisocromáticos. Primera solución: sustituir las pelotas naranjas por blancas que contrastarían perfectamente con el césped. Segunda solución: proporcionar gafas amarillo-anaranjadas a los jugadores daltónicos, de esa manera verían las pelotas más claras y el césped más oscuro.

En Australia hace más de 25 años que los daltónicos forman parte de las tripulaciones de aviones comerciales. En todo este tiempo no se han registrado accidentes directamente atribuibles a limitaciones en la visión cromática de los pilotos, lo que permite concluir que tal visión, aunque pueda resultar útil para muchas personas, no es imprescindible para volar con seguridad. Ni, como hemos visto, para realizar otras muchas actividades cotidianas. ★

PARA SABER MÁS

The genetics of normal and defective color vision. J. Neitz y M. Neitz en *Vision Research*, vol. 51, n.º 7, págs. 633-651, 2011.

Percepción del color y daltonismos: descripción, diagnóstico e intervención. J. Lillo y H. Moreira. Pirámide, Madrid, 2013.

An experimental method for the assessment of color simulation tools. J. Lillo, L. Álvaro y H. Moreira en *Journal of Vision*, vol. 14, n.º 8, págs. 1-19, 2014.

Color preferente in red-green dichromats. L. Álvaro et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, n.º 30, págs. 9316-9321, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Genes para ver los colores. Jeremy Nathans en *IyC*, abril de 1989.

Con más colores. Christoph Koch en *Myc* n.º 56, 2012.