



TRICROMACIA, SISTEMA DE MUNSELL, VISIÓN NORMAL DEL COLOR

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, USA

PAR REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, USA

ESTE CAPÍTULO INCLUYE UNA REVISIÓN DE:

- Evidencia de la tricromacia
- Genética molecular de los foto pigmentos de los conos
- Designación de los colores
- Sistema Munsell de la apariencia del color
- Percepción normal del color

EVIDENCIA DE LA TRICROMACIA

La investigación científica usando una variedad de métodos ha establecido que la retina humana normal contiene tres tipos de conos, y los espectros de absorción característicos de los foto pigmentos contenidos en cada uno ha sido identificado. Esta es la base para la percepción del color tricromática. Las técnicas experimentales utilizadas para investigar la visión de color incluyen:

- Estudios sicofísicos de emparejamiento de color
- Densitometría de la Retina
- La micro-espectrofotometría de células individuales
- Los registros electrofisiológicos para medir la sensibilidad espectral de los fotorreceptores individuales
- La oftalmoscopia de óptica adaptativa de alta resolución

Un científico llamado Rushton desarrolló la **densitometría retinal** en la década de 1960 para estudiar los foto pigmentos de la retina. Para estudiar el espectro de absorción de los conos M, se debe encontrar a una persona con anomalía del color que sólo tenga conos M en su fovea. Los *conos S están normalmente ausentes en la fovea*, por lo que una persona a la que le faltan conos L tendrá sólo conos M en la fovea.

Se hace incidir una luz monocromática (de una sola longitud de onda), con radiación conocida, en la fovea, y luego se mide la cantidad de luz reflejada. El resplandor de la luz reflejada será menor que el de la luz incidente debido a la absorción por el foto pigmento. Por tanto, puede calcular la absorción relativa para esa longitud de onda.

Repitiendo el procedimiento para muchas longitudes de onda se puede determinar el espectro de absorción de los conos M.

Para encontrar el espectro de absorción de los conos L, se repite el procedimiento con una persona anómala al color que falta los conos M. La densitometría de retina ayuda a determinar el espectro de absorción de los conos L y M a través de la parte media del espectro visible, pero esta técnica pierde precisión en los rangos de longitud de onda corta y larga.

EVIDENCIA DE LA TRICROMACIA (CONTINUACIÓN)

En **micro espectro fotometría**, un solo cono se aísla y se ilumina con una sola longitud de onda de luz de radiación conocida. La luz transmitida se mide y la diferencia entre la luz incidente y la transmitida se atribuye a la absorción del foto pigmento. Mediante la repetición de muchas longitudes de onda, se puede determinar el espectro de absorción para un tipo de cono. (Consultar fig. 5-8 de Schwartz)

Los registros **electrofisiológicos** de los conos (células individuales) también se pueden utilizar para determinar su espectro de absorción. En esta técnica, un micro electrodo mide la respuesta eléctrica de un cono aislado cuando se ilumina con luz monocromática. Mediante la medición de la luminosidad mínima necesaria para obtener una respuesta, se determina el umbral para esa longitud de onda. Se repite para muchas longitudes de onda para determinar el espectro umbral; el inverso de esto da el espectro de sensibilidad relativa del cono.

El Dr. Austin Roorda, de la Universidad de California en Berkeley, utiliza la **óptica adaptativa** para medir y neutralizar las aberraciones ópticas del ojo, y luego tomó fotografías de ultra-alta resolución de los fotorreceptores en humanos vivos. Antes de esto, la única manera de fotografiar fotorreceptores individuales era extirpando el ojo y realizando microscopía electrónica en las secciones histológicas. Él combinó las imágenes de alta resolución con la densitometría de la retina e identificó el tipo de cono entre una gran variedad de fotorreceptores de la retina. La Figura 22-1 (izquierda), copiada de su página web, muestra la disposición espacial de los tres tipos de conos en la retina de un sujeto. El Dr. Roorda ha sido capaz de fotografiar fotorreceptores individuales en el ojo humano vivo, y ha utilizado las técnicas de blanqueo selectivo para aislar diferentes foto pigmentos en el ojo humano viviente.

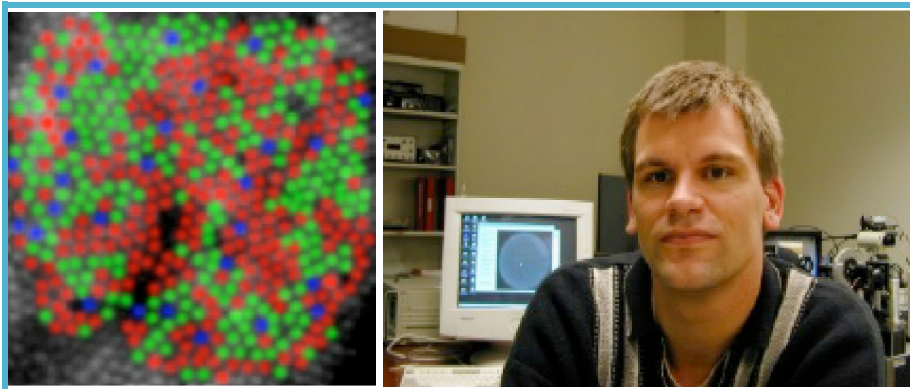


Figura 22-1 Utilizando una cámara de fondo de ojo de alta resolución con óptica adaptativa y densitometría retinal, el Dr. Austin Roorda (arriba) pudo identificar los conos individuales S, M y L en una retina viva.

GENÉTICA MOLECULAR DE LOS FOTO PIGMENTOS DE LOS CONOS

(Leer p. 98-101 de Schwartz, 2004)

IDENTIFICACIÓN DEL COLOR

Aunque la longitud de onda se asocia generalmente con un color en particular, la luz producida por una longitud de onda no siempre aparece del mismo color. Por ejemplo, dependiendo del brillo de una luz monocromática, podría tener un aspecto diferente. Se puede tener 555 nm de color verde brillante, o 555 nm verde oscuro. Es más correcto describir con el atributo de color más estrechamente asociado con la longitud de onda como el 'tono'. Por ejemplo, el matiz asociado con una longitud de onda de aproximadamente 400 nm es violeta; 525 verde; 570 amarillo; 630 rojo, etc El color es un término común, genérico, pero para ser más específicos en la descripción de un color, deberíamos describirlo en términos de sus tres atributos básicos:

- Tonalidad/matiz
- Saturación
- Brillo

CLASIFICACIÓN DEL COLOR (CONTINUÍA)

Un matiz dado también pueden diferir en cuanto a su **saturación** . La saturación se describe cómo pureza de un cierto color. Por ejemplo, el rojo altamente saturado (rojo puro) puede ser **desaturado** mediante la mezcla con blanco, haciéndolo color rosa. En este ejemplo, el rojo puro y rosa tendrían el mismo matiz, pero diferente saturación. Nótese que en este ejemplo, el rojo y el rosa son colores diferentes pero tienen la misma *tonalidad* .

La saturación relativa de una prueba de color puede ser determinada por su **pureza colorimétrica (p)** .

L_{λ} - luminancia de una longitud de onda espectralmente pura

L_w - luminancia de una luz blanca añadida a L_{λ} para que coincida con el color de prueba.

En el ejemplo de la figura 22-2, la prueba de color de la izquierda se corresponde con una mezcla de 90 partes puras de rojo + 10 de blanco puro. Tiene una pureza colorimétrica de 0.9. El color de la prueba derecha coincide con una mezcla de 90 partes puras de rojo + 210 de blanco puro para una pureza colorimétrica de 0.3.

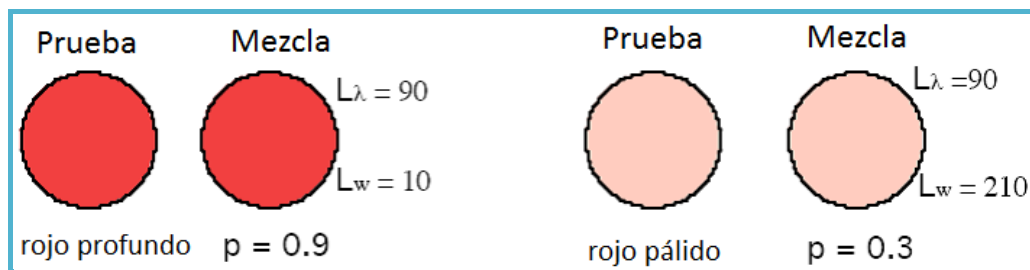


Figura 22-2: Dos ejemplos de cómo la pureza colorimétrica, o saturación de un tono particular se puede medir

La pureza de la excitación se halla a través de la fórmula:

$$\text{Pureza de la excitación (p)} = \frac{a}{a+b}$$

El **Brillo** se mencionó anteriormente. También es un parámetro básico que se utiliza para describir un color particular. El brillo percibido está estrechamente relacionado con la función $V(\lambda)$. La información del brillo está codificada basada en la entrada a ambos conos los M y L. El brillo no es exactamente igual a la luminancia, aunque están estrechamente relacionados. Debido a procesamiento neural, dos luces de la misma luminancia a veces pueden tener diferentes brillos percibidos.

SISTEMA DE MUNSELL DE LA APARIENCIA DEL COLOR

Se han desarrollado varios sistemas para especificar los colores. Uno de ellos es el sistema de especificación del color CIE. Otro sistema muy conocido y utilizado en el arte y en la industria de la pintura es el sistema del orden del color de Munsell. Se puede acceder a una descripción técnica del sistema Munsell en la siguiente página web: http://www.coloursystem.com/?page_id=860&lang=en

Wikipedia tiene un buen resumen en lenguaje sencillo del sistema Munsell:

(http://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system).

En 1905, el artista AH Munsell organizó un gran número de muestras de color de acuerdo al tono, la saturación y el brillo. Esto se convirtió en el sistema de la apariencia del color de Munsell.

*El sistema del orden del color de Munsell es una forma de especificar con precisión los colores y mostrar las relaciones entre los colores. Cada color tiene tres cualidades o atributos: el matiz, el valor del brillo y saturación. Munsell estableció escalas numéricas con medidas visualmente uniformes de cada uno de estos atributos. El Libro de Munsell del Color exhibe una colección de fichas de colores dispuestas de acuerdo a estas escalas. Cada ficha se identifica numéricamente utilizando estas escalas. El color de cualquier superficie se puede identificar por comparación con las fichas, bajo condiciones de iluminación y de visión apropiadas. El color se identifica a continuación, por su **matiz, valor del brillo y saturación** . Estos atributos se dan los símbolos H, V y C (por sus siglas en inglés) y se escriben en la forma HV / C, que se llama la anotación Munsell. (de: <http://www.munsell.com/munsell1.htm>)*

SISTEMA MUNSELL DE LA APARIENCIA DEL COLOR



Figura 22-3: La figura de la izquierda muestra la progresión del tono cuando el cilindro de Munsell se aprecia desde arriba. La de la derecha muestra que los colores también pueden variar del centro a la periferia (saturación) y de la parte superior a la inferior (valor del brillo).

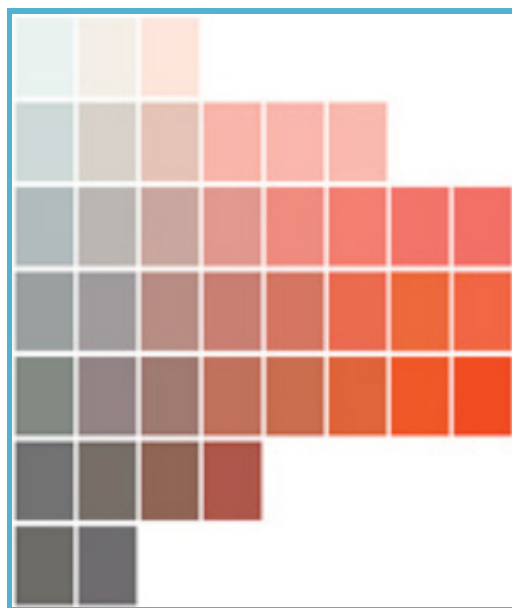


Figura 22-4: El sistema de Munsell

En el sistema de Munsell, los colores altamente saturados están más lejos del centro. La Figura 22-4 muestra una hoja del árbol de Munsell. Todas las muestras en esta hoja tienen la misma tonalidad, pero difieren en su brillo (valor Munsell) y saturación (croma de Munsell).

En el sistema de Munsell, todos los colores están dispuestos en un volumen en forma de cilindro en el que los matices cambian alrededor de la circunferencia del cilindro. La figura 22-3 a la izquierda muestra la disposición si se ve desde arriba. Los **tonos** se dividen en diez grandes sectores, cada uno de los cuales tiene diez pasos de tono más pequeños. En total, hay 100 tonos en este sistema. Los principales colores son abreviados R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P y RP, y a los pasos dentro de cada gran tonalidad se les da un número. Por ejemplo, el tono en el centro del sector de color rojo se designa 5R. El **valor** se relaciona con brillo y varía de 0 (negro) en la parte inferior, a 10 (blanco) en la parte superior.

SISTEMA MUNSELL DE LA APARIENCIA DEL COLOR (CONTINUACIÓN)

El **croma** corresponde a la saturación (pureza colorimétrica o pureza de excitación). Los colores neutros (gris-negro-blanco) tienen un croma de cero, pero todos los otros colores pueden tener un croma de 1 o mayor. Los números más altos son más saturados. Algunos colores naturales pueden tener un croma tan alto como de 20, mientras que algunos colores fluorescentes pueden tener un croma tan alto como de 30. Dice Schwartz que el croma varía desde un valor de 1 a 14, con 1 en el centro y en el extremo 14. Ver Fig. 5-19 de Schwartz, 2004.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, cualquier color único en el sistema de Munsell se especifica mediante el siguiente formato (Fig 24-4.): Valor matiz / croma. Por ejemplo, un color rojo vivo, con un valor (brillo) de 6 y croma (saturación) de 14, se designa 5R 6/14. Las divisiones más finas se pueden especificar usando decimales. Por ejemplo: 5.3R 6.1 / 13.5.

PERCEPCIÓN NORMAL DEL COLOR

SATURACIÓN RELATIVA DE LOS TONOS ESPECTRALES PUROS

Algunas longitudes de onda parecen ser más saturadas que otras, aunque todas ellas tengan una pureza de excitación o la pureza colorimétrica de 1.0. Descrito de forma diferente, algunos colores parecen ser más fuertes que otros. La longitud de onda menos saturada es 570 nm, que tiene un tono amarillo.

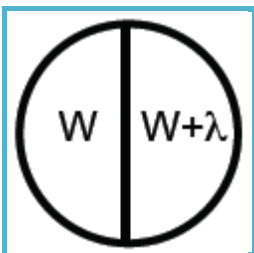


Figura 22-5: Campo bipartito para evaluar la saturación relativa de diferentes tonos

A través del uso de un estímulo, tal como la que se muestra en la Figura 22-5, se puede determinar la saturación relativa de una longitud de onda mediante la adición de una pequeña cantidad de esa longitud de onda (totalmente saturado) a la luz blanca. Se continúa agregando luz de esa longitud de onda hasta que ya no se ve blanco en comparación con la mitad del estímulo que es de color blanco puro. (Se debe tener en cuenta que la luminancia total en ambas partes se mantiene constante). Utilizando los valores de luminancia para el color blanco y el tono de prueba, se puede calcular una saturación espectral relativa de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$\text{saturación relativa} = \left[\frac{(L_{\lambda} + L_w)}{L_{\lambda}} \right]$$

Se debe añadir muy poco de tonos fuertemente saturados, como el azul o rojo, pero gran parte de tonos desaturados, como el amarillo 570 nm, para hacer que la parte de la prueba parezca diferente al blanco. La Tabla 22.1 da valores hipotéticos de un experimento para comparar la saturación de tres longitudes de onda. La Figura 5-11 de Schwartz, 2004 grafica los resultados de este tipo de experimento para muchos tonos espectrales. Se debe tener en cuenta que el tono menos saturado se asocia con la luz de 570 nm.

Tabla 22-1: Comparación de la saturación relativa de diferentes longitudes de onda

λ	TONO	INTENSIDAD DEL BLANCO	λ INTENSIDAD	$(\lambda+W)/\lambda$	$\text{LOG}(\lambda+W)/\lambda$
470	azul	95	5	20	1.3
570	amarillo	70	30	3.33	0.5
630	rojo	94	6	16.7	1.2

PERCEPCIÓN NORMAL DEL COLOR (CONTINUACIÓN)

DISCRIMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA

¿Cuál es la diferencia más pequeña en dos longitudes de onda que puede ser discriminada? Esto varía dependiendo de la longitud de onda, como se muestra en la Fig. 5-12 de Schwartz, 2004. El estímulo utilizado para evaluar la discriminación de la longitud de onda se muestra en la figura. 5-12 superior.

Una longitud de onda de prueba fija se compara con otra longitud de onda que es sólo ligeramente diferente. Evalúa la diferencia mínima entre longitudes de onda que el sujeto es capaz de discernir.

La discriminación de la longitud de onda como una función de la longitud de onda se representa gráficamente como una curva en forma de W que muestra la mejor discriminación a 495 y 590 nm. La máxima discriminación de longitud de onda se ve en las longitudes de onda donde las pendientes de las funciones espectrales de absorción del foto pigmento tienen el mayor cambio una respecto a la otra (Fig.22-6 abajo).

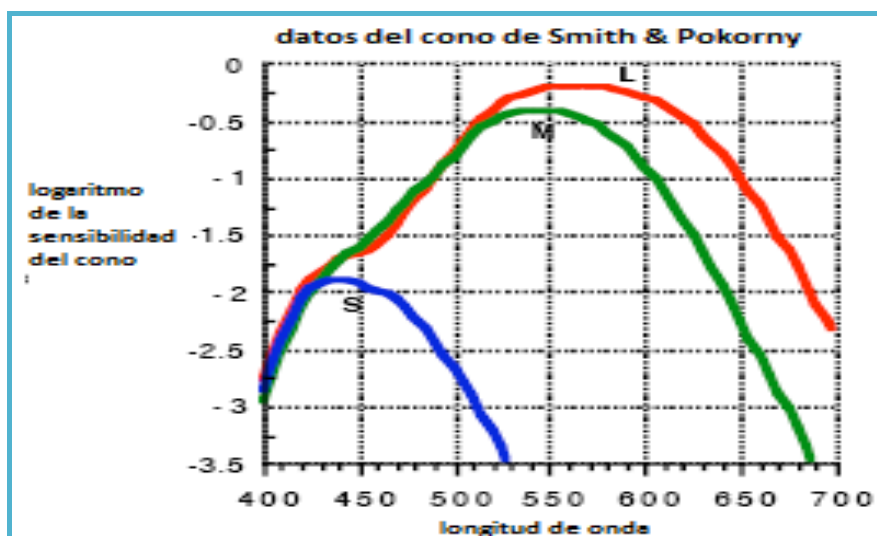


Figura 22-6: funciones de las sensibilidades de los conos S, M & L

FENÓMENO DE BEZOLD-BRÜCKE

Los matices de la mayoría de las longitudes de onda cambian ligeramente con diferentes niveles de luminancia. Ver (Figura 5-13 de Schwartz, 2004). El estímulo bipartito que se muestra en la figura 22-7 a continuación, se utiliza para medir este efecto, conocido como el **fenómeno de Bezold-Brücke**. El λ_v representa una longitud de onda de prueba que puede ser variada; El λ_c representa una luz que mantiene una longitud de onda y la luminancia constante. Inicialmente λ_v y λ_c tienen la misma longitud de onda y luminancia. La luminancia de λ_v se incrementa gradualmente, y para la mayoría de longitudes de onda su color cambia gradualmente. El sujeto debe ajustar la longitud de onda de λ_v para que siga siendo el mismo tono que λ_c ; es decir, trata de mantener en un tono constante el matiz de λ_c .

Por ejemplo, al incrementar intensidad al $\lambda_v = 550$ nm (verde), comienza a parecer más amarillo, como un 580 nm. Para compensar, el sujeto ajusta a una longitud de onda más corta. Por tanto, el gráfico muestra la línea que se origina en 550 nm se inclinan hacia la izquierda (Fig. 22-7).

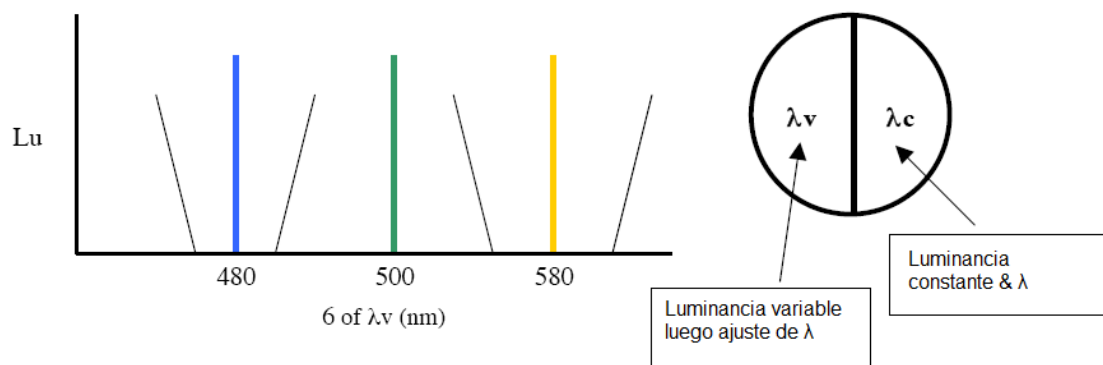


Figura 22-7: Las tres longitudes de onda invariables son ~480, ~500 y ~580. Las líneas inclinadas indican las longitudes de onda que mantienen un tono constante con el incremento de la luminancia

PERCEPCIÓN NORMAL DEL COLOR (CONTINUACIÓN)

Las líneas en la trama representan las longitudes de onda que parecen tener el mismo tono con el aumento de intensidad. Se denominan **líneas de contorno de tono**. En tres longitudes de onda (478, 503, 578 nm), no hay ningún cambio en el tono percibido con el incremento de la intensidad. Se les conoce como las **longitudes de onda invariables, puntos invariables o tonos únicos**.

Para resumir el fenómeno de Bezold-Brücke, a mayor intensidad, las longitudes de onda inferiores a ~500 nm cambian en apariencia más hacia el azul (~ 480), y por encima de ~ 500 nm, las tonalidades cambian en apariencia más hacia el amarillo (~ 580).

Por ejemplo, a 490 nm (azul-verde) se torna más azul (más cerca de 480 nm), y para compensar el λ_v se cambia a longitudes de onda más largas, por lo que la línea de contorno del tono se inclina a la derecha.

Un estímulo con 450 nm (violeta) se convierte en más azul (más cerca de 480 nm), por lo tanto el λ_v se debe cambiar a longitudes de onda más cortas para compensar, por lo que la línea de contorno de tonalidad se inclina hacia la izquierda.

Un estímulo de 525 nm (verde-azul) se convierte en más amarillo (más cercano a 580 nm) y el λ_v debe ajustarse a longitudes de onda más bajas para compensar (la línea de contorno de tonalidad se inclina hacia la izquierda).

Un estímulo de 590 nm (amarillo-naranja) se convierte en más amarillo (más cercano a 580 nm) y el λ_v debe ajustarse a longitudes de onda más largas para compensar (la línea de contorno tonalidad se inclina a la derecha).

El **fenómeno de Abney** describe un ligero cambio en el tono que acompaña a un cambio en la saturación para algunas longitudes de onda. Las luces de longitud de onda cercanas a 488 nm (azul-verde) se vuelven alejan de la tonalidad de 488 nm con el aumento de la saturación. Las luces de longitud de onda cercanas a 577 nm (amarillo) se vuelven más parecidas al matiz de 577 nm con el aumento de la saturación.

CONSTANCIA DEL COLOR

Cuando luces de colores ligeramente diferentes iluminan un objeto, hay un cambio en el contenido espectral de la luz reflejada. A pesar de ello, a menudo se ve el mismo color. A esto se le conoce como la **constancia de color**.

LECTURAS/REFERENCIAS SELECCIONADAS

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004