

Sensopercepción del color

Dr. Ariel Prado Serrano, Dra. Jiny Tatiana Camas Benítez, Dra. Lisbet Laredo Mendiola

RESUMEN

La percepción del color o la visión del color es la capacidad de percibir y discriminar entre las luces sobre la base de su composición de longitud de onda. El principal componente de un color es la longitud de onda de la luz y, para una sensación de color determinada, existen tres dimensiones psicológicas: La saturación, o pureza de la longitud de onda; el matiz, significado común de color; y la brillantez, o percepción de la cantidad de luz emitida por una fuente o reflejada por una superficie. El proceso de combinar diferentes longitudes de onda de luz a fin de producir colores nuevos se denomina mezcla aditiva de color, existiendo fenómenos de postimagen y contraste sucesivo ante efectos de fatiga debidos a estimulación prolongada en una región de la retina. Los efectos de alguna experiencia pasada sobre el color aparente se deben, según se considera, a la memoria de colores.

Existen varias teorías acerca de los diversos fenómenos de la percepción del color. La teoría tricromática sostiene que el color se codifica mediante tres conos distintos que absorben, en forma selectiva, longitudes de ondas de luz cortas, medias o largas. La teoría de oposición sugiere que existen mecanismos neurológicos en las células ganglionares de la retina y en las capas parvocelulares del núcleo geniculado lateral con una actividad específica que identifica ondas de luz específicas que incrementan o reducen selectivamente la actividad específica del receptor para cada color determinando así la percepción del color. Los defectos en la percepción cromática se reconocen como una característica recesiva vinculada al sexo y transmitida genéticamente, y ocurren como tal especialmente en el sexo masculino. Además de los monocrómatas, que no distinguen el color, existen tres manifestaciones de ceguera al color: protanopía (pérdida de la visión para longitud de onda larga), deuteranopía (pérdida de la visión para longitud de onda media) y tritanopía (pérdida de la visión para longitud de onda corta).

Palabras clave: Color, longitud de onda, dimensiones psicofísicas, teorías de color, deficiencias perceptuales de color.

SUMMARY

Color perception is the complex capacity to perceive and discriminate different sources of light related to wave longitudes. Main color components are light wave longitudes, a process that includes three different psychological dimensions: saturation, considered the wave longitude purity, shade, being the common mixing of light and brightness, which is the quantity of light produced by a specific source or the amount of light reflected from a surface. The process to combine different light wave longitudes in order to create new colors is named color additive mixture, a phenomenon which has a post image and successive contrast physical qualities in conditions of extreme fatigue after long light receptor stimulation in specific regions of the retinal surface. The specific effects of past experiences related to color perception is considered to elaborate the specific memory for colors.

There are several explanations about the color perception. The trichromic receptor theory holds that the color perception is coded according to three different types of retinal cone cells that selectively process short, medium and high light-wave longitudes. The opponent process theory suggests that there are neurological mechanisms in the ganglion retinal cells and parvocellular layers of the geniculate lateral nuclei with a specific pattern activity that identifies specific light waves and selectively increases or decreases the specific receptor stimulation for each color creating the color experience. Color perception defects are recognized as a recessive characteristic sex-linked genetically transmitted with a high incidence in the male gender. Besides those subjects who are not able to perceive any color known as monochromats, there are other color specific deficiencies to red, (tritanopia) green (deuteranopia) and blue (protanopia).

Key words: Color, wave length, psychophysical perception, color theories, perceptual deficiencies.

Hospital General de México

Correspondencia: Dr. Ariel Prado Serrano. Servicio de Oftalmología, Hospital General de México. Dr. Balmis 144 Col Doctores. Del Cuauhtémoc tel. 10350569. Correo electrónico: ariprase@hotmail.com / ariuiamx@yahoo.com.mx

INTRODUCCIÓN

La percepción del color o la visión del color es la capacidad de percibir y discriminar entre las luces sobre la base de su composición de longitud de onda. Han sido pocos los aspectos de la percepción que han tenido una historia tan persistente, controvertida e inconclusa como la percepción del color. No es difícil ver por qué tanto interés ha sido generado por los problemas de la naturaleza de la percepción del color.

El color es una característica viva del ambiente, que no sólo especifica determinado atributo fundamental o cualidad de las superficies o de los objetos, sino que, en el caso del hombre, tiene profundos efectos de carácter estético y emocional. Es decir, crea una experiencia altamente personal que resulta afectada por las asociaciones y por la preferencia personal (1).

DIMENSIONES DEL COLOR

Las sensaciones cromáticas se relacionan en formas constantes y mensurables con las características físicas de la luz. Para describir esta relación, primero deben identificarse las dimensiones de los estímulos de la visión de color.

Matiz (Tinte)

El principal componente físico obvio de un color es la longitud de onda de la luz reflejada que lo produce. Sin embargo, hay tres atributos físicos de la luz que determinan en realidad la sensación cromática: la longitud de onda, la intensidad y la pureza espectral. Cada uno de estos atributos se relaciona con una cualidad psicológica específica de la sensación cromática: el matiz, la brillantez y la saturación, respectivamente, entonces ¿es el color producto del sistema visual y no una propiedad inherente del espectro visible?

Wright (en un ensayo titulado *The Rays Are Not Colored*, 1963, 1967) resume acertadamente esta distinción importante entre la dimensión física que especifica la longitud de onda y el fenómeno psicológico de la visión de color:

“Nuestras sensaciones cromáticas están dentro de nosotros y el color no existe a menos que haya un observador que lo perciba. El color no existe ni siquiera en la cadena de sucesos que ocurren entre los receptores de la retina y la corteza visual, sino sólo cuando la conciencia del observador interpreta finalmente esa información”.

En consecuencia, los objetos parecen tener color porque reflejan determinadas longitudes de onda de la luz a nuestro sistema visual. Cuando la luz "blanca" del Sol ilumina una superficie u objeto, pigmentos sensibles a la luz dentro de su superficie absorben algunas de las longitudes de onda y reflejan otras.

El color percibido de una superficie u objeto se basa en las longitudes de onda de la luz que refleja. Por ejemplo, a los seres humanos les parecen amarillas las longitudes de onda de aproximadamente 580 nm; así sucede con un limón cuando lo ilumina una luz blanca; de hecho, la cáscara de un

limón parece amarilla porque absorbe la mayor parte de las longitudes de onda que inciden en él salvo una pequeña banda de longitudes de onda de unos 590 nm, lo cual significa que el limón refleja predominantemente las longitudes de onda de alrededor de 580 nm que parecen amarillas. De igual modo, las longitudes de onda de unos 500 nm parecen verdes para la mayoría de los individuos; por ejemplo, las hojas de lechuga se ven verdes porque absorben la mayor parte de las longitudes de onda y refleja las que se hallan en la región de los 500 nm. En comparación con ambos ejemplos, los zapatos negros parecen negros porque absorben casi toda la luz que los ilumina y esta página parece blanca porque refleja casi toda la luz que incide en ella en forma más o menos uniforme.

NATURALEZA DEL COLOR

Aunque se reconoce que el principal componente de un color es la longitud de onda de la luz, para una sensación de color determinada existen realmente tres dimensiones psicológicas; un color tiene los atributos de matiz, brillantez o intensidad y saturación.

Saturación

Es evidente que el color más puro que puede obtenerse corresponde a un matiz monocromático o espectral y, conforme se le añaden otras longitudes de onda, o luz blanca, parecerá volverse “deslavado”. Este atributo psicológico de la apariencia del color se conoce como saturación.(2). La saturación corresponde a la pureza (llamada pureza colorimétrica) de la longitud de onda. La adición de otras longitudes de onda, la luz blanca, o la adición de gris a una longitud de onda única, reduce su pureza (1).

Matiz

El matiz corresponde al significado común de color. Si un color cuenta con un tinte espectral reconocible, es percibido como azul, verde, amarillo o rojo. El matiz generalmente varía con los cambios de longitud de onda. Reconocer la estrecha relación entre la longitud de onda de la luz y la sensación cromática permite entender por qué el cielo aparece normalmente azul. Esta coloración se debe a una clase especial de reflexión de la luz que ocurre en una atmósfera como el cielo, la cual contiene moléculas de gases, vapor de agua y polvo. Cuando la luz del Sol atraviesa la atmósfera de la Tierra, moléculas de diversos gases esparcen la luz, pero esparcen selectivamente más las longitudes de onda corta de apariencia azul (las longitudes de onda larga). De igual modo, cuando hay mucho polvo y humedad en la atmósfera, estas partículas más grandes esparcen las longitudes de onda más larga, haciendo que el cielo azul parezca más pálido.

La niebla y las nubes parecen blancas porque contienen partículas de agua, que son partículas más grandes; tales partículas actúan como tractores difusos de la luz, reflejando todas las longitudes de onda visibles casi de la misma

forma, lo que produce una apariencia blanca de las nubes. En contraste, a una distancia de 16 km por encima de la superficie terrestre, no hay partículas de ninguna índole que esparzan la luz del Sol y el cielo luce negro (1).

Brillantez

Existen dos importantes medidas de nuestra percepción subjetiva de la intensidad de la luz; estas no son medidas físicas sino medidas de nuestras respuestas perceptuales. La primera de ella es la brillantez, o percepción de la cantidad de luz emitida por una fuente o reflejada por una superficie. Por consiguiente, brillantez es la característica psicológica que corresponde más o menos a las medidas físicas de luminiscencia y luminancia. La segunda medida es la luminosidad, o percepción de la fracción porcentual de luz reflejada en relación con la luz total que cae en una superficie. La luminosidad es la correlación psicológica de la medida física de la reflectividad (2). Cualquier color también se especifica en función de brillantez, la cual varía de acuerdo con la intensidad. La brillantez se relaciona con intensidad de la luz y cuanto más intensa es la luz, más brillante parece; disminuir la intensidad produce una apariencia más oscura. Sin embargo, para una determinada intensidad, algunos tintes, como el amarillo, aparecen más brillantes que los que son producidos por las longitudes de onda más corta, como el azul. Además, el tinte percibido de un estímulo cambiará ligeramente dependiendo la intensidad de éste. Si se incrementa la intensidad (luces con longitud de onda relativa-

mente larga, como amarillo-verdes y amarillo-rojos, estas luces no sólo parecerán más brillantes, sino que también darán un matiz más amarillo. De igual manera, la luz de longitud de onda corta que se percibe como azul y violeta empieza a aparecer más azul cuando se incrementa su intensidad (cambio de Bezold-Brücke). Si combinamos los tres atributos psicológicos, matiz, saturación y brillo, obtenemos algo parecido a los que se muestra en la figura 1.

En general, los colores puros generados por una sola longitud de onda -colores monocromáticos- son poco frecuentes y, cuando se dan, es sólo en condiciones precisas de laboratorio. Muy a menudo la luz que llega al ojo está compuesta por una mezcla de longitudes de onda siendo importante recordar un aspecto ya señalado: los colores que uno percibe se basan en las respuestas del sistema visual a las diferentes longitudes de onda de la luz. La mezcla no influye en las longitudes de onda en sí, siendo las mezclas aditivas del color muy importantes para entender la percepción del color.

MEZCLA ADITIVA DE COLOR

El proceso de combinar diferentes longitudes de onda de luz a fin de producir colores nuevos se denomina mezcla aditiva de color (2). Las mezclas aditivas de color se generan cuando las luces con varias longitudes de onda se combinan en el sistema visual. Esto significa que uno suma los efectos -las excitaciones visuales- de las diferentes longitudes de onda en el sistema visual. Así, cuando uno observa una mezcla aditiva de un verde de 530 nm y un rojo de 650 nm, experimenta sus efectos combinados -los efectos de una luz verde de longitud de onda media más los efectos de una luz roja de longitud de onda larga en el sistema visual (1). Las figuras 2 y 3 muestran el resultado de mezclar las luces correspondientes a las tres longitudes de onda primarias: rojo, verde y azul.

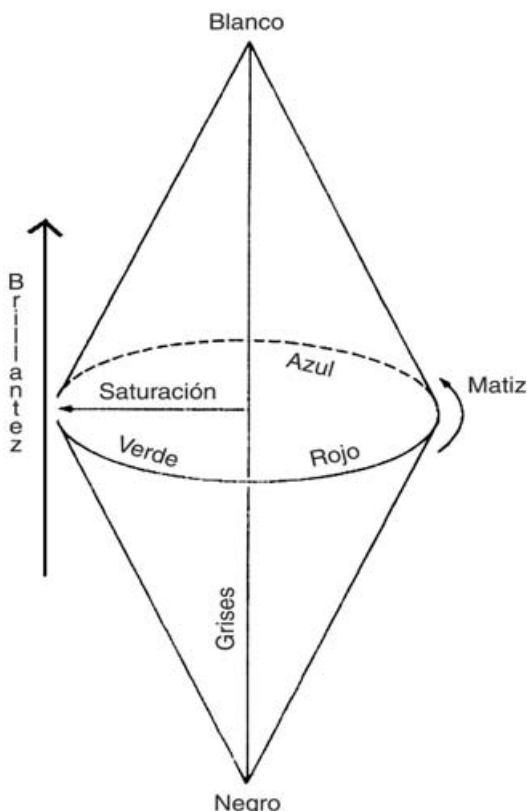


Fig. 1. Huso o sólido cromático.

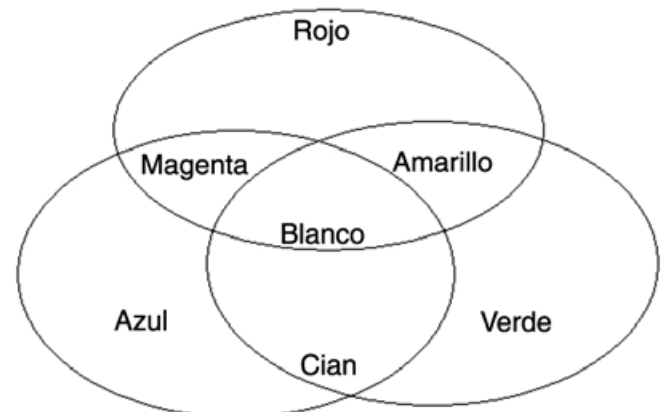


Fig 2. Sistema de mezcla de colores: Aditivo.

MEZCLA SUSTRACTIVA DE COLOR

Cada pigmento que se añade a la mezcla tiene como resultado que se absorben más longitudes de onda y, por lo tanto, se refleja menos luz hacia el ojo del observador (2). Este es el principio del círculo cromático que se aplica a la mezcla de luces de color pero no a los pigmentos, pinturas o tintes. En el primer caso se están combinando luces, ya que las luces de color añaden a la mezcla sus longitudes de onda dominantes. Es un proceso aditivo en el sentido de que los efectos (la activación de los receptores) de las longitudes de onda se suman en el sistema nervioso. En contraste, los pigmentos de color absorben selectivamente o sustraen algunas de las longitudes de onda que les llegan y reflejan las longitudes de onda restantes que dan al pigmento su matiz único (1).

De esta manera, las mezclas sustractivas de color se basan en el hecho de que el color o la superficie de un objeto depende de las longitudes de onda que refleja. Una superficie azul parece de este color porque el pigmento de la superficie absorbe o sustrae todas las longitudes de onda, menos las de la luz que parece azul. Por esto mismo, cuando la luz blanca incide sobre una superficie, sus longitudes de onda «azules» se reflejan de manera predominante a los ojos del observador en tanto que las otras longitudes de onda se absorben en grado considerable (1).

De manera similar, el resultado de mezclar dos pigmentos supone una absorción o sustracción mutua, anulando la reflectividad de todas las longitudes de onda excepto aquellas que reflejan conjuntamente los dos pigmentos. Como ejemplo de la diferencia entre las mezclas aditiva y sustractiva, considérese la combinación de los colores complementarios azul y amarillo. Como luces, la mezcla produce gris, o sea, una suma de las dos regiones espectrales representadas por

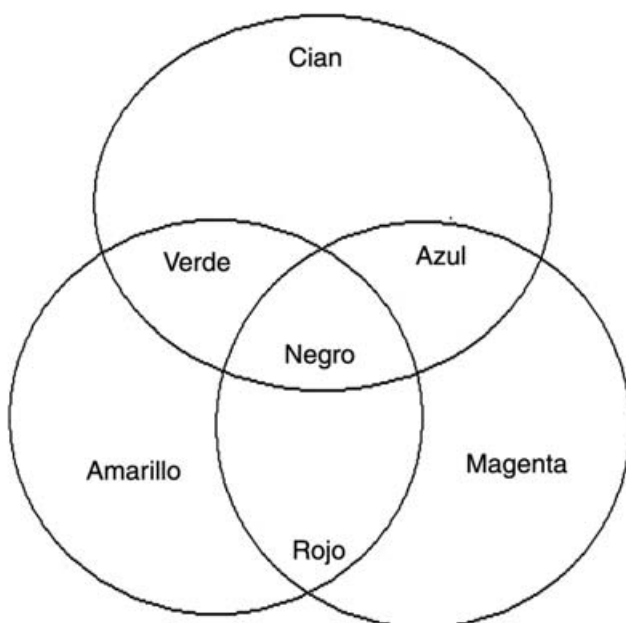


Fig. 3. Sistema de mezcla de colores: Sustractiva.

azul y amarillo, en tanto que como pigmentos, su absorción combinada produce la reflexión de longitudes de onda que aparecen como predominantemente verdes. Es decir, todas las longitudes de onda, excepto las que se ven como verdes, se absorben en la combinación. En la práctica, es una cuestión muy compleja predecir de manera exacta el matiz resultante de una mezcla de pigmento porque el matiz de la combinación depende considerablemente de las propiedades físicas y químicas de los pigmentos constituyentes, así como de la composición espectral de la luz incidente.

POSTIMAGENES

La exposición prolongada a un estímulo de color también produce un cambio en la percepción del matiz. Por ejemplo, si viera su entorno a través de un filtro rojo oscuro durante un lapso suficiente, encontraría que al retirar el filtro el mundo tomaría un tinte azul-verde. Esta fatiga de una respuesta específica al color se conoce como adaptación cromática. Cuando los efectos de la fatiga debidos a la estimulación prolongada se ubican en una sola región de la retina, se denominan post imágenes (2). El modo común de demostrar las postimágenes es hacer que el observador mire o fije la vista sobre una mancha o configuración de un estímulo durante un intervalo de aproximadamente 30 a 60 seg, después de lo cual la mirada pasa a otra superficie. Existen dos tipos de postimágenes: una que es mucho menos frecuente y más transitoria, se llama postimagen positiva, en el sentido de que la postimagen mantiene las mismas relaciones de intensidad blanco y negro y los mismos colores que el estímulo original. Las postimágenes positivas ocurren con una frecuencia mucho mayor después de una estimulación breve, pero intensa, del ojo adaptado a la oscuridad (1). Las postimágenes negativas que ocurren con mayor frecuencia, aluden a la persistencia de la imagen más allá del estímulo original, pero en un estado invertido. Es decir, la imagen ocurre con los efectos de blanco y negro o cromáticos invertidos, como en el negativo de una fotografía (1).

Contraste sucesivo y simultáneo

Si se fija la mirada en un estímulo cromático, la postimagen estará en el color complementario del estímulo inicial, esto a menudo se llama contraste sucesivo. Haciendo uso del complementario de un color, pueden producirse efectos cromáticos antinaturales. Si se fija la vista en una mancha azul durante un minuto, después del cual se pasa la mirada a una superficie amarilla, la superficie aparecerá excesivamente saturada o "supersaturada". Lo que ha ocurrido es que la postimagen de la mancha azul (amarilla) se ha proyectado en la superficie amarilla. Esto es funcionalmente equivalente a hacer que la misma área retiniana sea más sensible a su complementario, que es el amarillo. O sea, una exposición suficiente de una región de la retina al color azul aumenta la sensibilidad de esa región retiniana al amarillo. De esta manera, cuando una inspección de la mancha azul fatiga a los

receptores que normalmente son mediadores de una sensación azul, resulta una postimagen amarilla; si luego se dirige la mirada hacia una superficie amarilla, la mezcla aditiva de la postimagen amarilla y la superficie amarilla hacen que la superficie amarilla parezca más saturada que lo normal.

Se aprecian efectos similares con el contraste simultáneo o, como suele llamárseles, inducción espacial del complementario: después de una fijación continua de una mancha de estímulo cromático colocada contra un fondo neutral o gris, el borde del fondo que bordea la mancha parece estar matizado por su complementario. Esto ocurre porque con una inspección continua, la mancha de color pierde su saturación (que coincide con la adición de su complementario). Como los ojos se mueven ligeramente, incluso durante la fijación, la imagen retiniana de la mancha no es estacionaria, y la saturación disminuida, o ligera apariencia del complementario de la mancha, aparece en sus bordes. Si el complemento del color se sustituye por el fondo neutro, el matiz complementario común de la mancha se suma con el fondo cromático para producir una «súper saturación» simultánea en los bordes de la mancha. En muchos casos la visión resulta afectada por la penetración simultánea de partes adyacentes de colores que son complementarios entre sí.

MEMORIA DE COLORES

Con frecuencia, el color que se recuerda de los objetos conocidos difiere de su color real. Los efectos de alguna experiencia pasada sobre el color aparente se deben, según se considera, a la memoria de colores. Duncker (1939) utilizó recortes de una hoja verde y de un asno hechos del mismo material (de fieltro verde). Ambos estímulos se mostraron de manera sucesiva con una iluminación rojiza oscura que era complementaria del color de los recortes; de esta manera, el recorte de cada estímulo reflejaba el mismo gris (4). Según Duncker, la experiencia anterior con objetos asociados con estas formas influye en su color aparente, de manera que el recorte de la hoja, comúnmente verde, debería aparecer más verde que el recorte del asno, que es característicamente gris (4). El resultado fue el siguiente: las igualaciones del color aparente de cada estímulo, hechas en un círculo cromático, indicaron que la cantidad de verde necesaria para igualar el color del recorte de la hoja era aproximadamente dos veces el necesario para igualar el color del recorte del asno. Es decir, aunque ambos estímulos reflejaban la misma luz gris, el recorte de la hoja, supuestamente debido a la influencia del recuerdo del color, resultó ser un poco más verde que el recorte del asno.

La conclusión obvia es que las asociaciones previas de color y forma (memoria del color) ejercen un efecto apreciable sobre el color que se percibe. En algunas ocasiones este experimento se ha repetido y se han confirmado sus hallazgos esenciales. En otro estudio realizado por Bartleson, Newhall, Burnham y Clark, se presentaron muestras de color a un grupo observadores y luego se les pidió que las relacionaran

con un conjunto de fichas de color, cometiendo errores sistemáticos. Cuando se les pidió que recordaran colores brillantes, tendieron a elegir fichas de mayor brillantez, y más oscuras cuando se les pidió que recordaron colores oscuros (11). Asimismo, cuando se nos pide que recordemos y relacionemos los colores de objetos familiares con matices característicos, recordamos manzanas o tomates más rojos que los reales; los plátanos son más amarillos en la memoria que en la penca y el pasto más verde que en el prado.

CONSTANCIA DEL COLOR

Como se ha considerado, la longitud de onda refleja la superficie de un objeto, factor que determina el color. Sin embargo, en la visión natural, la luz que refleja una superficie no sólo depende de las longitudes que refleja, sino también de la luz que ilumina la superficie. Si cambian los componentes espectrales (las longitudes de onda) que iluminan un objeto, también cambian las longitudes de onda de la luz reflejada.

La tendencia del color de un objeto a permanecer constante, sin cambios en la longitud de onda en la luz, se denomina constancia del color. La constancia del color es tan común que normalmente no somos conscientes de ella.

TEORÍAS DE PERCEPCIÓN DEL COLOR

Ha habido muchas explicaciones teóricas de los diversos fenómenos de la percepción del color. Sin embargo, son dos las explicaciones principales que coinciden más con los datos empíricos. Por tanto, nos limitaremos a hablar principalmente de ellas.

Teoría de Young-Helmholtz (teoría del receptor tricromático)

El fenómeno de la mezcla del color, aunque es una teoría cierta e independiente, hace suponer ciertos mecanismos estructurales, funcionales y nerviosos de la retina. Como tres longitudes de onda distintas y separadas son suficientes para producir casi todos los colores perceptibles, igualmente es posible que existan tres conjuntos de receptores (conos) en el ojo, que respondan diferencialmente a diferentes longitudes de onda; es decir, la contribución neural de cada conjunto de receptores puede variar en forma apropiada para determinada luz espectral en el ambiente. Evidencias fisiológicas sólidas apuntan a la existencia de un sistema de tres receptores en el plano de la retina. Existen tres grupos distintos de conos, cada uno de los cuales es sensible en grado máximo a una longitud de onda diferente. En realidad, se segregan tres clases de fotorpigmentos en tres clases de conos.

En 1802, el científico inglés Thomas Young postuló tal teoría del receptor tricromático. Basando su teoría en la suposición de que existen tres tipos diferentes de receptores en

la retina humana, cada uno de ellos sensible a la luz de una composición espectral específica; propuso que cuando son estimulados por una longitud de onda determinada, su actividad nerviosa explica la experiencia del color. Esta postulación la revivió en 1856 el científico alemán Herman Von Helmholtz, quien extendiera la proposición inicial de Young, completándola con una curva espectral de la sensibilidad para cada uno de los tres conjuntos de receptores. Helmholtz modificó la teoría de Young, rechazando la idea de que un receptor determinado para el color puede ser activado incluso por una sola longitud de onda. En su proposición original diseñó receptores no sólo en forma exclusiva, sino máximamente sensibles a las longitudes de onda que corresponden a los matices de azul, verde y rojo. En su forma más simple, la teoría del receptor tricromático afirma que se necesitan sólo tres tipos de receptores para la discriminación del matiz. La estimulación del rojo, por ejemplo, produce una experiencia cromática que se debe específicamente a una fuerte excitación de los receptores "rojos" junto con una débil estimulación de los receptores "verde" y "azul". El resultado es una sensación de rojo. La luz "amarilla" estimula a los receptores "rojo" y "verde", y muy ligeramente al "azul", con una sensación resultante de amarillo. Por tanto, todos los matices que resultan de la distribución de las luces espectrales y de sus mezclas pueden producirse por la contribución proporcional apropiada de un sistema de tres receptores.

Rushton (1962, 1965) introdujo una técnica que consistió en enviar un haz de luz hacia dentro del ojo y luego midió la cantidad de luz reflejada hacia afuera. Calculando la diferencia entre la cantidad enviada y la reflejada, obtuvo una estimación de la cantidad de luz absorbida por los fotopigmentos para cada longitud de onda en ojo humano intacto. Enseguida, lo inundó con una distribución particular de luz. Así, sería de esperar que la luz roja activara con una mayor fuerza el pigmento que capta la longitud de onda larga: en consecuencia, con una exposición continua, se "blanquearía". Cuando midió de nuevo la cantidad asimilada de cada longitud de onda, la diferencia entre la luz reflejada por las retinas "blanqueadas" y "sin blanquear" en la fovea, produjo curvas de absorción semejantes para los pigmentos rotulados como "rojos" y "verdes".

Rushton no pudo encontrar pruebas de la existencia de conos que contuviesen un pigmento para igualado de azul en la fovea, lo cual sugiere que, para pequeños objetos vistos con la visión central, todos los observadores son dicrómatas, de manera más específica, tritanópicos. Evidencias crecientes basadas en la destrucción de conos azules en la retina de monos mediante la exposición prolongada a la luz de corta longitud de onda, han confirmado el hecho que de no hay conos azules en una región circular de un diámetro de 25 min de arco de diámetro en la fovea central (7). Debido a que los conos se encuentran distribuidos de diferente manera en la retina, nuestra respuesta al color es distinta en las diversas partes del ojo. La región central de la fovea es relativamente ciega al azul, la sensibilidad a la luz primero aumenta y luego disminuye a medida que se aleja de ella. La

sensibilidad a la luz verde disminuye al incrementarse la distancia de la fovea y desaparece aproximadamente a los 40 grados de ella. Existe un patrón semejante para la sensibilidad a las luces roja y amarilla; a mayor distancia de la fovea, las respuestas al color desaparecen en el siguiente orden: verde, rojo, amarillo y azul. En la periferia lejana de la retina somos totalmente ciegos al color.

Los genes responsables de los diferentes pigmentos retinianos son recesivos autonómicos, es decir, no es usual que se manifiesten en las mujeres.

Teoría de los procesos oponentes

El fisiólogo alemán Ewald Hering (1878-1964) no estaba satisfecho por completo con la teoría tricromática de la visión del color. Hering observó otro aspecto de la experiencia subjetiva del matiz. Notó que los observadores nunca registran ciertas combinaciones de color, esto lo llevó a sugerir procesos neurológicos hipotéticos en los que los cuatro colores primarios están dispuestos en pares opuestos. Un proceso oponente indicaría la presencia de rojo o verde y otro señalaría el azul o amarillo. Un ejemplo de esta clase de proceso podría ser una sola neurona cuya tasa de actividad se incrementa con la presencia de un color (rojo) y disminuye ante su color opuesto (verde). Debido a que la actividad de la célula no puede crecer y decrecer en forma simultánea, no es posible tener un verde rojizo. Otras células con proceso oponente podrían responder de modo semejante al azul y amarillo. Se ha sugerido una tercera unidad para la percepción de brillantez, a la que se llamó proceso oponente blanco y negro, ya que el blanco y negro se tratan psicológicamente como si fueran "colores puros".

Así, por ejemplo, la estimulación con luz de 450 nm produce actividad en los receptores azul-amarillo y rojo-verde: el proceso azul del sistema azul-amarillo y el proceso rojo del sistema rojo-verde reaccionan para producir el aspecto de violeta. La dimensión de luminancia resulta de la actividad del receptor blanco y negro, y contribuye a la brillantez de la respuesta cromática.

Es posible especificar qué matiz se verá con cualquier longitud de onda determinada de luz. Debido a que los dos miembros de un proceso receptor son mutuamente antagónicos, la magnitud de una respuesta sensorial dada puede evaluarse por la cantidad del oponente necesaria para eliminar o anular la sensación del color.

Bornstein, Kessen y Weiskopf (1976) demostraron que los infantes de cuatro meses de edad muestran tendencia a ver el espectro como si estuviera dividido en cuatro categorías de matices.

Esto lo hicieron exhibiéndoles en forma repetida una longitud de onda determinada, hasta que los pequeños se aburrían y dejaban de ver esa luz (proceso denominado habituación). A continuación, registran cuánto tiempo pasaba un bebé viendo una segunda longitud de onda. Descubrieron que cuando la segunda longitud de onda seleccionada correspondía a otra categoría de matiz, los infantes pasaban más tiempo viéndola que cuando pertenecía a la misma ca-

tegoría. Los sujetos reaccionaron como si los estímulos de la misma categoría fueran más parecidos que los de categorías diferentes, por lo tanto, parece que clasificaron los matices en los mismos cuatro grupos de los adultos (8).

Según Hurvich y Jameson, este método de anulación o borramiento del matiz puede servir para medir la distribución espectral de la respuesta cromática. Por tanto, la cantidad o fuerza relativa de una respuesta azul se determina por la cantidad de energía de una longitud de onda que aparece amarilla y que tiene que añadirse a fin de anular o neutralizar la sensación de azul. Es decir, se supone que la cantidad de componente azul es igual a la cantidad de amarillo que tuviera que añadirse para anularla. De manera similar, la cantidad de respuesta amarilla se determina añadiendo sólo una cantidad suficiente de luz azul para anular la sensación de amarillo. Puede hacerse una afirmación similar para la respuesta verde y roja: la cantidad de luz roja que se añade a las longitudes de onda de la región verdosa y la cantidad de luz verde que se añade a las longitudes de onda en la región roja a fin de anular las respuestas cromáticas adecuadas, son medidas de la cantidad de respuesta verde y roja, respectivamente. Los resultados de estas manipulaciones se dan en las curvas de respuesta cromática: el sistema de rojo-verde es igual a cero, produciendo una respuesta azul pura o "única" en los 500 nm; el sistema azul-amarillento es igual a cero, produciéndose una respuesta de verde pura o "única" en los 580 nm; el proceso receptor rojo-verde es de nuevo igual a cero, pero en este caso produce una respuesta amarilla pura o "única".

Hasta ahora sólo se ha limitado a la explicación sobre la percepción del color a los mecanismos retinianos. Sin embargo, existe gran cantidad de evidencia neurofisiológica de un proceso de tipo oponente que funciona en los niveles neurales más allá de la retina. El hallazgo de carácter general que se deduce de los registros de la actividad nerviosa a partir del nivel ganglionar o del núcleo geniculado lateral, es que algunas células aumentan sus ritmos de excitación (por encima de un nivel espontáneo o de línea basal) para algunas longitudes de onda y otras los disminuyen.

Existe evidencia en el sentido de que había células que aumentaban o disminuían directamente sus ritmos de excitación en respuesta a las luces de cualquier longitud de onda. Sin embargo, también se ha observado la existencia de células de tipo oponente cuyos ritmos de respuestas generales dependían de la longitud de onda de la luz; eran excitadas por algunas longitudes de onda e inhibidas por otras y, por lo general, manifestaron diferentes ritmos de excitación a diferentes longitudes de onda. Si se estimula con luz roja de longitud de onda larga (633 nm), se dispara vigorosamente al principio y en toda la duración de la luz, en tanto que se inhibe relativamente en el límite de la luz. En contraste, las longitudes de onda corta de azul o de luz verde producen una inhibición de la célula durante el intervalo luminoso seguida por actividad en el límite de la luz. Algunas células muestran actividad a las mismas luces espectrales. Estos y otros datos hacen suponer que existe una correlación entre la respuesta cromática y la respuesta nerviosa postretinal.

Todavía hay mucho por investigar, pero baste decir que las características de un estímulo cromático se procesan y transmiten a lo largo del sistema visual por medio de algún proceso oponente de codificación de color. Aunque no puede expresarse una firme resolución entre la teoría del receptor tricromático y la teoría del proceso oponente, es posible una componenda entre ambas.

Todo la evidencia del sistema de tres receptores de conos, de tres colores, se halló en contra de la evidencia electrofisiológica anterior por un sistema oponente de color más lejano en la trayectoria visual. Aparentemente, la visión del color se halló, por lo menos, en un proceso de dos etapas, compatible con la teoría de Young-Helmholtz o nivel de receptor, y con la teoría de Hering o nivel del nervio óptico y niveles posteriores. No hay una vía privada hacia el cerebro por cada receptor; la información tricolor se procesa de alguna manera en la retina y se codifica en señales de color de «encendido-apagado» por cada uno de las células ganglionares sensibles al color, por la transmisión hacia los centros visuales superiores.

De acuerdo con las teorías contemporáneas sobre la percepción del color, se ha insistido en las teorías del receptor tricromático y del proceso oponente de color. Sin embargo, existen muchas otras explicaciones teóricas. Dos de ellas son dignas de tenerse en cuenta.

La teoría de Ladd-Franklin, de carácter evolutivo, hace uso de algunos conceptos tomados tanto de la teoría del receptor tricromático y del proceso oponente. Originalmente, Christine Ladd-Franklin (1929) postuló que una sensibilidad acromática básica, o primitiva, de blanco y negro evolucionó hacia una diferenciación, primero en una sensibilidad al azul y al amarillo, que en etapas más posteriores de evolución se diferenció todavía más en sensibilidad al rojo y al verde. Confirmando esto, la periferia cercana de la retina sí manifiesta tales zonas o regiones cromáticas (1). La sensibilidad acromática se da primero en la periferia lejana, a continuación aparecen las zonas para el azul y el amarillo y se requiere una región más central para ver el rojo y el verde. (1). La teoría supone que las áreas centrales de la retina perciben todos los matices, son las más desarrolladas desde el punto de vista evolutivo y en los extremos de la retina se hallan los receptores más primitivos que son sensibles sólo a la luz acromática. Según esta teoría, las personas que manifiestan deficiencias cromáticas del rojo y el verde, y cuya sensibilidad es solamente al azul y al amarillo, (descritos en una sección posteriormente) poseen un nivel más primitivo de visión del color; la persona que es totalmente ciega a los colores (monocromática), tiene la forma más primitiva de habilidad visual. Sin embargo, dado el estado de hechos conocidos sobre visión del color, esta teoría es obviamente incompleta. También cabría señalar la suposición cuestionable inherente a esta teoría; es decir, que los conos han evolucionado más que los bastones (AISS, 1963). Según se ha observado, muchas formas de vida filogenéticamente inferiores a los mamíferos (en su mayoría carecen de conos) poseen conos.

Edwin Land, el inventor de la cámara Polaroid, ha demostrado la posibilidad de producir la mayor parte de las sensaciones de color empleando sólo dos colores primarios. Uno de sus métodos es como sigue: utilizando una película de blanco y negro, se fotografía dos veces una escena policromática; una vez con un filtro rojo sobre la lente de la cámara, transmitiendo la longitud de onda larga del espectro visible, y una segunda ocasión con un filtro verde, transmitiendo una banda de longitud de onda media o corta. A continuación, la película se procesa como transparencias positivas de blanco y negro, y las dos diapositivas se proyectan simultáneamente y se superponen en una pantalla. La diapositiva, que originalmente se toma con un filtro rojo, se presenta con otro filtro del mismo color sobre la lente de proyección, pero no se necesita ningún filtro para la otra diapositiva, que de esta manera se proyecta con luz blanca incandescente. La proyección resultante indica un fenómeno poco común: aparece casi toda la gama de colores en la escena original. Esto hace suponer, desde luego, que en determinadas condiciones se necesitan menos de tres colores primarios para producir la escala común de matices. Claro que esto no puede explicarse aludiendo a las leyes clásicas de la mezcla de colores y, por lo tanto, los efectos cromáticos de Land han producido cierta controversia. Se ha hecho un intento por explicar los matices de esta teoría basándose en las aplicaciones complejas del contraste simultáneo o inducido pero ninguna explicación, ni siquiera la de Land, ha tenido una amplia aceptación.

Canales de color y codificación cortical

En el núcleo geniculado lateral, es donde se encuentran las células de los procesos oponentes del color. Este núcleo se compone de seis capas bien definidas (tres que reciben estímulos de cada ojo). Cada una de ellas puede subdividirse

con base en el tamaño de las células que la componen. Las cuatro filas superiores tienen células pequeñas y por ello se denominan capas parvocelulares (del latín *parvo*, pequeño), en contraste con las dos filas inferiores, que se llaman capas magnocelulares (del latín *magno*, grande).

Las células de color opuestas, que en realidad constituyen cerca de 90% de las células del sistema geniculoestriado, parecen estar concentradas en cuatro capas parvocelulares. El canal parvocelular transmite la información del color, y el canal magnocelular transmite la información de la brillantez.

La separación de los canales de color y brillantez continúa hasta corteza. Muchas de las células codificadoras de color del canal parvocelular tienen conexiones con los glóbulos de la V1, en tanto que las regiones entre los glóbulos (interglobulares) reciben estímulos de las capas parvo y magnocelulares que tienen que ver con brillantez, forma, movimiento y otra información no relacionada con el color (6). La separación del procesamiento del color y de otros atributos de la vista en la corteza visual continúa hasta niveles más elevados, hasta que el canal magnocelular ciego al color termina en un lugar diferente de donde lo hace el canal parvocelular codificador de color. En el área V2, la organización cambia a "franjas". Las neuronas que son sólo para el color se concentran en lo que parecen oscuras franjas delgadas; los estímulos magnocelulares ciegos al color van hacia oscuras franjas gruesas; mientras tanto, los estímulos mixtos forman anchas franjas pálidas (Figura 4).

VISION DE COLOR DEFECTUOSA

Se estima que sólo una de cada 300 000 personas no tiene conos que funcionen (Sharpe y Nordby, 1989) (11). Con excepción de las formas basadas en la patología, la visión del

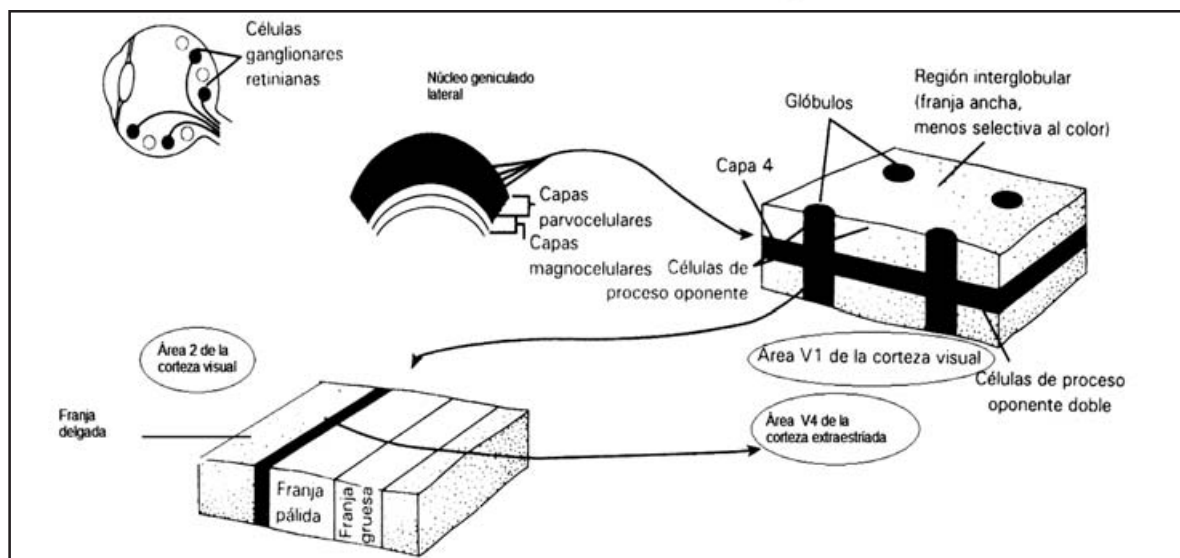


Fig. 4. Muestra el canal de color principal, que es parte del sistema parvocelular, comenzando por el ojo, pasando a través del núcleo geniculado lateral y luego por las regiones corticales V1 y V2.

color defectuosa es hereditaria. Se reconoce como una característica recesiva vinculada al sexo y transmitida genéticamente, y ocurre como tal especialmente en el género masculino. Aproximadamente 8% de la población masculina tiene cierto defecto en la visión de color. Las deficiencias de color pueden dividirse en tres clases principales, según el número de colores primarios que se necesitan para igualar todos los colores espectrales. Las formas principales se llaman tricromatismo anómalo, dicromatismo y monocromatismo (1).

Tricromatismo anómalo

El tricromata defectuoso o anómalo requiere una proporción de los tres colores primarios diferente a la del observador normal, para igualar o aparear los colores del espectro. La forma más común de dicromatismo supone la percepción del rojo y el verde. Según se hizo notar anteriormente, un color amarillo puede igualarse por una mezcla adecuada de rojo y verde. Sin embargo, los tricromatas anómalos requieren en la mezcla más rojo o verde que las personas normales. El mecanismo general que se utiliza para evaluar tales defectos en el igualado del color es una clase especial de mezclador de color que mide las proporciones del rojo monocromático que tienen que mezclarse con el verde monocromático para igualarlo con un amarillo monocromático.

Dicromatismo

Algunos individuos, más que carecer de dos conjuntos de cono deficientes como los monocromatas, sólo tienen un sistema de conos funcionando mal. Dado dos sistemas de conos que sí funcionan, los individuos deberían tener cierta percepción de color, aunque ésta difiera de la que tiene un observador normal. Estos individuos se conocen como dicromáticos 2. Los dicromatas igualan el espectro con la combinación adecuada de dos colores en vez de los tres que necesitan los observadores normales. Los dicromatas pueden sufrir ya sea de deuteranopia o protanopia, que aluden a las deficiencias del verde y del rojo, respectivamente. Tanto para los deuteranópicos como los protanópicos, la región de longitud de onda corta del espectro parece amarilla. Además, tanto los deuteranópicos como los protanópicos confunden el rojo y el verde, ambos colores aparecen como un amarillo desaturado. Sin embargo, las personas que padecen deuteranopía, que es la forma más común del dicromatismo, no pueden distinguir ciertas combinaciones de rojo y azul, en tanto que los protanópicos son relativamente insensibles a las longitudes de ondas largas de luz; o sea, que se necesitan intensidades de luz roja mucho mayores a las normales para una respuesta e intensidad. De manera similar, existe la evidencia en el sentido de que los deuteranópicos son menos sensibles a las longitudes de onda de la región del verde (1).

Una tercera forma de dicromatismo, que ocurre con mucho menor frecuencia que las dos anteriores, llamada tritanopía, se caracteriza por una deficiencia al ver el azul y el amarillo; o sea, los tritanópicos ven sólo rojos y verdes y confunden los amarillos, grises y azules. Además, los tritanópicos ven solamente un gris neutro en la proximidad de los 570 nm (amari-

llo); las longitudes de onda más largas aparecen rojizas y las longitudes de onda más cortas aparecen verdosas (1).

Aunque no es posible saber cómo los colores que ve un dicromata se comparan con los que ve una persona normal, se ha descrito cierta evidencia relacionada con esta cuestión.

Graham y Hisa (1958) reportaron el caso de un sujeto unilateralmente ciego al color, una mujer que era deuteranópica en su ojo izquierdo, pero normal en su ojo derecho. Por medio de procedimientos de igualación de color, en el cual se podían mostrar diferentes matices a cada ojo independientemente, fue posible medir la visión de color en el ojo izquierdo defectuoso. El procedimiento consistió en que para cada color presentado a su ojo izquierdo defectuoso, ella graduó el color en su ojo derecho normal de manera que apareciera como del mismo matiz. Para su ojo defectuoso, los colores que comprenden desde el verde hasta el rojo de la escala espectral (502 nm a 700 nm) parecían idénticos a un matiz único de amarillo (aproximadamente 570 nm), según lo ve su ojo derecho normal, y todos los colores del verde al violeta parecían azules (alrededor de 470 nm). El ojo defectuoso veía la región azul-verdosa (que ocurría en aproximadamente 502 nm) como un gris neutro (10).

Monocromatismo

Una tercera clase de persona con un defecto en la visión al color, las monocromatas, parecen todas las longitudes de onda del espectro contra cualquier otra longitud de onda o una luz blanca. A este grupo se le podría llamar "de ceguera al color" (1). Un individuo con un solo tipo, o ninguno, de cono funcional, responde a la luz de manera muy parecida a como lo hace una placa de película en blanco y negro. Todos los colores se registran simplemente como graduaciones de la intensidad de la luz (2). Esencialmente, carecen de respuesta cromática y por lo general padecen de una reducción en otras funciones visuales. Es probable que tengan una anomalía en cuanto al número y clase de conos en sus retinas.

Las deficiencias de la visión de color tienen repercusiones teóricas importantes para la visión del color. Una explicación razonable de las deficiencias de la visión del color es compatible con el hecho de que existen tres clases de conos, cada uno de ellos con un pigmento distinto y que uno o más de los fotorpigmentos de los conos son defectuosos o está del todo ausente. Es decir, no hay ausencia verdadera de conos ni están impedidas las funciones extracromáticas de los mismos, lo cual es compatible con el hecho de que la agudeza de la mayoría de las personas deficientes en la visión a color, con excepción del monocromata en bastones, está a un nivel normal, pero existe una distribución anormal de los fotorpigmentos de los conos. Por lo tanto, la distinción anatómica entre los deuteranópicos y los protanópicos es que cada uno tiene un conjunto de conos que carece del pigmento del verde (clorolabio) y rojo (eritrolabio). También son posibles otras explicaciones teóricas de los defectos de la visión a color, pero sin duda deben tenerse en cuenta las variedades de las deficiencias de la visión al color en cualquier teoría definitiva de la visión del color (1).

REFERENCIAS

1. Schiffman HR. La percepción del color. 1933, pp. 235-255
2. Coren S, Ward LM, Enns JT. Color. Sensación y Percepción, pp. 123-153
3. Teevan RC, Birney RC. Color Vision .Princeton, Van Nostrand, 1961.
4. DunckeR K. The influence of past experience upon perceptual properties. Am J Psychology, 1939; 52:255-265.
5. Ladd-Frankil C. Colour and theories. Nueva York, Harcourt, 1929.
6. Tootell RB, Silverman MS, Hamilton SL, De Valois RL, Switkes E. Functional anatomy of de macaque striate cortex: III .Color. J Neurosci, 1988; 8:1569-1593.
7. Rushton WAH. Visual pigments in man. Sci Am 1962; 250:120-132.
8. Bornstein MH, Kessen W, Weiskopf S. Color vision and hue categorization in young human infants. J Exp Psycho 1976; 2:115-129.
9. Hurvich LM, Jameson D. Opponent processes as a model of neural organization. Am Psychol 1974; 29:88-102.
10. Graham CH, Hisa Y. Color defect and color theory. Science 1958; 127:657-682.
11. Sharpe LT, Nordby K. Total colorblindness: An introduction. En: Hess RF, Sharpe LT, Nordby K (eds.). Night vision: Basic, clinical and applied aspects. Cambridge, University Press, 1989.
12. Bartleson CJ. Memory color of familiar objects. J Opt Soc Am, 1960; 50:73-77.