

# Teoría del color

---

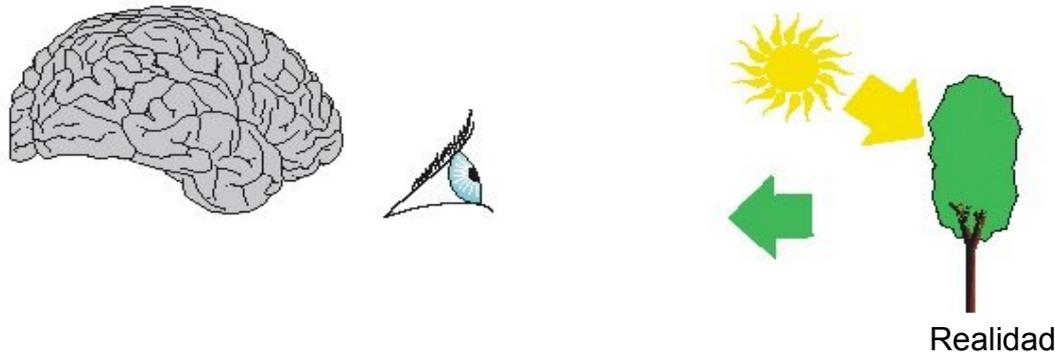




- Qué vemos?
  - color
  
- El Espectro de Energía Radiante
  - el espectro visible
  - el espectro de emisión
  
- La visión humana del color
  - la percepción humana
  
- La Percepción
  - percepción monocromática
  - luz acromática
  
- Percepción del Color
  - distribución de energía y metámeros
    - metámeros
  - teoría del tristímulus
  - capas de percepción humana del color
  - atributos visuales del color cromático
  
- Representación del Color
  - experimento de correspondencia de color
    - mezcla aditiva
    - mezcla sustractiva
  - correspondencia de color
    - espacio CIE para la correspondencia de color
    - espacio de color CIE
    - diagrama de cromaticidad CIE
  - gamut de color
  - modelos de color para sistemas raster
    - modelo RGB
    - modelo CMY
    - modelo YIQ
    - modelo HSV
    - modelo HLS

# ¿Qué vemos?

- Los ojos, junto con el cerebro, convierten la luz en un conjunto de valores discretos.
- La señal enviada a nuestro cerebro es interpretada “de alguna manera” como color.

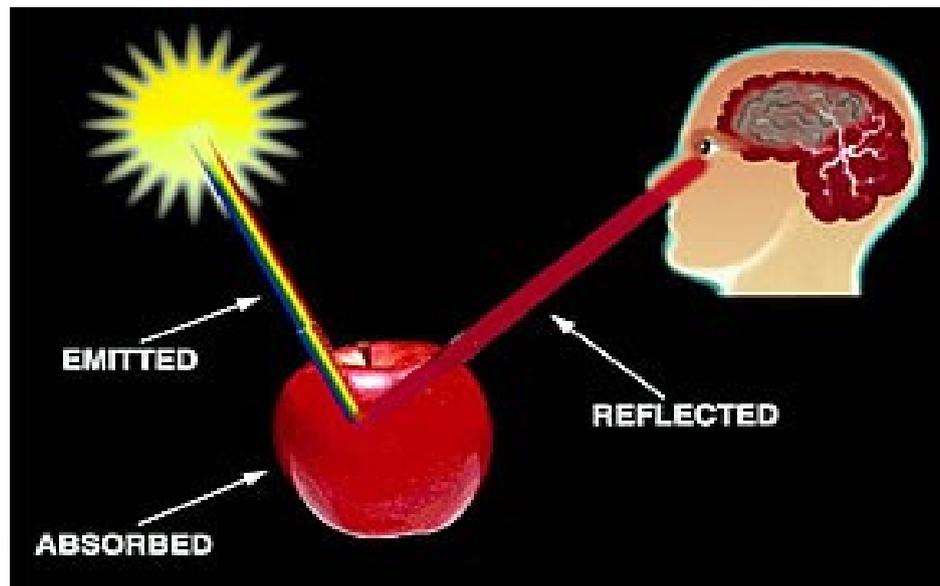


- El color es un tópico sumamente complejo, basado en la física, la fisiología, la psicología, el arte y el diseño gráfico.
- La fisiología de la visión y las teorías de la percepción son áreas de investigación activas.
- Nuestro sistema visual es muy particular:
  - ◆ Realiza acciones de procesamiento de señales.
  - ◆ Compone la información en forma fuertemente influenciada por el contexto.
  - ◆ Más de la mitad de nuestra corteza cerebral está dedicada a la visión.
  - ◆ La visión es probablemente el sentido más dominante.



# Color

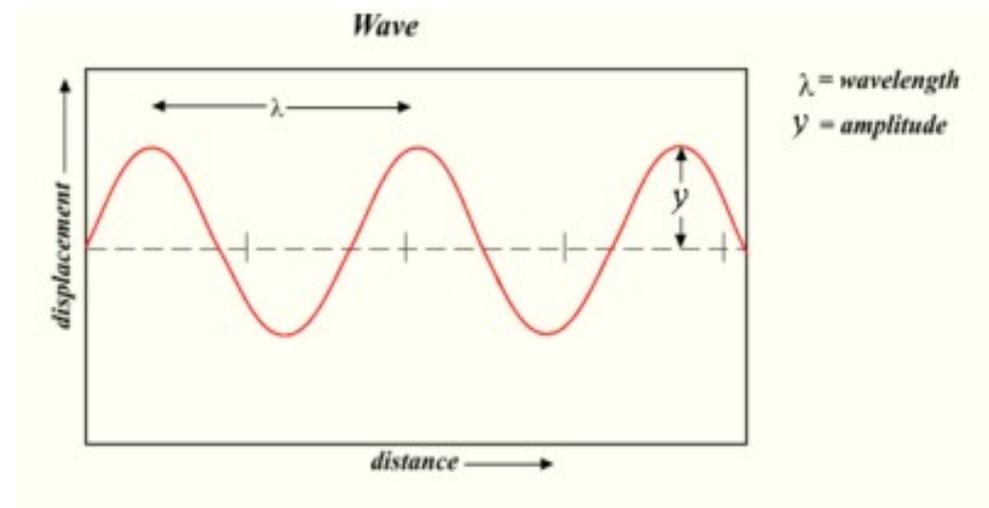
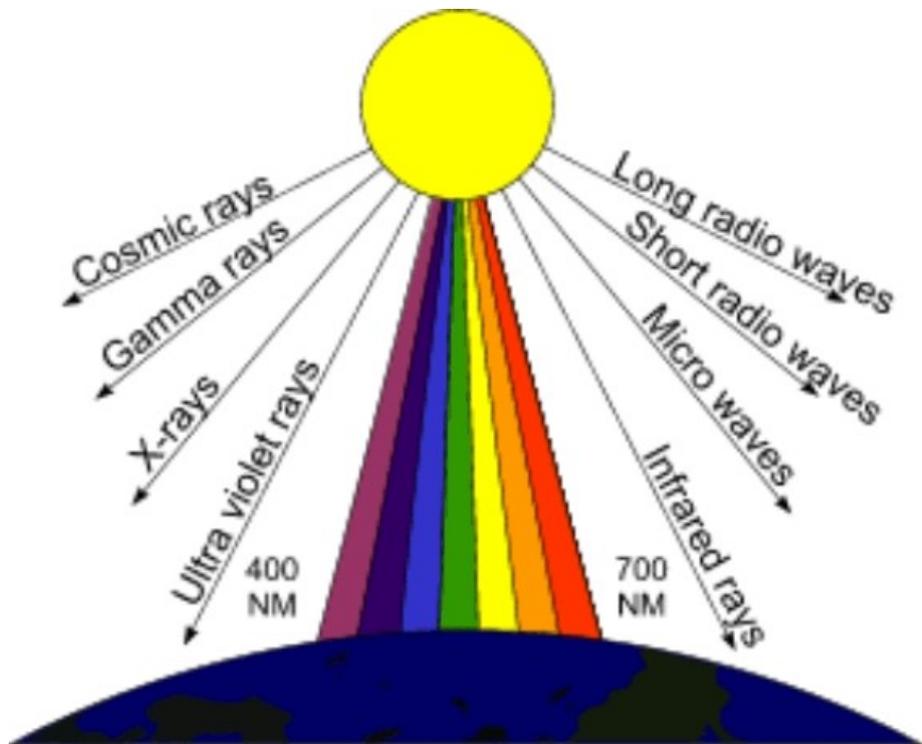
- El color de los objetos no depende solamente de los objetos en sí mismos, sino también de la fuentes de luz que los ilumina, del sistema visual humano (el mecanismo ojos/cerebro) y de los colores del entorno.
- Según sus propiedades, algunos objetos reflejan la luz (pared, escritorio, papel), mientras que otros transmiten la luz (papel celofán, vidrio)
  - ◆ Las superficies que reflejan sólo luz azul pura, al iluminarlas con luz roja pura se ven negras.
  - ◆ La luz verde pura vista a través de vidrio que sólo transmite el rojo puro se ve negra también.
- Existen muchas teorías, muchas técnicas de medición y estándares para los colores, pero aún no hay una teoría de la percepción humana del color universalmente aceptada.

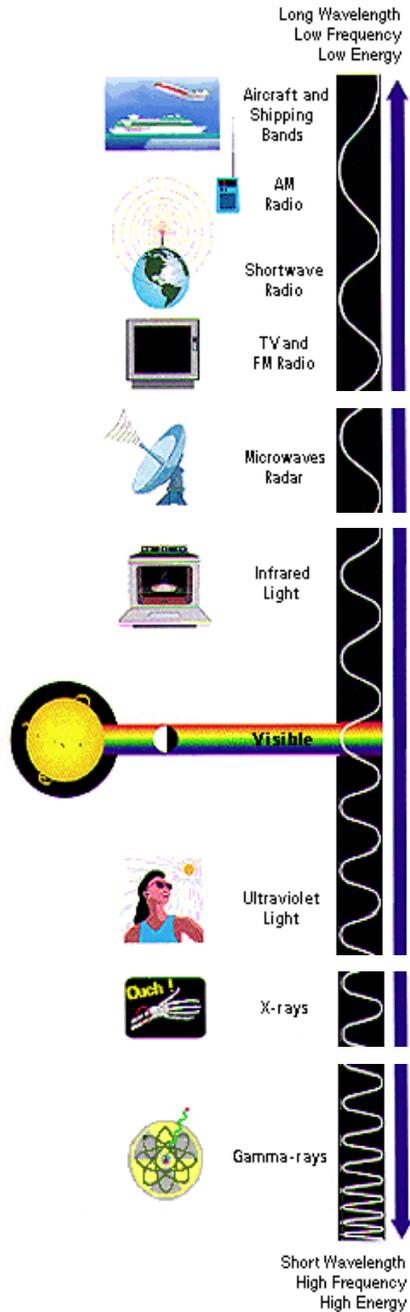


# El Espectro de Energía Radiante

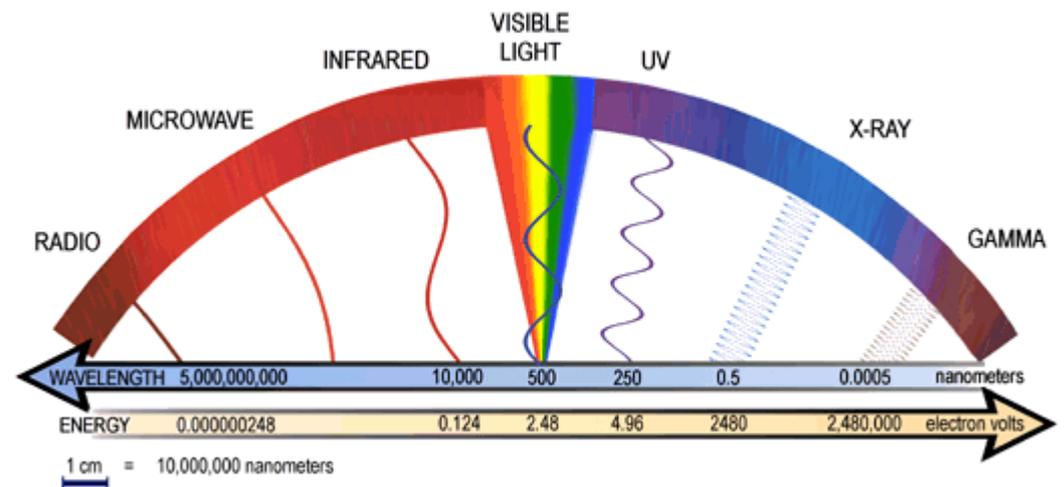
(física)

- Se puede pensar en la luz como ondas, en lugar de rayos.



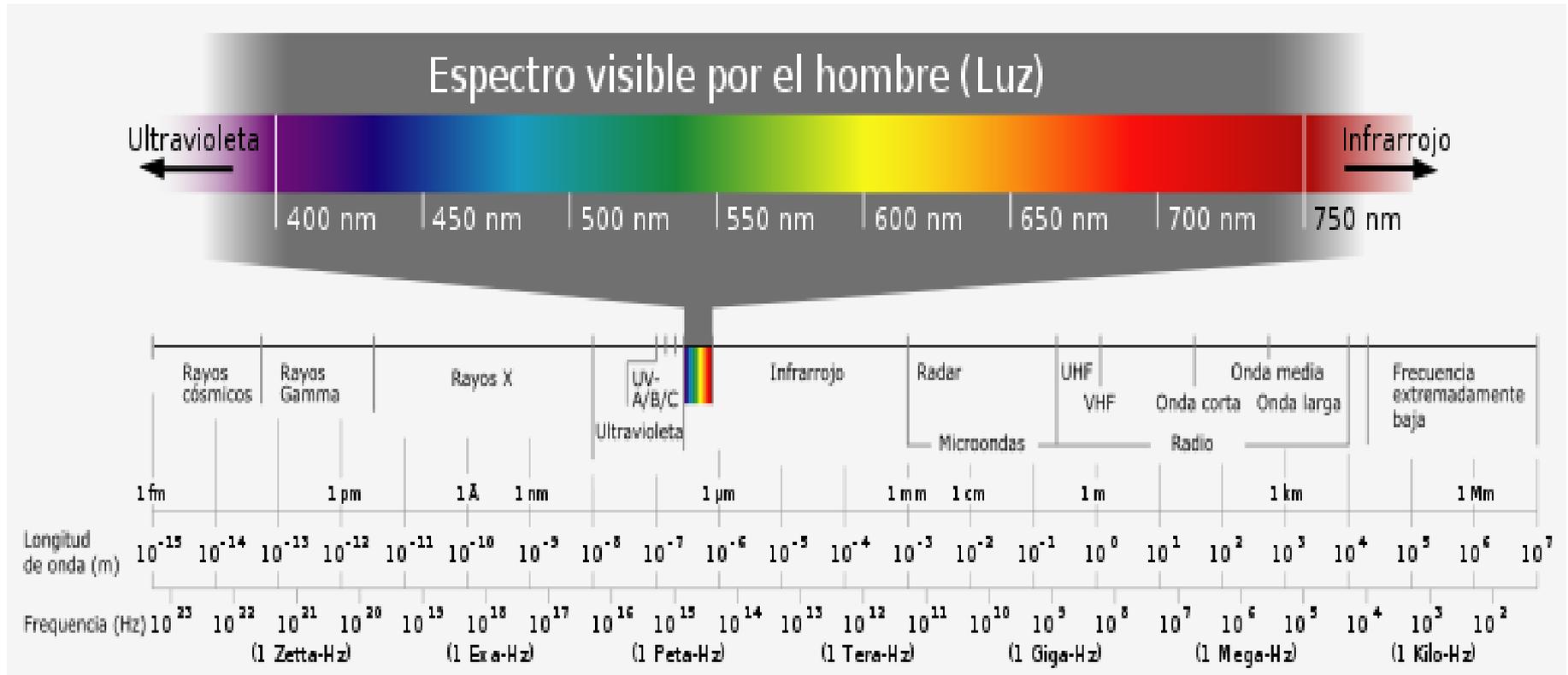


- La teoría de ondas permite una organización de la **Radiación Electro Magnética (EMR)** según la longitud de onda.



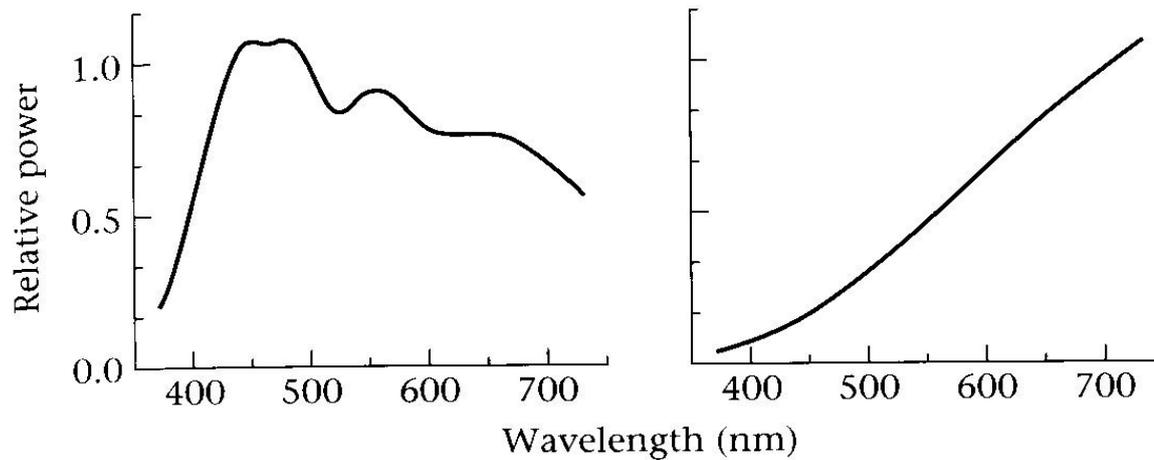


# El Espectro Visible



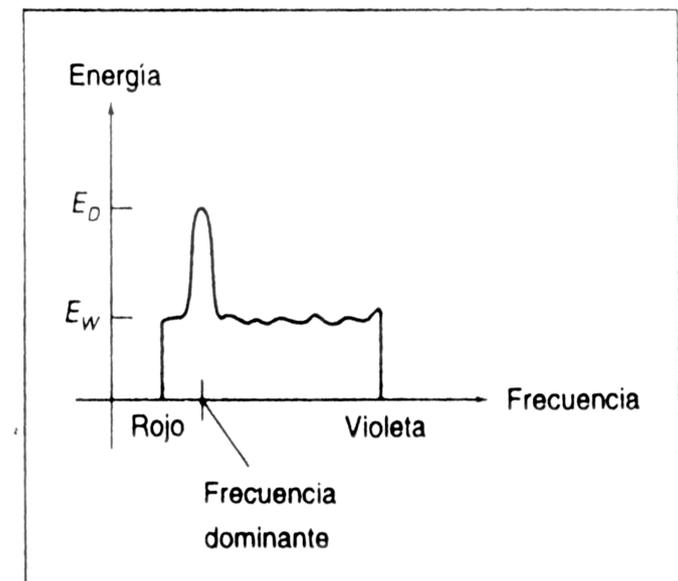
# El Espectro de Emisión (física)

- Una fuente de luz puede ser caracterizada por un espectro de emisión.
- El espectro describe la energía en cada longitud de onda.



Espectros de emisión para una fuente de luz blanca  
(luz del día y bombilla de tungsteno)

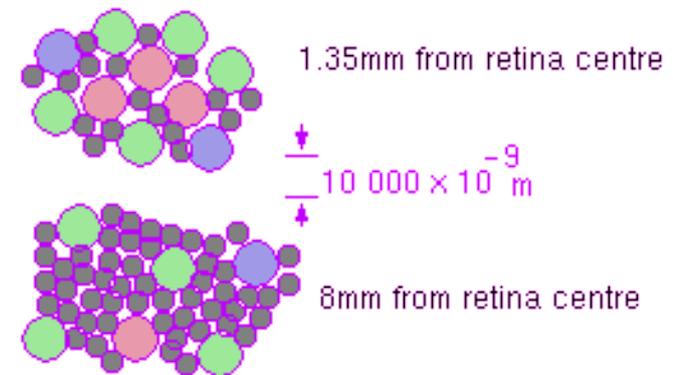
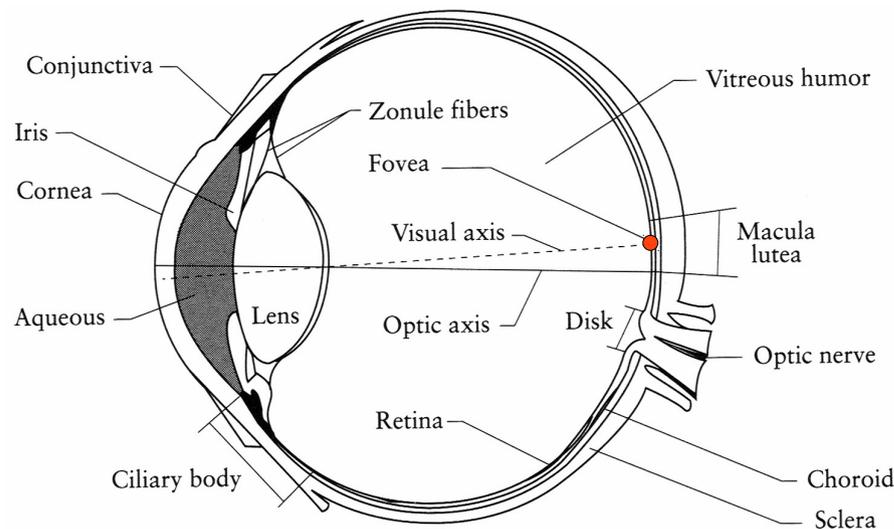
Espectro de emisión para  
una fuente luz con  
frecuencia dominante  
cercana al rojo.



# Visión humana del color

(fisiología)

- La parte fotosensible del ojo es llamada *retina*. La retina está compuesta en gran parte de dos tipos de células, llamadas **conos** y **bastones**.

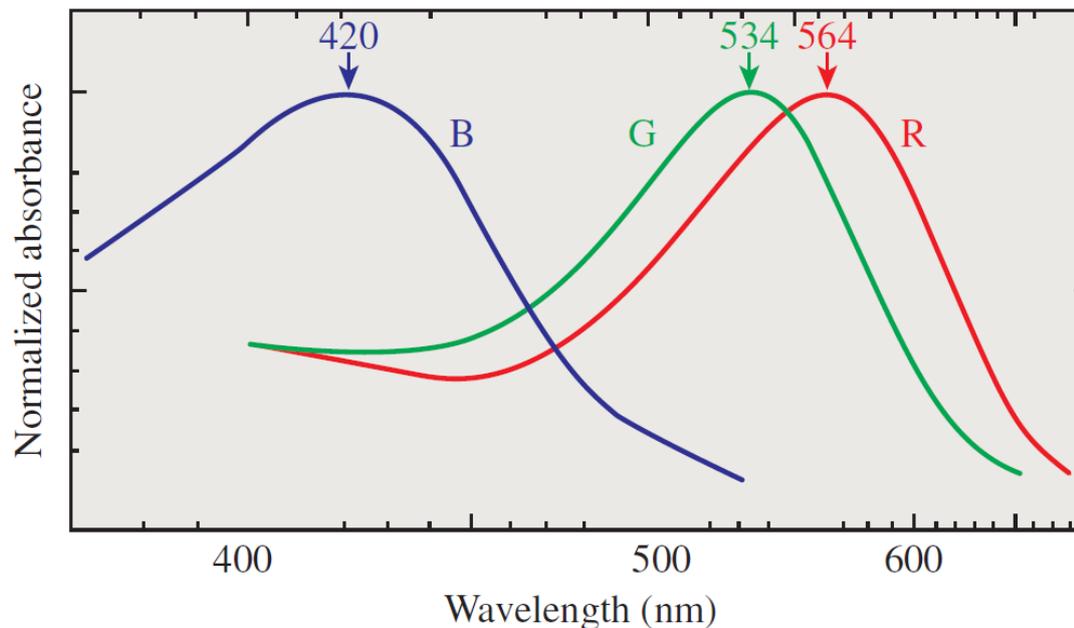


- Sólo los conos son los responsables de la percepción del color. Los conos están concentrados en una región del ojo denominada *fóvea*.



# Percepción Humana

- Tres tipos de conos, referidos como **S** (*short*), **M** (*medium*), y **L** (*long*), los cuales son aproximadamente (muy aprox.) equivalentes a los sensores de color azul, verde, y rojo, respectivamente. Sus sensibilidades máximas aproximadas están en  $420\text{nm}$ ,  $534\text{nm}$  y  $564\text{nm}$  para el observador "promedio".
- El Daltonismo surge a partir de la deficiencia de un tipo de cono.

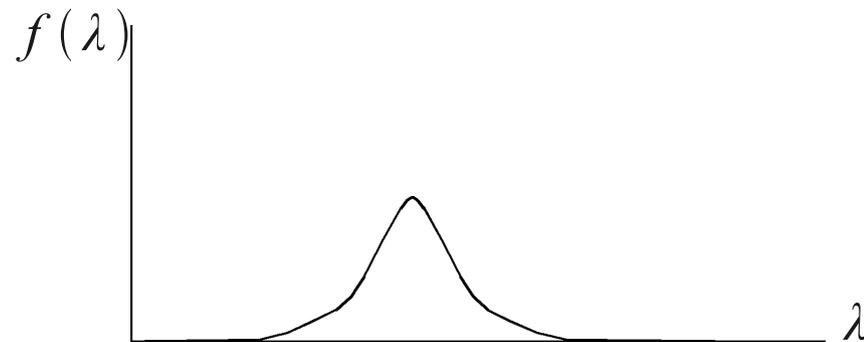


Tipo	Rango de Cono	Máx long. de onda
S	400–500 nm	420–440 nm
M	450–630 nm	534–545 nm
L	500–700 nm	564–580 nm

# Percepción

(psicología)

- Si se considera una criatura con un único receptor en la retina (ej.: los cangrejos de herradura son ciegos al color, es decir, son monocromáticos).
- Su curva de respuesta a las frecuencias tendría la siguiente forma:

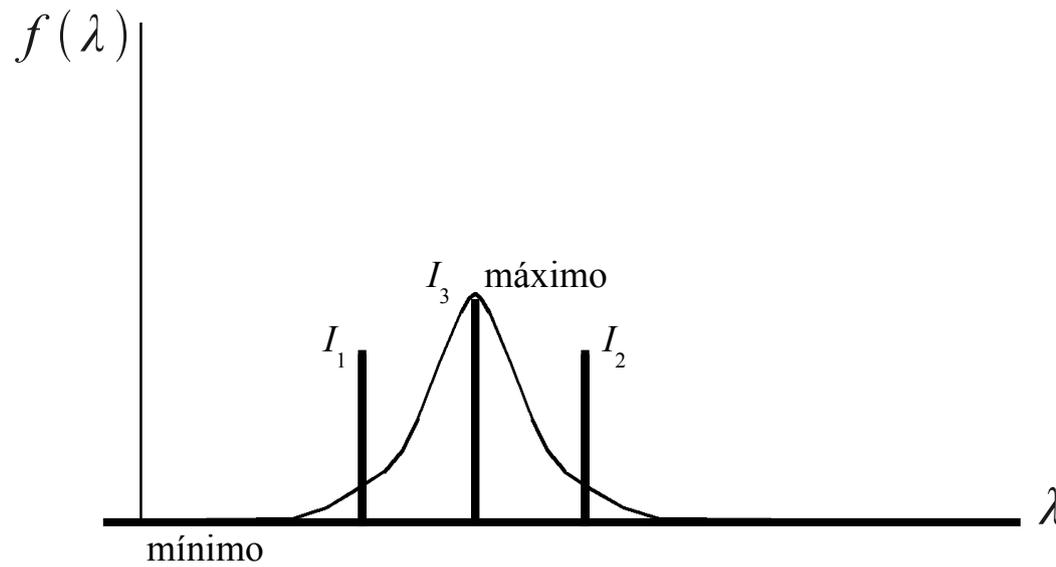


la cual indica la respuesta de un receptor a una luz de intensidad uniforme para cada longitud de onda.

- Es deseable conocer la respuesta del receptor a un estímulo en todo el espectro.



# Percepción Monocromática

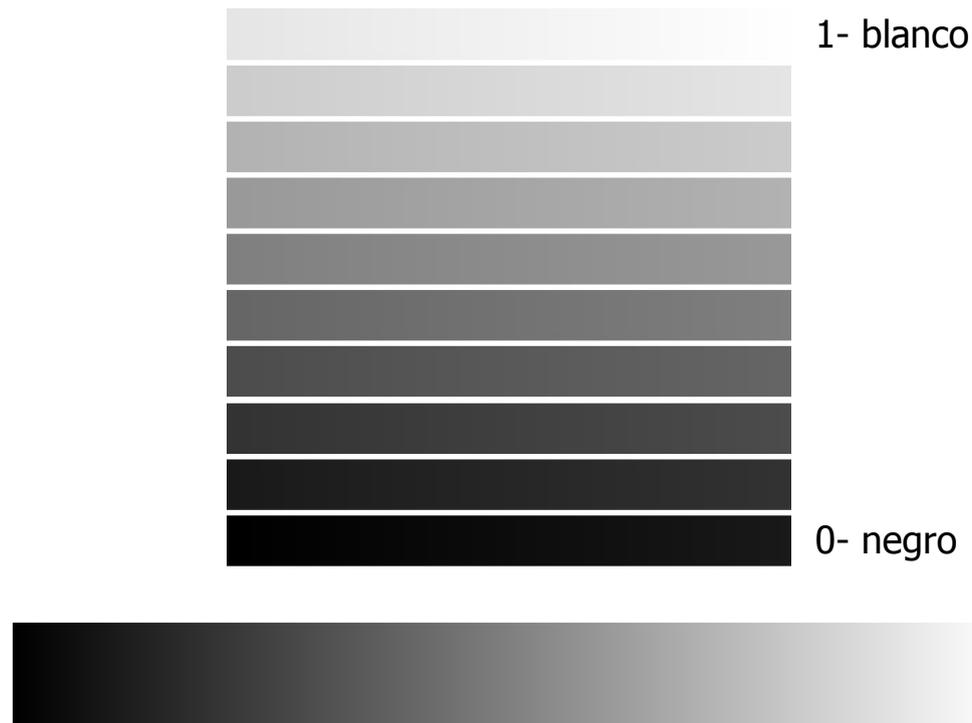


- No se pueden distinguir  $I_1$  de  $I_2$  o  $I_1$  de una luz  $I_3$  de intensidad tenue.
- El cangrejo ve una luz abriantada. No puede reconocer si su radiancia ha aumentado o su longitud de onda se ha desplazado.

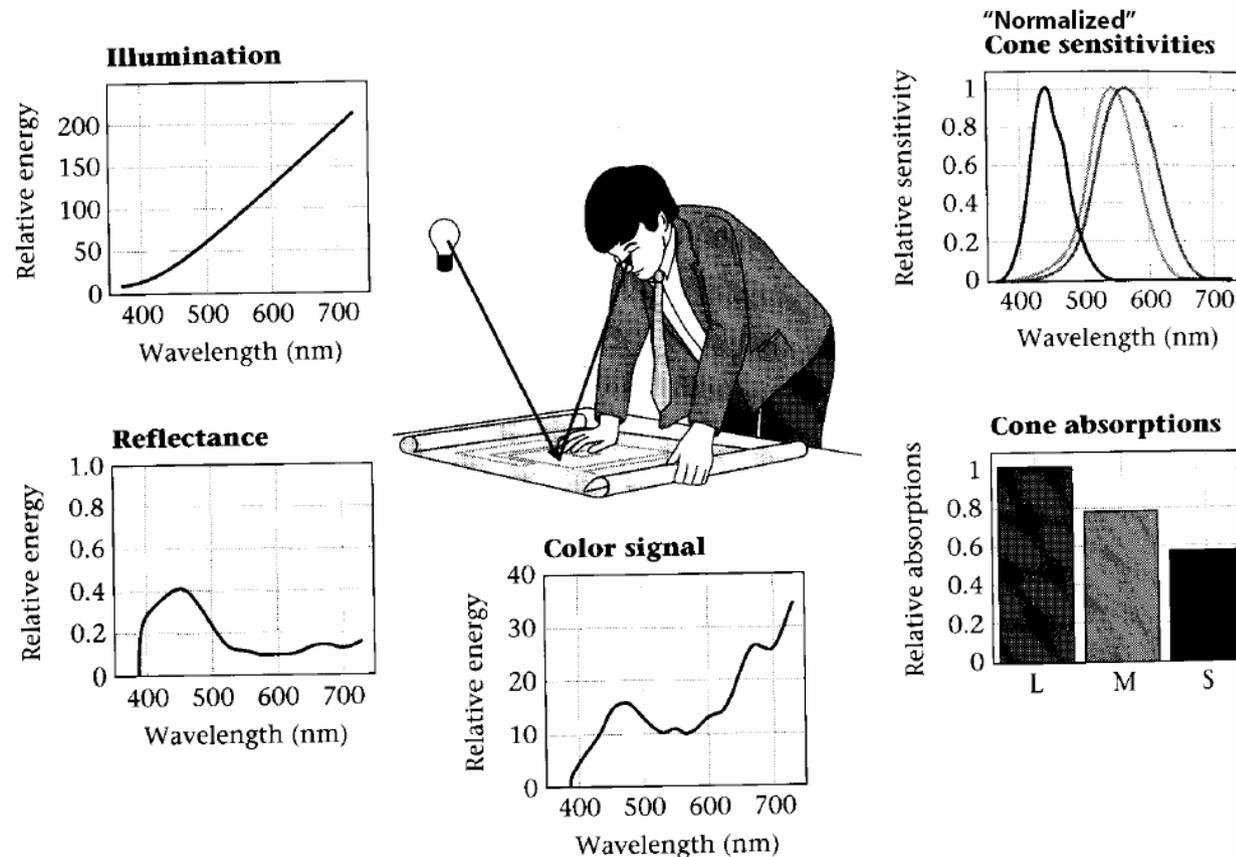


# Luz Acromática

- Luz acromática: solo intensidad (cantidad de luz)
  - llamada intensidad o luminancia si se mide la energía de la luz o brillo.
    - ♦ es el sentido psicofísico de la intensidad percibida
  - **0** como negro, **1** como blanco.
  - el nivel de intensidad varía entre 0 y 1 representando diferentes grises.
  - la visión humana puede distinguir alrededor de 100 niveles diferentes de grises.



# Percepción del Color

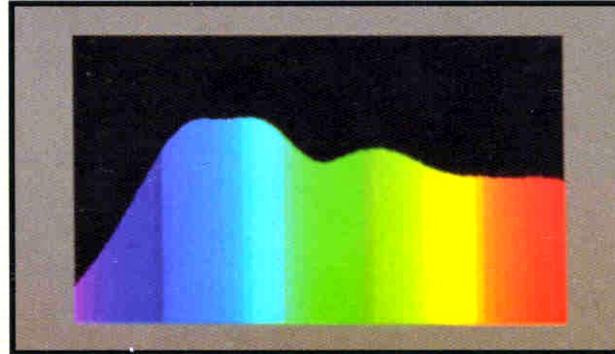


- La comparación de tinte, sombreado y tono es subjetiva, son conceptos orientados perceptualmente: dependen del juicio del observador, la iluminación, el tamaño de la muestra, el color circundante, la luminosidad general del ambiente...



# Distribución de Energía y Metámeros

- Color espectral: una única longitud de onda (ej. láser).
- Color no espectral: combinación de colores espectrales; se puede mostrar como una distribución espectral continua o como suma discreta de  $n$  primarios (ej., R, G, B). La mayoría de los colores son mezclas no espectrales.



Espectro de luz blanca donde la altura de la curva es la distribución de la energía espectral

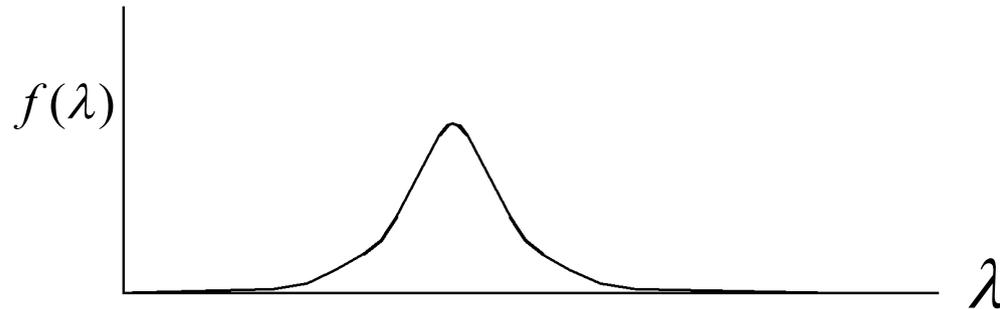
- Los *Metámeros* son distribuciones espectrales de energía que se perciben como el mismo “color”.
  - ♦ cada sensación de color se puede producir por un número arbitrariamente grande de metámeros

**No se puede predecir la sensación de color del observador promedio a partir de una distribución.**

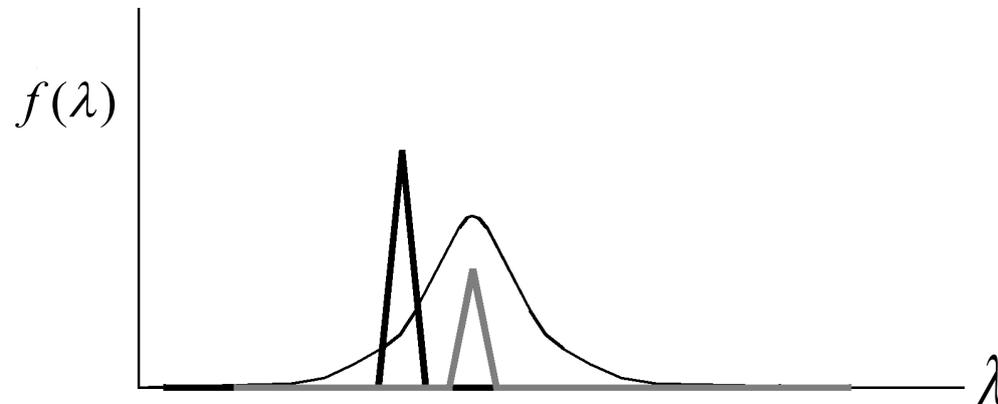


# Metámeros

- Diferentes distribuciones de luz producen la misma respuesta.
- Una criatura con un solo tipo de receptor, por ejemplo “rojo”, cuya curva de respuesta es:



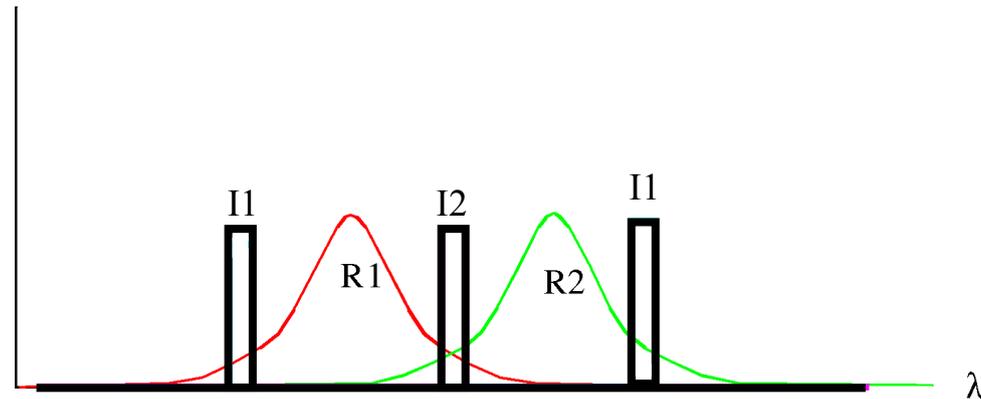
- ¿Cómo respondería a cada una de estas dos fuentes de luz?



- Ambas señales generan la misma cantidad de percepción "rojo". Por lo tanto son metámeros
  - ◆ un tipo de receptor nunca puede dar más de una sensación de color; en este caso rojo.
  - ◆ aunque, diferentes señales pueden resultar en diferentes luminosidades percibidas.

# Metámeros

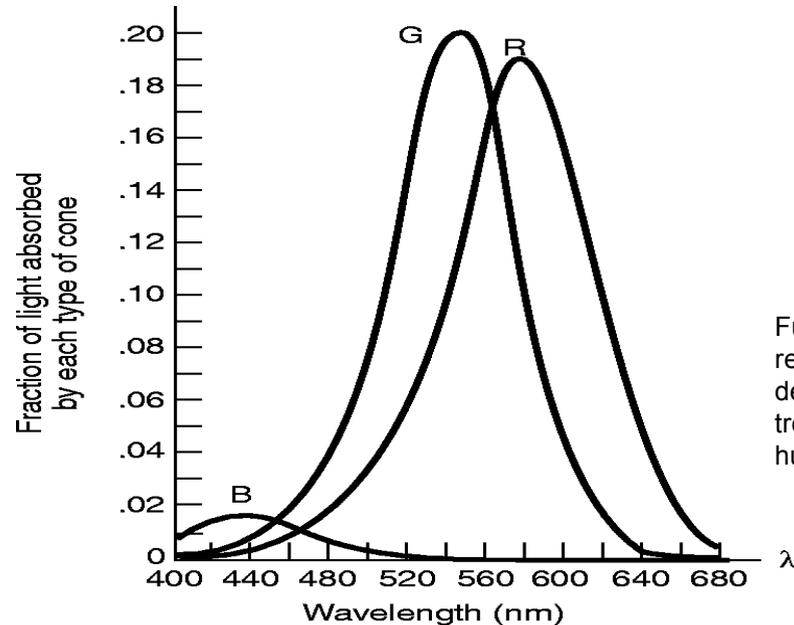
- Si se considera una criatura con dos receptores (R1, R2)



- En principio, un número infinito de distribuciones de frecuencia puede simular el efecto de I2, por ejemplo, I1
  - en la práctica, para  $I_n$  cerca de la base de las curvas de respuesta, la cantidad de luz necesaria se vuelve desmesurada.
- Para tres tipos de receptores, potencialmente hay un número infinito de distribuciones de color (metámeros) que generarán exactamente las mismas sensaciones.
- Por el contrario, no hay dos luces espectrales (monocromáticas) que puedan generar respuestas idénticas de receptores y, por lo tanto, todas ellas son únicas.

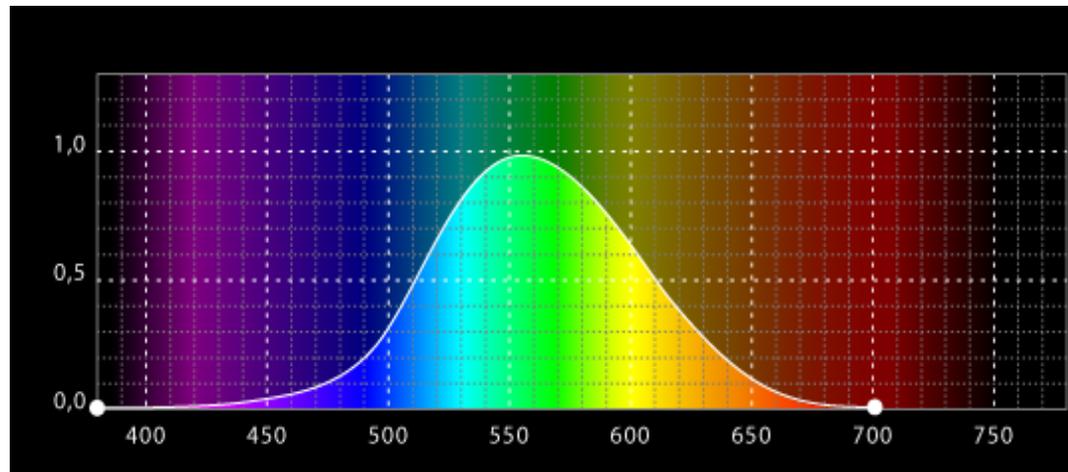
# Teoría Tricromática

(Thomas Young - 1801)



Thomas Young en 1801 postuló que se necesitan 3 tipos de receptores para distinguir la gama de colores.

La teoría de los tres estímulos (Tristimulus) no explica la percepción del color, por ej., muchos colores no son mezclas de RGB (el violeta se ve como rojo y azul, y ¿qué hay acerca del amarillo?, marrón?)



Función Eficacia Lumínica:  $V(\lambda) \approx \sum f_\lambda$

(sensibilidad máxima en verde-amarillo / 550nm).



# Metámeros

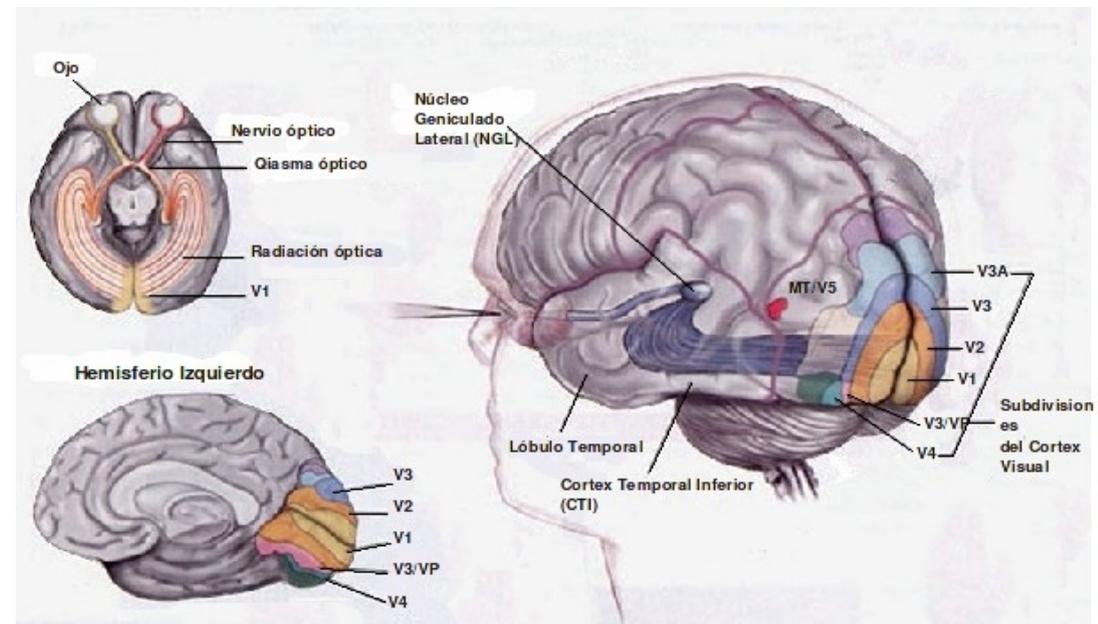
- Para que dos fuentes de luz sean metámeros, las cantidades de respuesta rojo, verde y azul generada por las dos fuentes deben ser idénticas.
- Esto equivale a tres restricciones sobre las luces.
- Pero las fuentes de luz son infinitamente variables – se puede ajustar la cantidad de luz en cualquier longitud de onda...
- Así que hay un número infinito de metámeros.
  
- Observaciones:
  - si dos personas tienen diferentes curvas de respuesta, los metámeros para una persona serán diferentes de los de la otra.
  - los metámeros son puramente perceptuales: instrumentos científicos pueden detectar la diferencia entre dos luces metaméricas.
  - incluso un prisma puede ayudar a mostrar cómo dos luces metaméricas son diferentes...



# Tres Capas de la Percepción Humana del Color

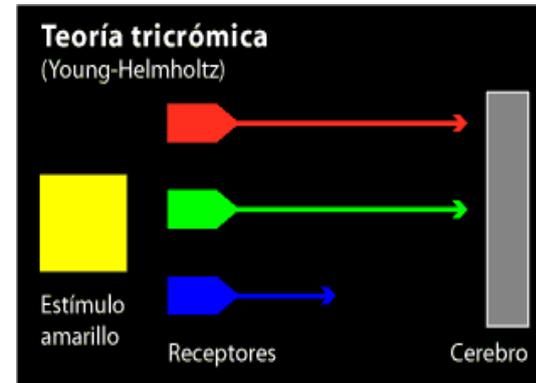
(Neurofisiología – D. Marr - 1973)

- **Receptores en retina (para la correspondencia del color)**
  - ◆ bastones y tres tipos de conos (teoría de los tres estímulos).
  - ◆ colores primarios (sólo tres colores se utilizan para las imágenes de la pantalla: aproximadamente rojo, verde, azul (RGB)).
  - ◆ Nota: cada uno de los 3 tipos de receptores responden a una amplia gama de frecuencias, no sólo a los tres primarios espectrales.
  
- **Canales antagónicos (para la percepción)**
  - ◆ otras células en la retina y las conexiones neuronales en la corteza visual.
  - ◆ azul-amarillo, rojo-verde, negro-blanco.
  - ◆ 4 colores primarios psicológicos: rojo, verde, azul, y amarillo.
  
- **Células antagónicas (para la percepción)**
  - ◆ efecto espacial (contexto), por ejemplo, contraste simultáneo, inhibición lateral.

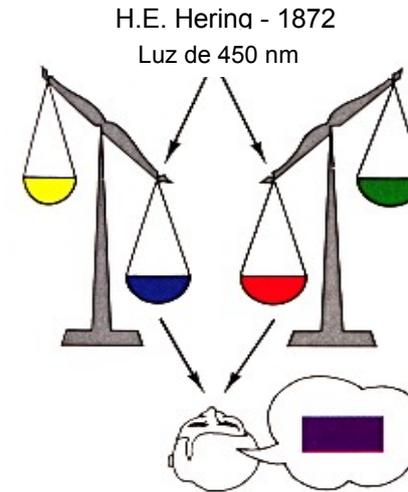




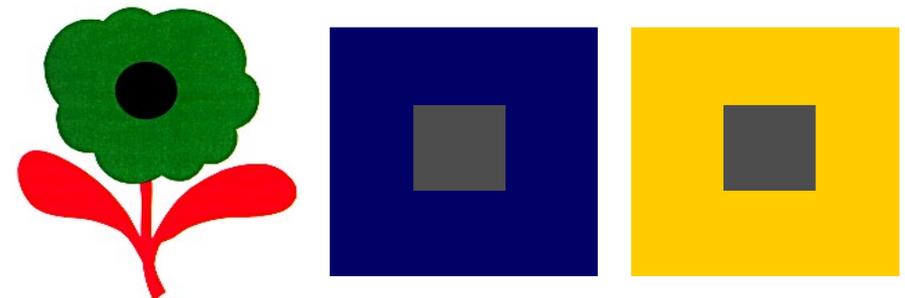
- **Receptores en retina**
  - ◆ Cada uno de los 3 tipos de receptores responden a una amplia gama de de frecuencias, no solo a las tres primarias espectrales.



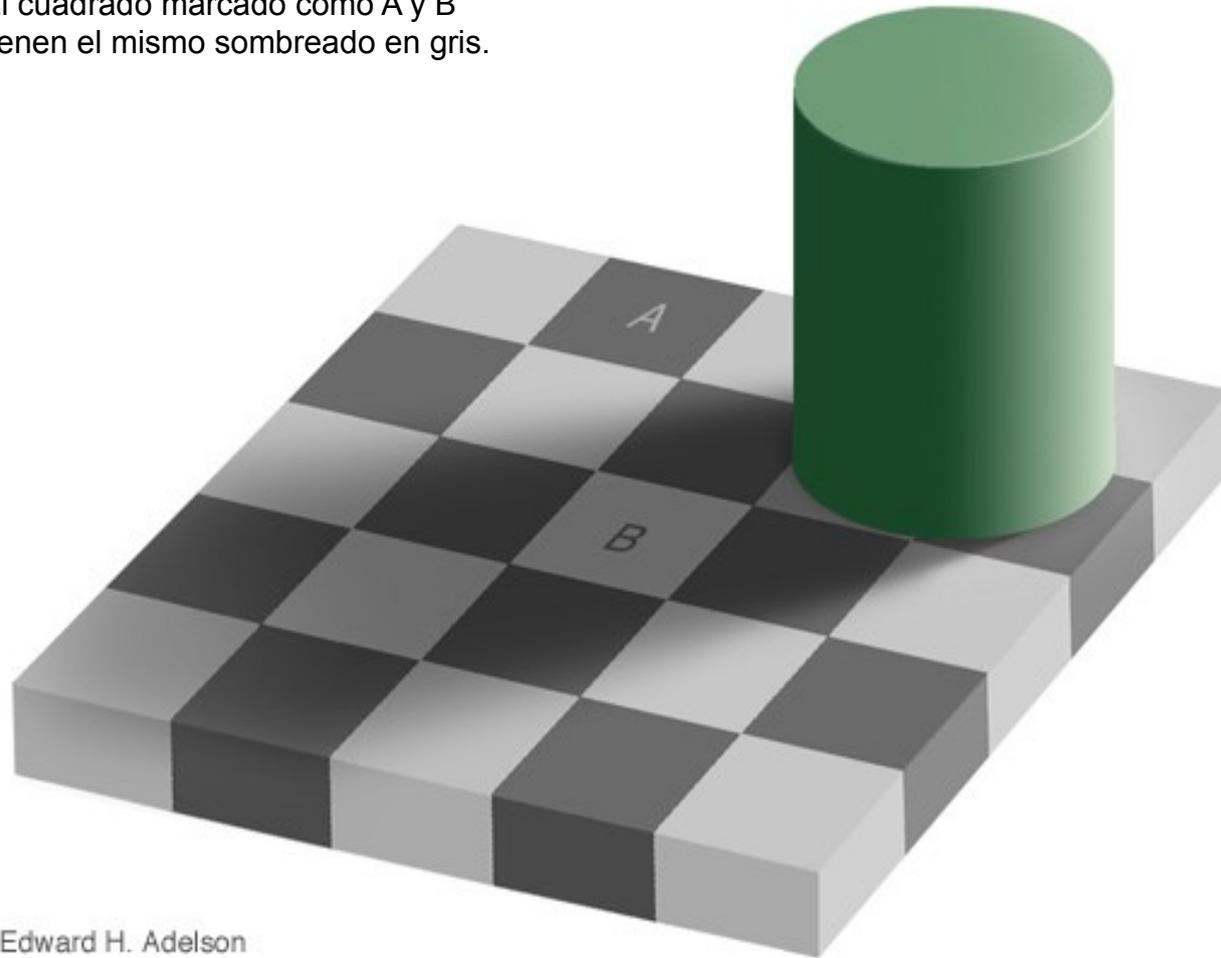
- **Canales antagónicos**
  - ◆ 4 colores primarios psicológicos: rojo, verde, azul, y amarillo.



- **Células antagónicas**
  - ◆ Efecto espacial (contexto) por ejemplo, contraste simultáneo, inhibición lateral, después de las imágenes.

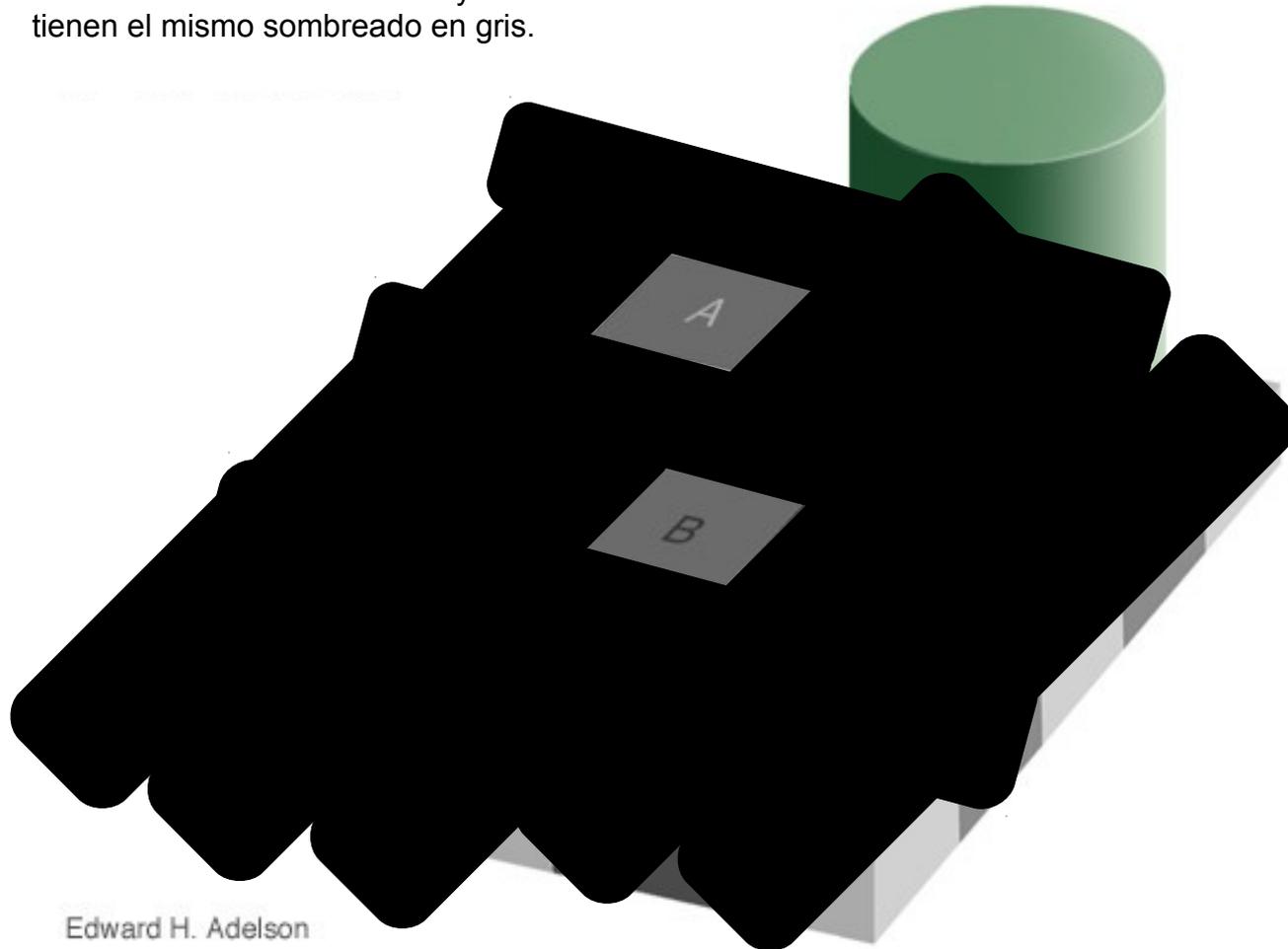


Ilusión de Testeo de sombra:  
El cuadrado marcado como A y B  
tienen el mismo sombreado en gris.



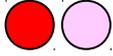
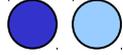
Edward H. Adelson

Ilusión de Testeo de sombra:  
El cuadrado marcado como A y B  
tienen el mismo sombreado en gris.





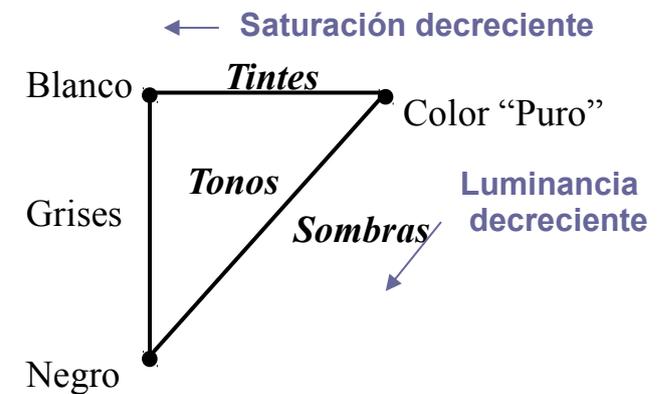
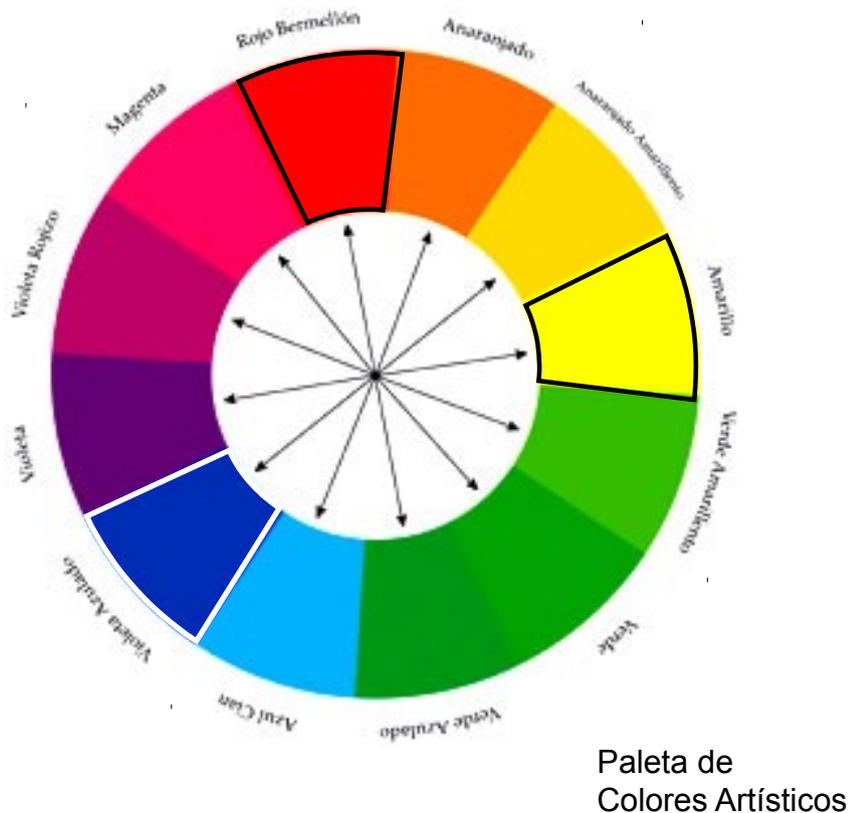
# Atributos Visuales del Color Cromático

- **Matiz** (o tono) distingue entre colores como el rojo, verde, púrpura y amarillo.
- **Saturación** (o pureza) se refiere a la pureza del color, la cantidad de blanco/gris que se mezcla con él.
  - ◆ rojo es altamente saturado; rosa es relativamente saturado 
  - ◆ azul real es altamente saturado, el azul del cielo es relativamente saturado 
  - ◆ pasteles son menos vivos, menos intensos
- **Luminancia** expresa la noción acromática de intensidad percibida de un objeto reflectante.
- **Brillo** se utiliza en lugar de la luminancia para referirse a la intensidad percibida de un objeto auto iluminado (es decir, que emite en lugar de reflejar la luz), como una bombilla de luz, el sol, o un CRT.
- Se puede distinguir ~ 7 millones de colores cuando las muestras son colocadas de lado a lado (**Diferencias Apenas Perceptibles**)
  - ◆ con sólo diferencias de matiz, la diferencia  $\lambda$  de colores DAP son 2 nm en la parte central del espectro visible, 10 nm en los extremos – no existe uniformidad!.
  - ◆ cerca de 128 tonos totalmente saturados son distintos (color puro).
  - ◆ el ojo no puede discriminar con luz menos saturada (de 16 a 23 pasos de saturación de tono fijo y luminosidad), y es poco sensible a la luz menos brillante.

# Representación del Color

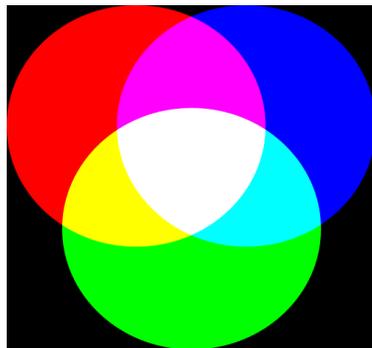
(arte & gráficos)

- Rojo, Azul y Amarillo son Colores Primarios Artísticos.
- Los artistas especifican el color como *Tono*, *Tinte*, *Sombreado* usando pigmentos blancos y negros puros.



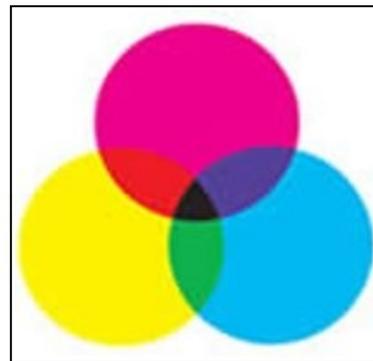
# Experimento de Correspondencia del Color

- Los colores primarios varían dependiendo del medio utilizado.
- Se puede construir un experimento para ver cómo se corresponde una prueba de luces usando mezclas de un conjunto de luces llamadas primarias con un controlador de potencia.



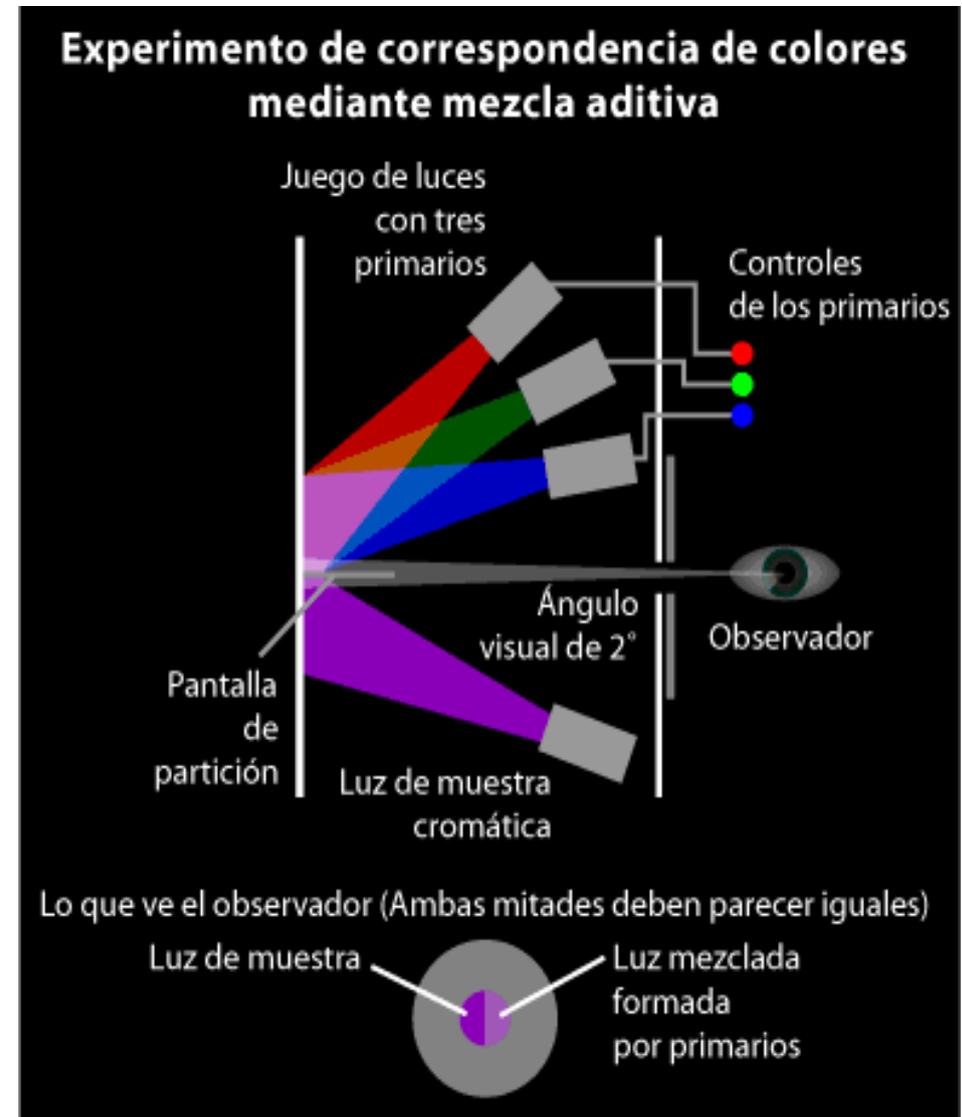
A

Lanzando diferentes luces en el mismo lugar  
(*mezcla aditiva*)

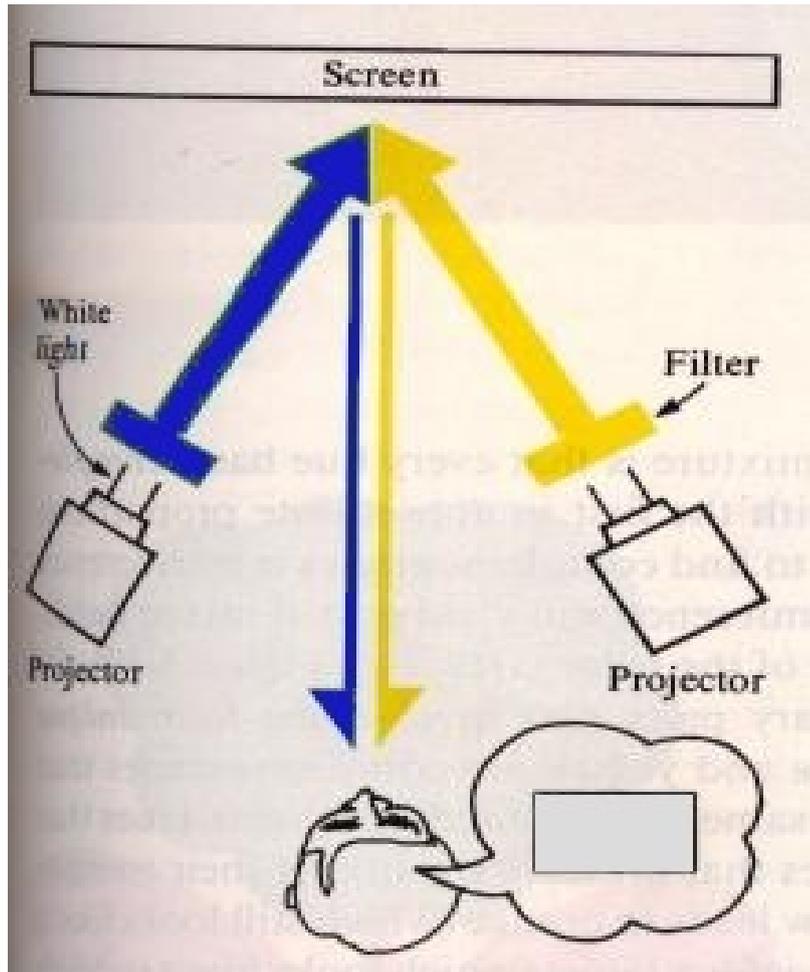


B

Luz que pasa a través de varios filtros  
(*mezcla sustractiva*)



# Mezcla aditiva

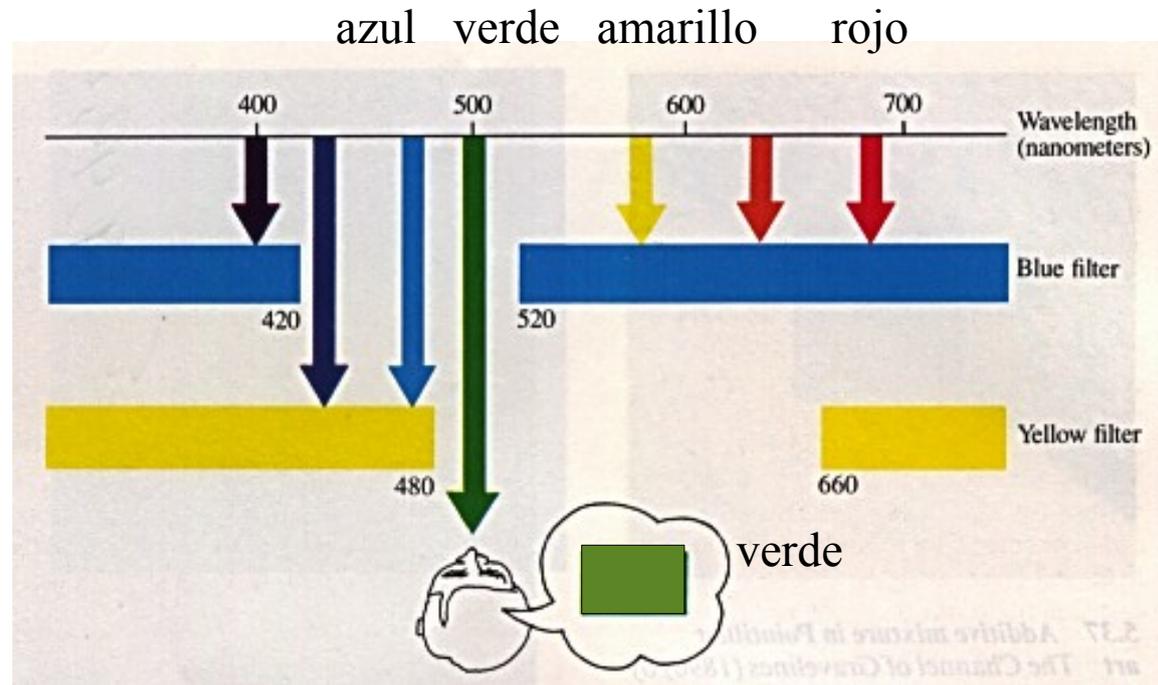


**Mezcla aditiva** usada para mezclar los cañones R, G, B de CRT.

En esta mezcla aditiva, la luz que pasa por dos filtros (o reflejada por dos pigmentos) incide sobre la misma región de la retina al mismo tiempo.

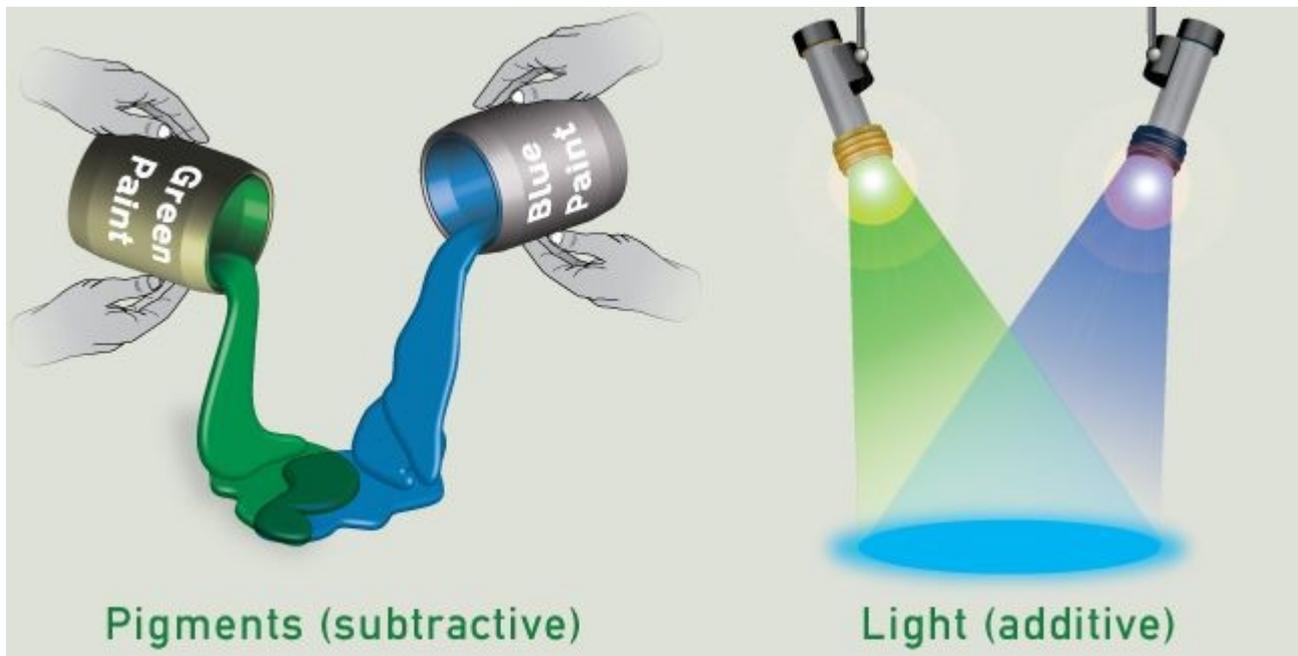
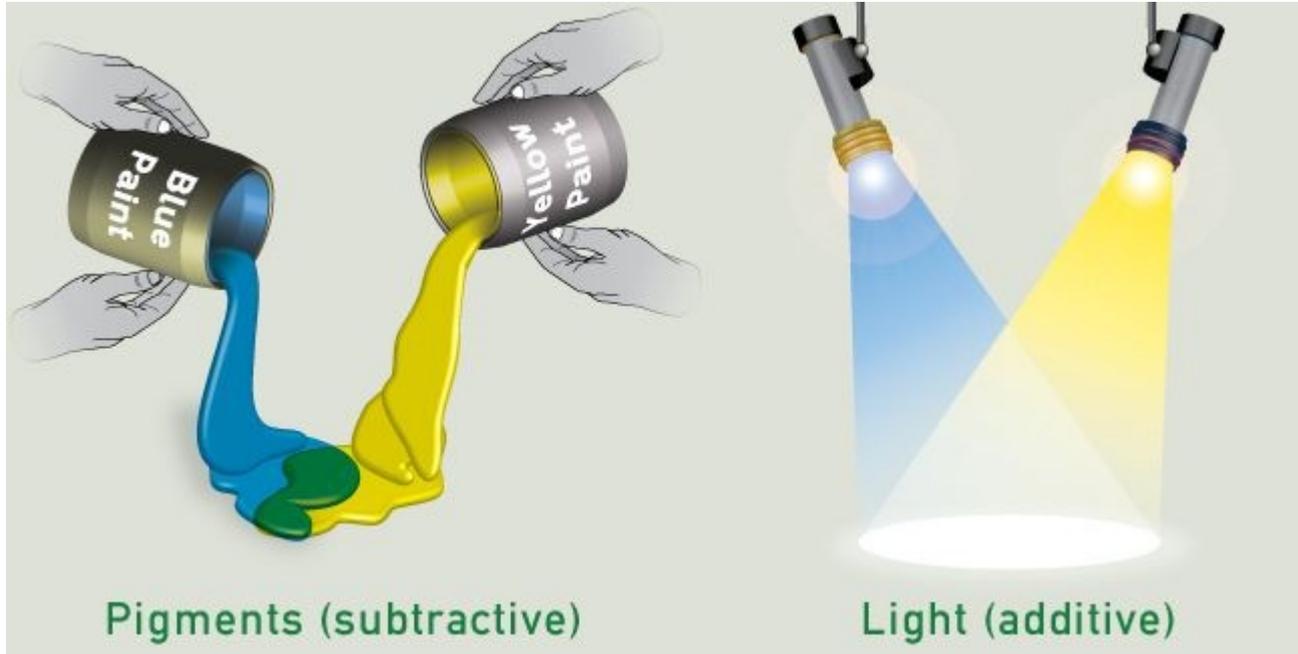
La figura muestra dos proyectores que lanzan luz filtrada **azul** y **amarilla** pura sobre la misma porción de la pantalla desde la cual es reflejada sobre la misma región de la retina. El resultado de la adición de estos dos colores es luz gris.

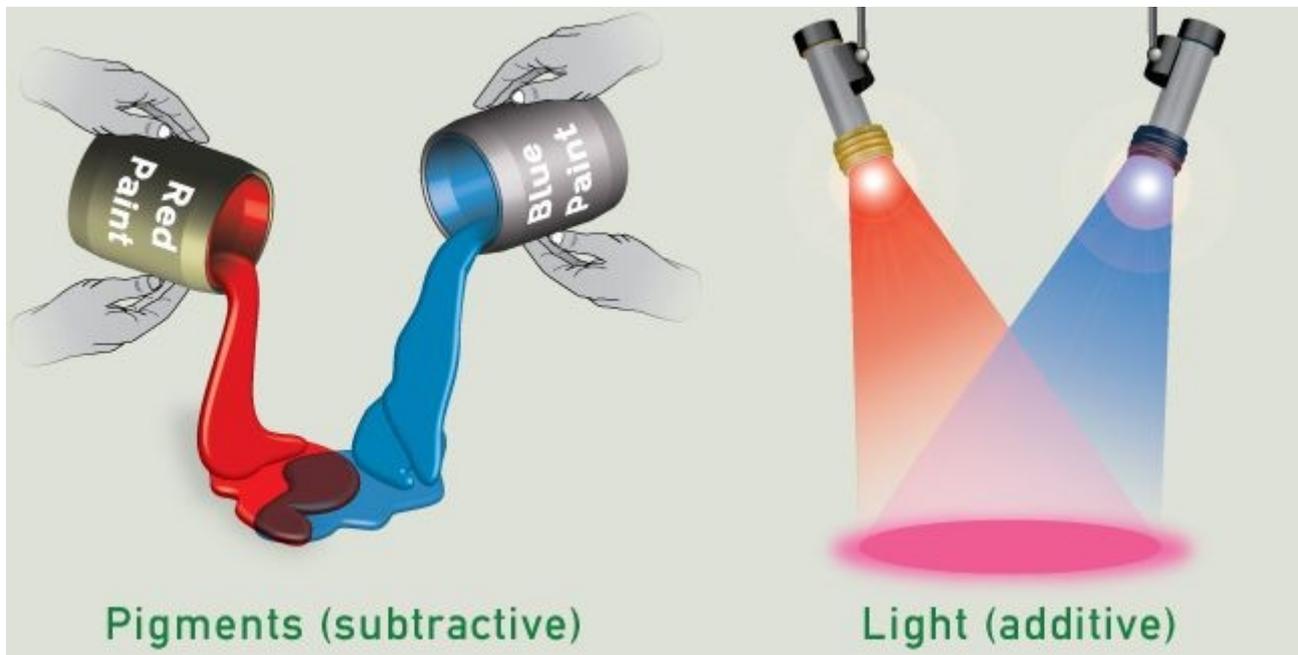
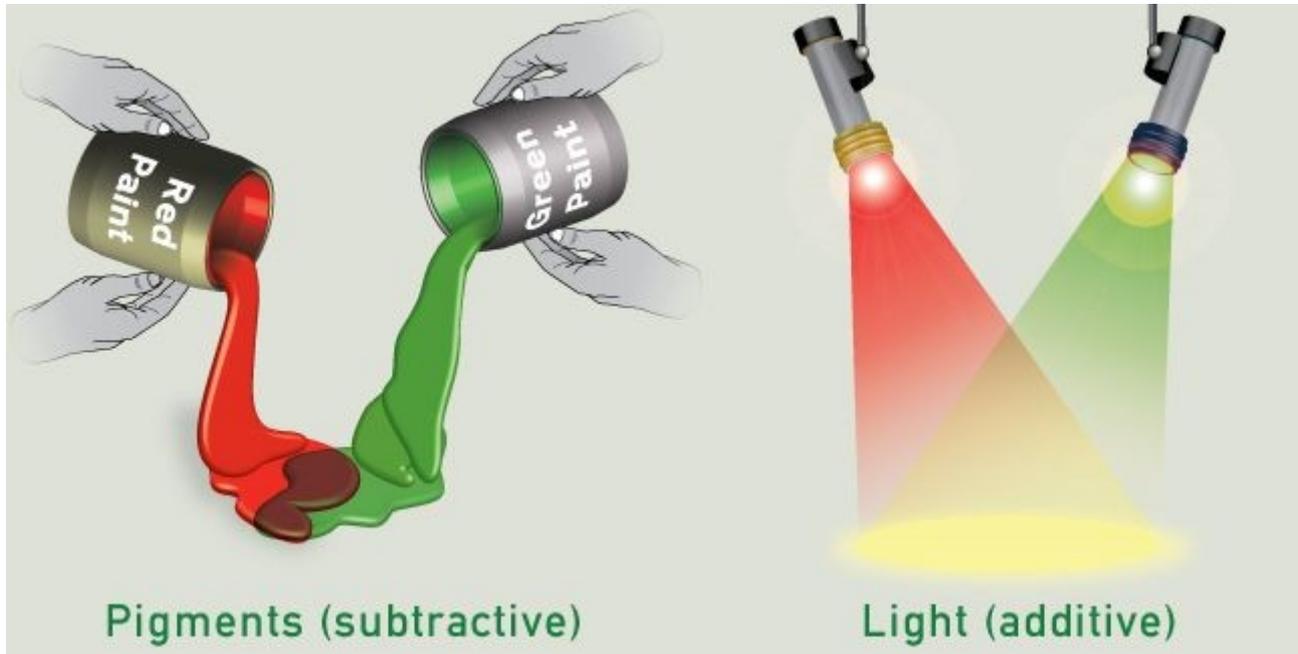
# Mezcla Sustractiva



**Mezcla sustractiva** ocurre con la tinta para soporte de impresión, pinturas que absorben la luz. En la mezcla sustractiva, la luz pasa por dos filtros (o es reflejada por dos pigmentos mezclados); es la banda de longitudes de onda que pasa por la primera menos la región que es sustraída por la segunda.

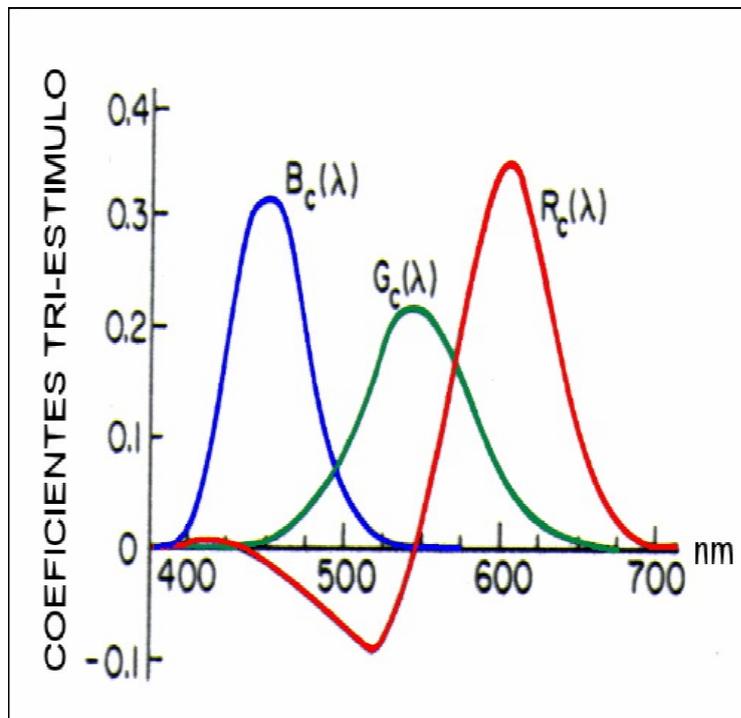
En este ejemplo, el primer filtro deja pasar la luz entre 420 y 520 nanómetros (un filtro **azul** de banda ancha), mientras que en el segundo pasa la luz entre 480 y 660 nanómetros (un filtro **amarillo** de banda ancha). La única luz que puede pasar a través de ambos se encuentra en la región entre 480 y 520 nanómetros, la cual se ve de color **verde**.





# Correspondencia del Color

- La teoría tricromática sustenta la idea de hacer coincidir todos los colores visibles con combinaciones de colores “primarios” mono-espectrales “rojo,” “verde,” y “azul”; esto casi funciona.



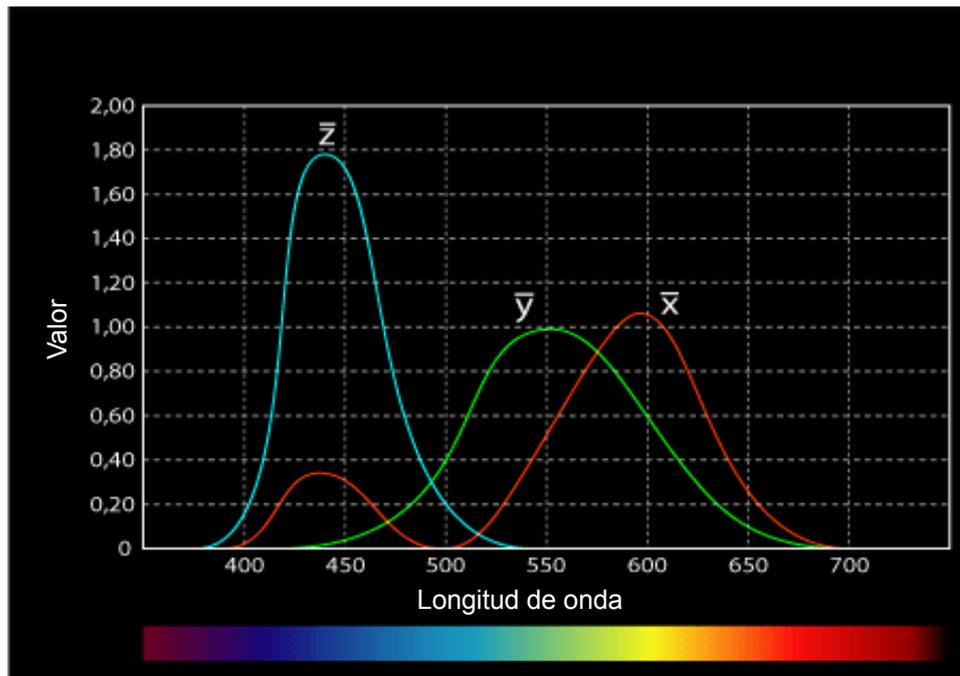
Funciones de correspondencia de color, muestran las cantidades de los tres primarios necesarias para que el observador promedio logre la correspondencia de un color de luminancia constante, para todos los valores de longitud de onda dominante en el espectro visible.

- Nota: estas NO son funciones de respuesta!. Son funciones matemáticas!.
- Valor negativo de  $R_c(\lambda) \Rightarrow$  no se puede igualar, se debe “sustraer,” es decir, sumar esa cantidad a lo desconocido.
- Se debe tener en cuenta que la mezcla de cantidades positivas de primarios arbitrarios  $R, G, B$  proveen una amplia gama de colores, por ejemplo, CRT. Pero ningún dispositivo basado en un número finito de primarios puede mostrar todos los colores!

# Espacio CIE para Correspondencia de Color

- **Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)**
- Definidos **X**, **Y**, y **Z** primarios para reemplazar los primarios rojo, verde y azul.
- $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$  y  $\bar{z}_\lambda$ , funciones de correspondencia de color para estos primarios
  - **Y** elegido para que  $\bar{y}_\lambda$  coincida con la función de eficiencia luminosa
  - $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$ , y  $\bar{z}_\lambda$  son combinaciones lineales  $R_c(\lambda)$ ,  $G_c(\lambda)$  y  $B_c(\lambda)$ .

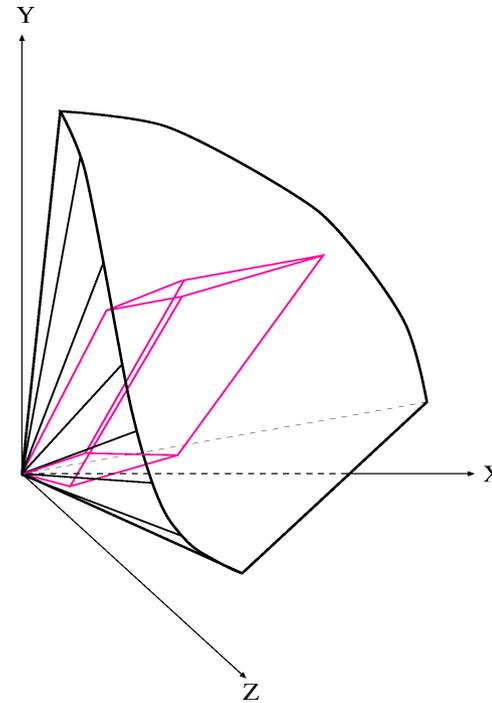
=> **RGB**  $\Leftrightarrow$  **XYZ** via una matriz.



Las funciones matemáticas de correspondencia de color  $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$ , y  $\bar{z}_\lambda$  para el CIE 1931 **X**, **Y**, y **Z primarios**.

Están definidas tabularmente en intervalos de 1nm para muestras de color delimitadas por el 2° campo de visión en la retina.

# Espacio de Color CIE



Espacio de color **XYZ** y gama de color para un monitor de color típico.

Notar la forma irregular de la gama visible en el espacio CIE; esto se debe a la respuesta del ojo tal como se mide por las curvas de respuesta (independientemente de los recursos de visualización).

La gama de colores que se pueden visualizar en el monitor es claramente más pequeño que todos los colores visibles en el espacio **XYZ**.

**Cromaticidad** – Todo lo que involucra (Tono, Pureza) con color, no luminancia/brillo.



# Diagrama de Cromaticidad CIE

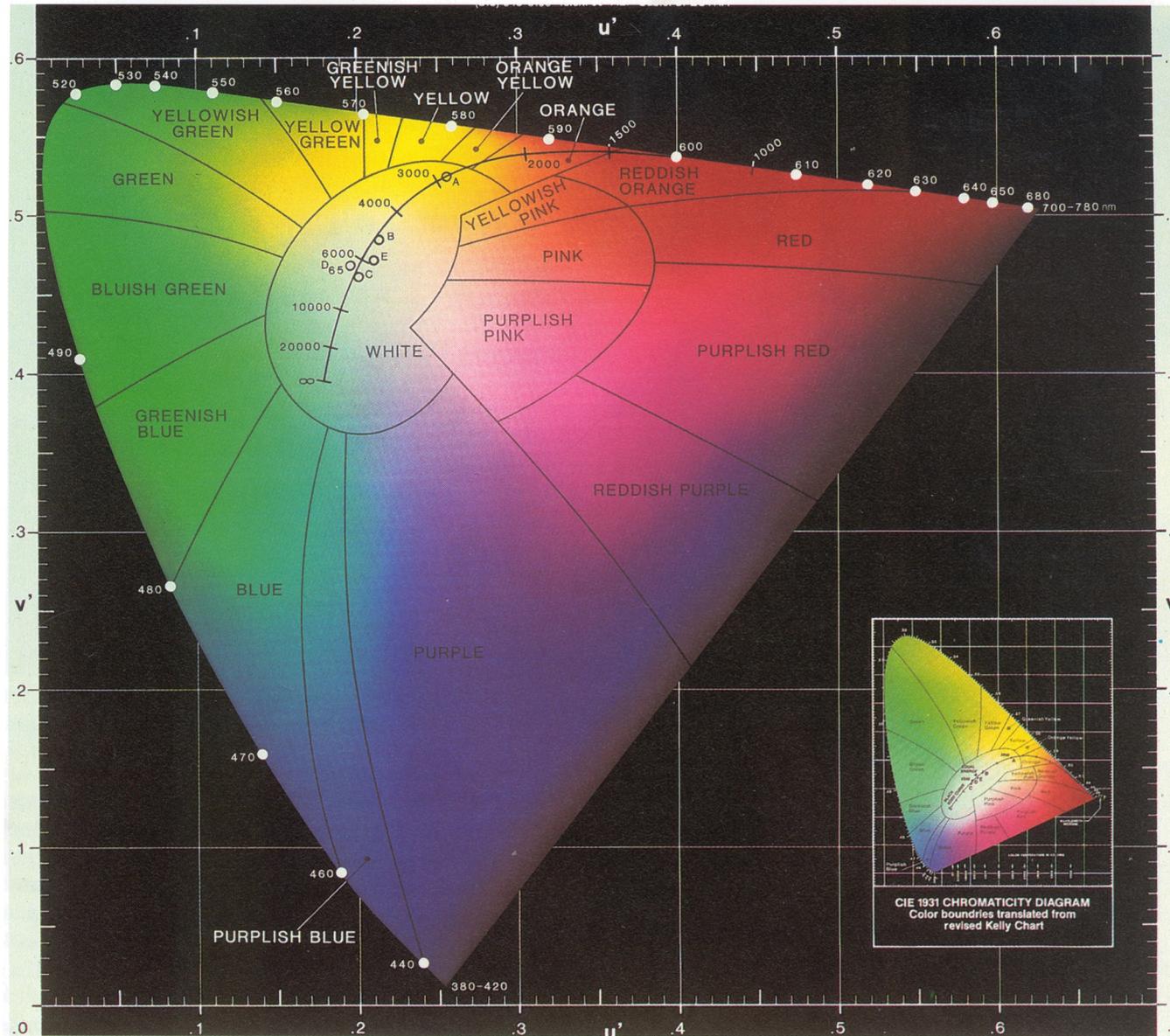
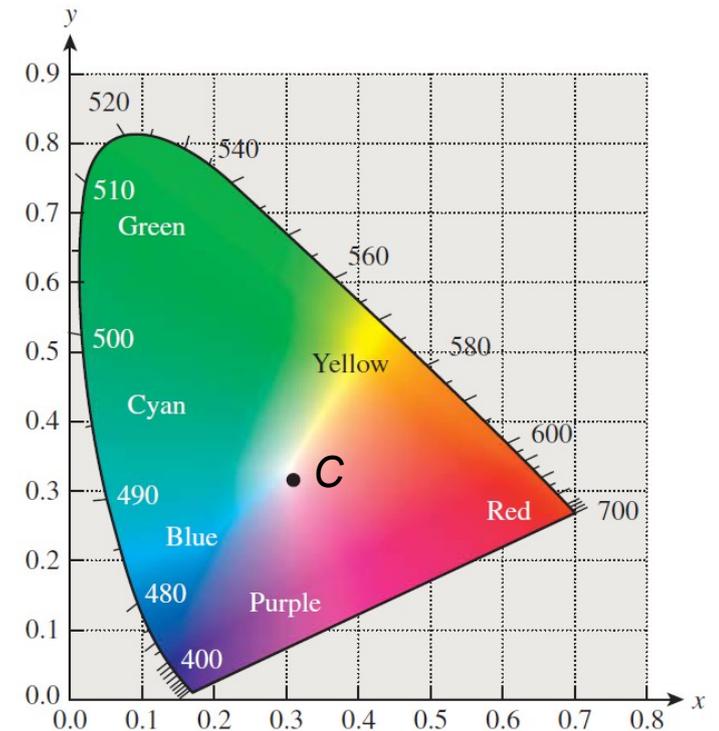
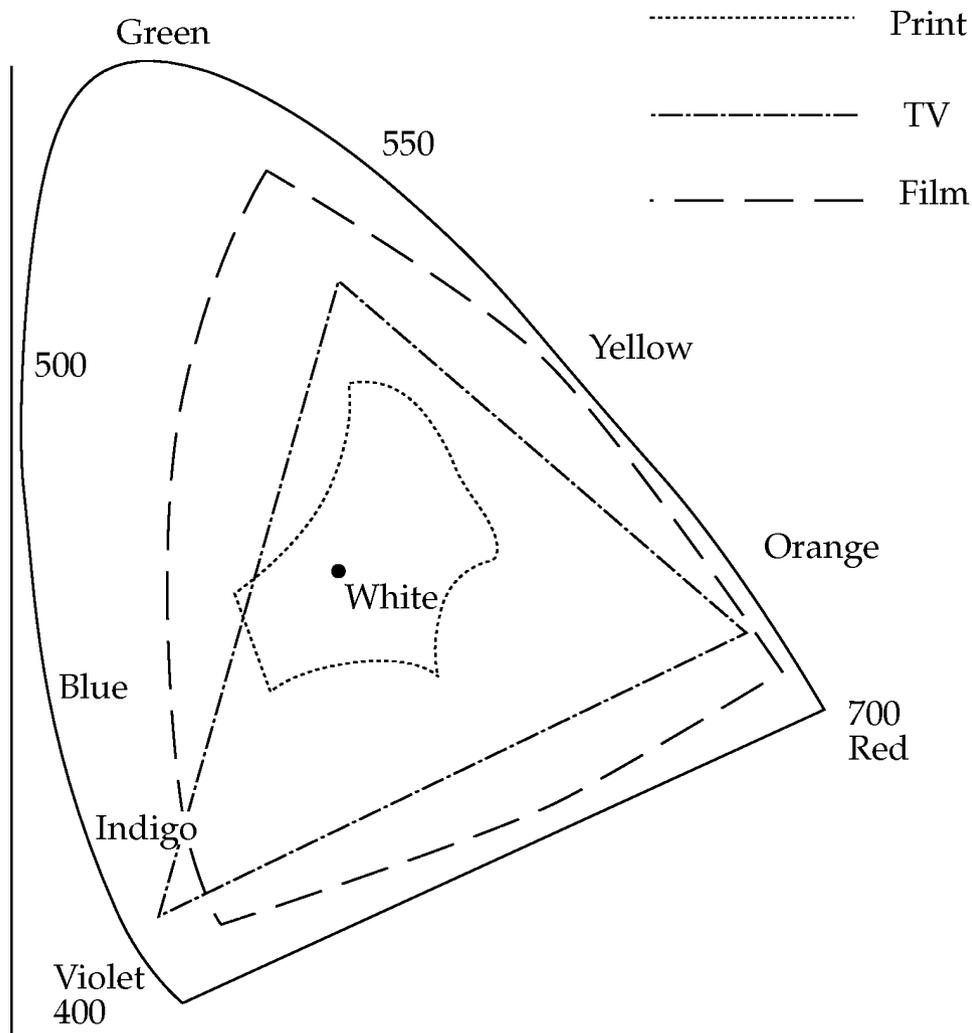


Diagrama de cromaticidad CIE 1976 UCS de Electronic Color: The Art of Color Applied to Graphic Computing by Richard B. Norman, 1990

Recuadro: CIE 1931 diagrama de cromaticidad

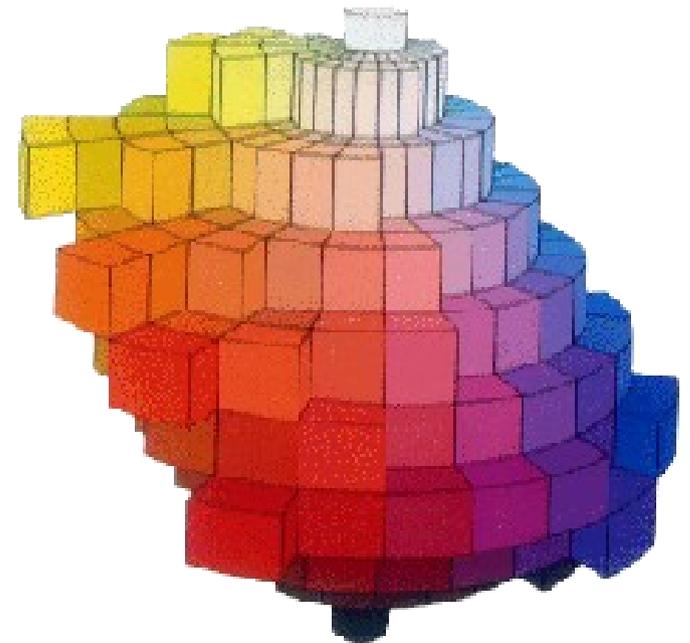
# Gama de Colores (Gamut)

- Gamut de impresión limitado con respecto a la gama de colores del monitor => para una reproducción fiel en impresión se debe utilizar un gamut reducido en el monitor.



# Modelos de Color para Gráficos de Mapas de Bits

- Propósito: especificar los colores en algún gamut.
- Dado que la gama es un subconjunto de todas las cromaticidades visibles, el modelo no contiene todos los colores visibles.
- Es un subconjunto del Sistema de Coordenadas de color 3D que contiene todos los colores dentro de una gama.
- Provee posibilidades de conversión a otros modelos.
- Ejemplo de Modelo de color: RGB
  - ◆ Sistema de coordenadas cartesianas 3D
  - ◆ Subconjunto cubo unidad
  - ◆ Utiliza el espacio CIE **XYZ** para convertir desde todos los otros modelos.



Espacio de Color Munsell

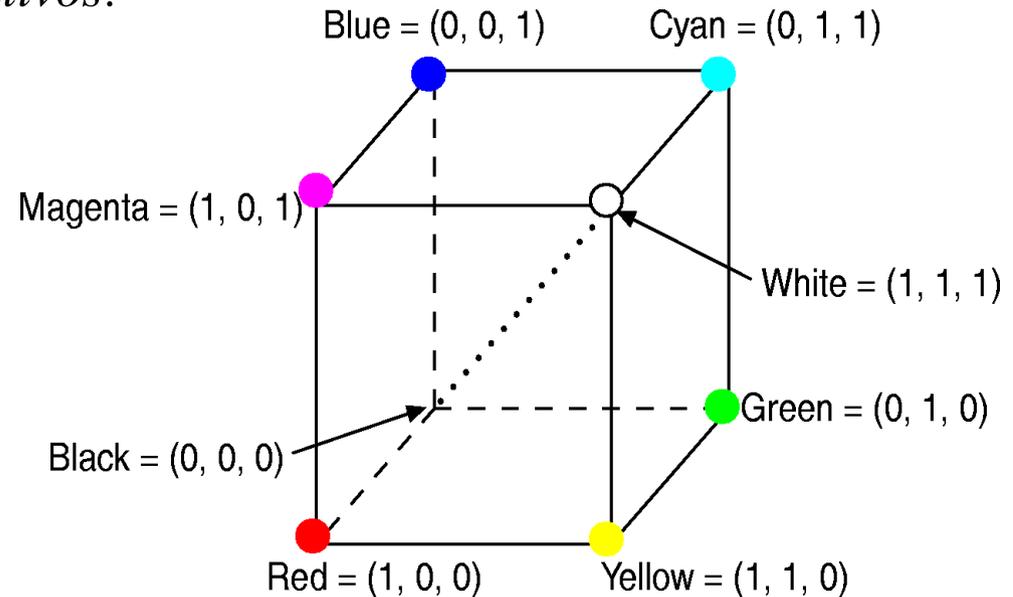


# Modelos de Color para Gráficos de Mapas de Bits

- Modelos orientados al hardware: no intuitivos – no están relacionados con los conceptos de tono, saturación y brillo.
  - ◆ RGB, utilizado con monitores color CRT
  - ◆ YIQ, el sistema de color de televisores
  - ◆ CMY (cian, magenta, amarillo) para impresión color
  - ◆ CMYK (cian, magenta, amarillo, negro) para impresión color
  
- Modelos orientados al usuario
  - ◆ CIE Lab
  - ◆ HSV (tono, saturación, valor) – también llamado HSB (tono, saturación, brillo)
  - ◆ HLS (tono, luminancia, saturación)
  - ◆ El sistema Munsell

# El Modelo de Color RGB

- Los primarios de RGB son *aditivos*:

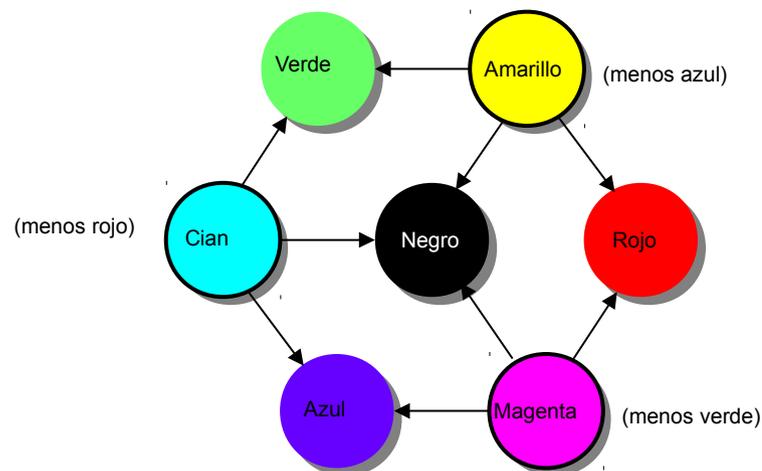


El cubo RGB (Grisés están sobre los puntos de la diagonal principal)

- Diagonal principal  $\Rightarrow$  niveles de grises
  - Negro es  $(0, 0, 0)$
  - Blanco es  $(1, 1, 1)$
- Gama de color RGB definida por cromaticidades en fósforo CRT
  - Difiere al formar un CRT a otro

# El Modelo de Color CMY(K)

- Se utiliza en electrostática y en plotters de inyección de tinta que depositan pigmentos sobre papel.
- Cian, magenta, y amarillo son complementos de rojo, verde, y azul.
- *Primarios sustractivos*: los colores se especifican por lo que se elimina o se resta de la luz blanca, en lugar de por lo que se añade al negro.
- Sistema de coordenadas cartesianas.
- El subconjunto es el cubo unidad.
  - ◆ blanco esta en el origen, negro en (1, 1, 1):



primarios sustractivos (cian, magenta, amarillo) y sus mezclas

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



# El Modelo de Color YIQ

- Es la recodificación de RGB para transmisión eficiente y en compatibilidad con la televisión B/N; usado para NTSC (National Television Standards Committee (cínicamente, “nunca es el mismo color”))
- $Y$  es *luminancia* – el mismo que en CIE  $Y$  primario.
- $I$  y  $Q$  codifican *cromaticidad*.
- Solo  $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$  se muestra en monitores B/N:

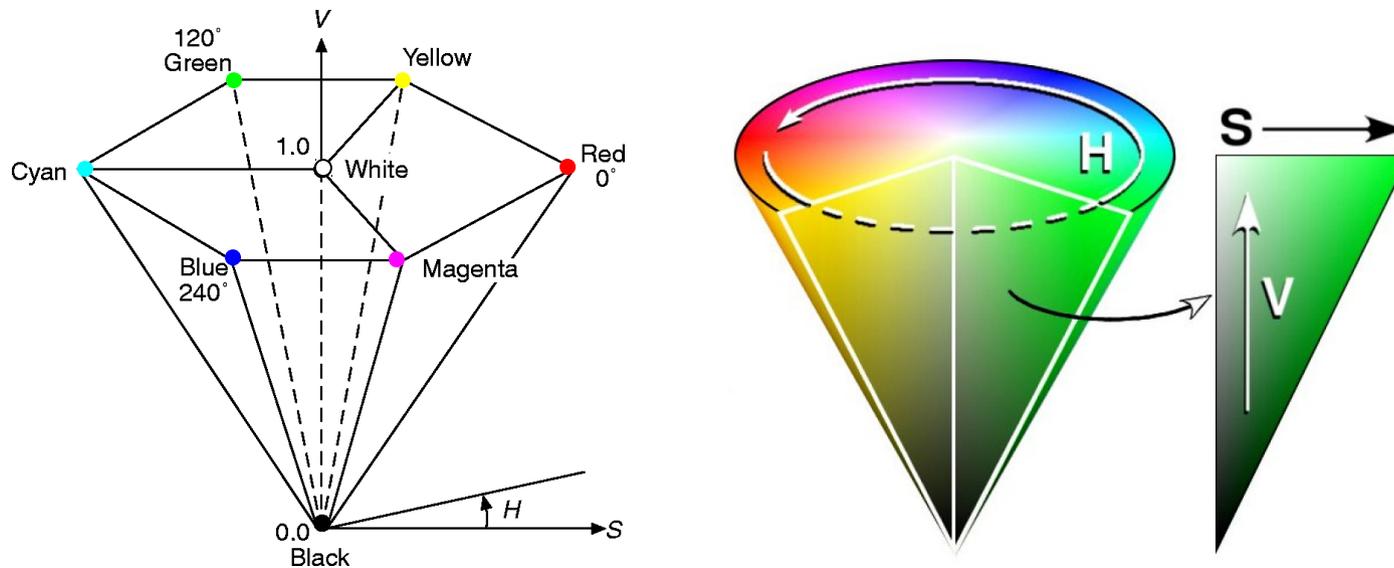
- ◆ los valores indican el brillo relacionado a cada primario
- ◆ asume que los puntos blancos están iluminados  
C:  $x_w = 0.31$ ,  $y_w = 0.316$ , y  $Y_w = 100.0$

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.59 & 0.11 \\ 0.60 & -0.28 & -0.32 \\ 0.21 & -0.52 & 0.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

- En la preparación del material de color que puede verse en televisores B/N, colores adyacentes deberían tener diferentes valores de  $Y$ .
- Codificación NTSC de YIQ:
  - 4 MHz       $Y$  (ojos más sensibles a la luminancia  $r$ )
  - 1.5 MHz     $I$  (naranja y ciano)
  - 0.6 MHz     $Q$  (verde y magenta)

# El Modelo de Color HSV

- *Tono, Saturación, Valor* (brillo)
- Subconjunto (cono Hexagonal) del sistema de coordenadas cilíndricas (polar).

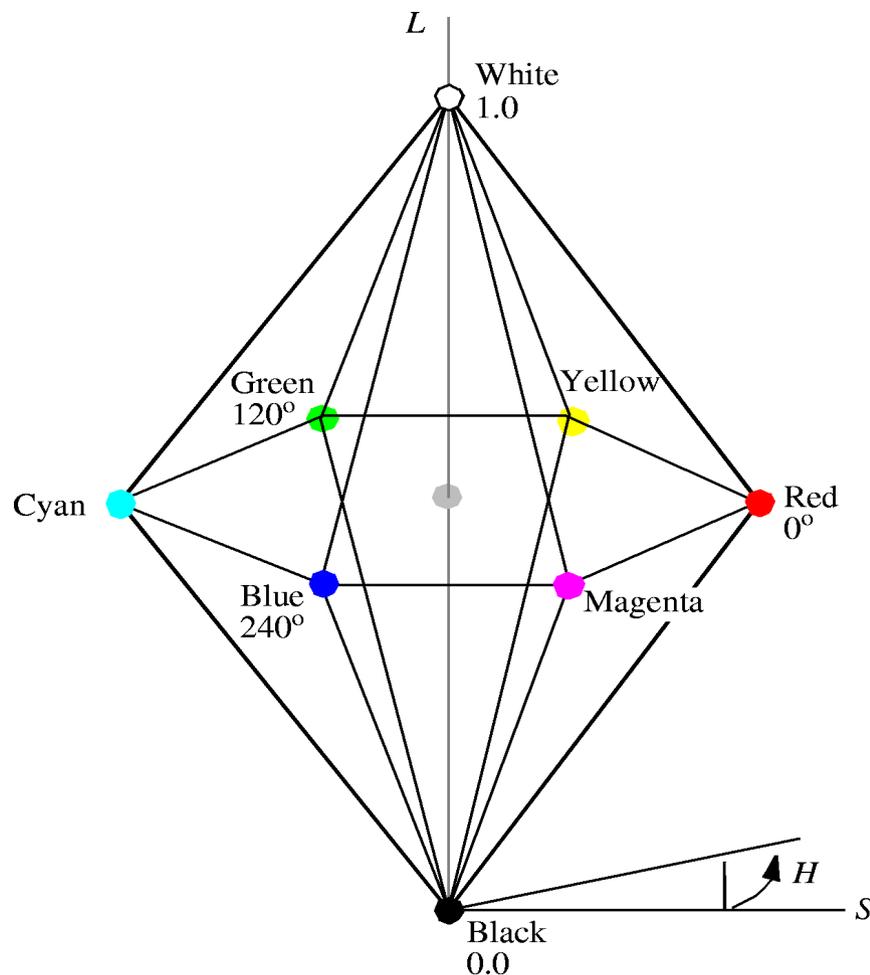


Modelo de color HSV con un único cono hexagonal.  
(El plano  $V = 1$  contiene el modelo RGB con  $R = 1, G = 1, B = 1$ , en la región ilustrada)

- Tiene la apariencia intuitiva del modelo artístico con tono, matiz y sombreado
  - ◆ Rojo puro =  $H = 0, S = 1, V = 1$ ; pigmentos puros son  $(H, 1, 1)$
  - ◆ Saturación: agregando pigmento blanco  $\leftrightarrow$  disminución de  $S$  en constante  $V$
  - ◆ Sombras: agregando pigmento negro  $\leftrightarrow$  disminución de  $V$  en constante  $S$
  - ◆ Tonos: disminución de  $S$  y  $V$

# El Modelo de Color HLS

- *Tono, Luminancia, Saturación*
- El subconjunto es un doble cono hexagonal



- Los máximos tonos saturados están en  $S = 1, L = 0.5$ .
- Poco atractivo para selectores por disco y deslizamiento.
- Ni V ni L corresponden a Y en YIQ!.
- Conceptualmente es más fácil para algunas personas ver el blanco como un punto.

# El Modelo de Munsell

- Espacio 3D perceptualmente uniforme.
- Supone que un amarillo brillante tiene más luz que el azul brillante. Las saturaciones de azul deben ser más distinguibles que las de amarillo.
- La magnitud de cambio en un parámetro debe asociarse con la percepción.
- Tonos ordenados en un círculo. 20 grados del círculo producen la misma percepción, sin cambio de saturación.
- La saturación depende de la distancia del centro del círculo.
- El valor/brillo se representa en forma vertical.

