

TV: TeleVisión – Plan 2010

Sistema visual humano y colorimetría

Índice

★ Sistema visual humano

- ★ Estructura del ojo humano
- ★ Foto-receptores
- ★ Percepción del color

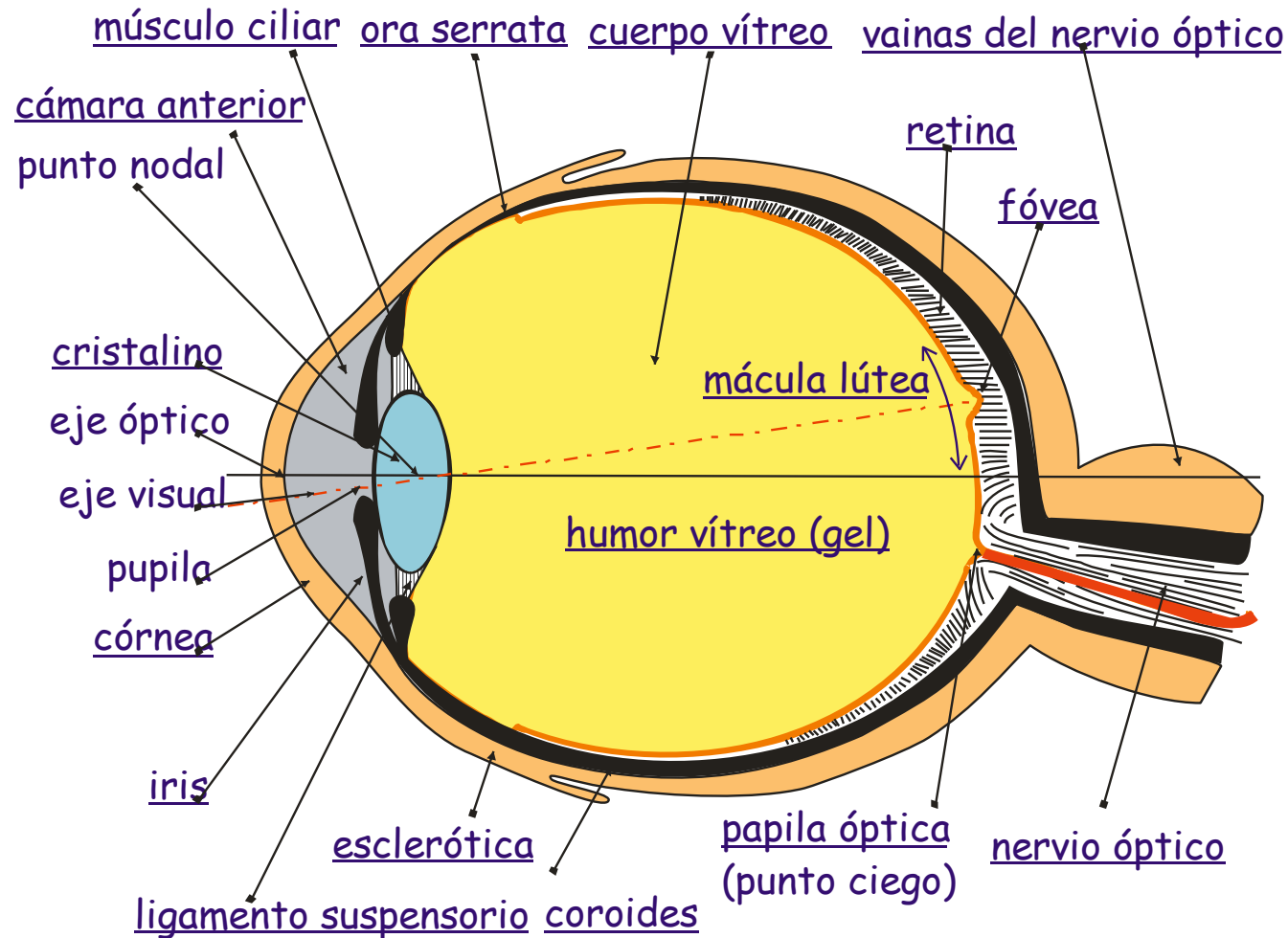
★ Colorimetría

- ★ Fundamentos, metámeros y colores primarios
- ★ Efecto de la iluminación
- ★ Sistemas CIE RGB y XYZ (1931)

★ Modelos de apariencia de color

- ★ Espacios de color uniforme: sistemas de Munsell (1900's) y CIELAB & CIELUV (1976)
- ★ CIECAM (1997, 2002)

Estructura del ojo humano: esquema

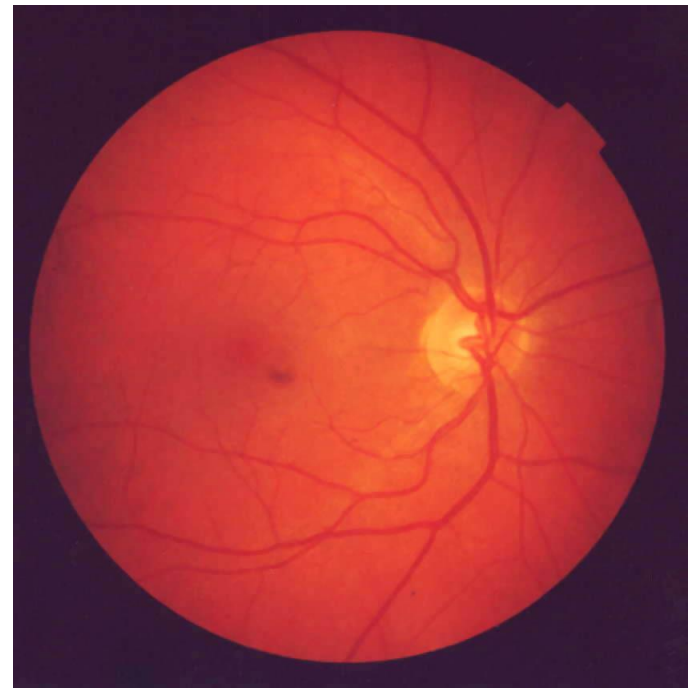


Estructura del ojo humano: descripción

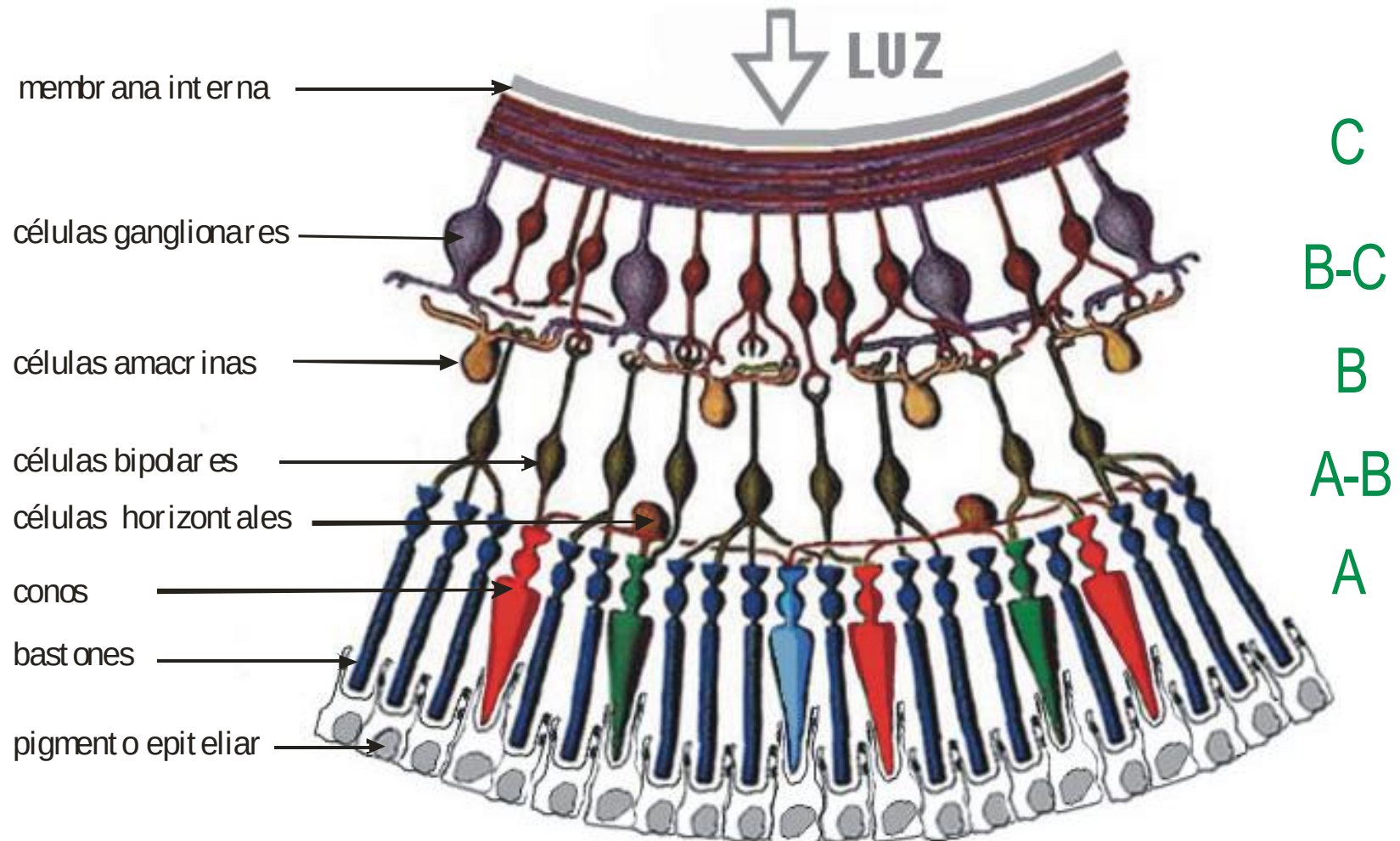
- ★ **Córnea:** parte anterior transparente de la esclerótica (capa superficial del ojo), cuya cara interior está recubierta por la membrana coroides, capa pigmentada sobre la que se extiende la retina, que es donde se forma y capta la imagen
- ★ **Pupila:** apertura en el centro del iris (músculo circular coloreado) cuyo tamaño varía en función de la intensidad luminosa
- ★ **Cristalino:** lente biconvexa conectada con el músculo ciliar a través del ligamento suspensorio; la imagen se enfoca estirando el cristalino (la pequeña curvatura de la córnea hace también de lente)

Retina

- ★ Recubre 2/3 del globo ocular
- ★ Papila óptica: “punto ciego” por ser un orificio para el paso del nervio óptico (el cerebro interpola en esa área)
- ★ Fóvea: depresión central de la mácula lútea (mancha amarilla)
- ★ Dos capas
 - ✱ Exterior, pigmentada
 - ✱ Interior, neuronal (transparente y lisa)



Retina neuronal: esquema



Retina neuronal: descripción

★ Tres capas celulares ($\Rightarrow$ dos capas sinápticas)

- ★ A: foto-receptores (conos y bastones) con pigmentos visuales que permiten respuestas diferenciadas según la longitud de onda
- ★ B: neuronas intermedias (bipolares, horizontales y amacrinas)
- ★ C: células ganglionares

★ Funciones

- ★ Transducción
- ★ Compresión
- ★ Adaptación a la luz
- ★ Filtrado espacial
- ★ Codificación de la longitud de onda recibida

Foto-receptores: dos tipos

★ Bastones

- ★ Unos 150 M, repartidos por toda la retina, salvo la fóvea (y . ciego)
- ★ Grosor 1-2 μm
- ★ Sensibilidad mínima 1 nL
- ★ Responsables de la visión escotópica (baja iluminación)

★ Conos

- ★ Unos 5-7 M, muy concentrados en la fóvea
- ★ Tamaño muy variable 1-50 μm
- ★ Sensibilidad mínima 1 μL (y menor velocidad de respuesta)
- ★ Responsables de la visión fotópica y de la percepción del color
- ★ Tres tipos: L, M y S (*Long, Medium & Short wavelength*), no del todo correctamente asociados a colores primarios R, G y B (*Red, Green & Blue*), y en proporción 40 : 20 : 1

Foto-receptores: distribución en la retina

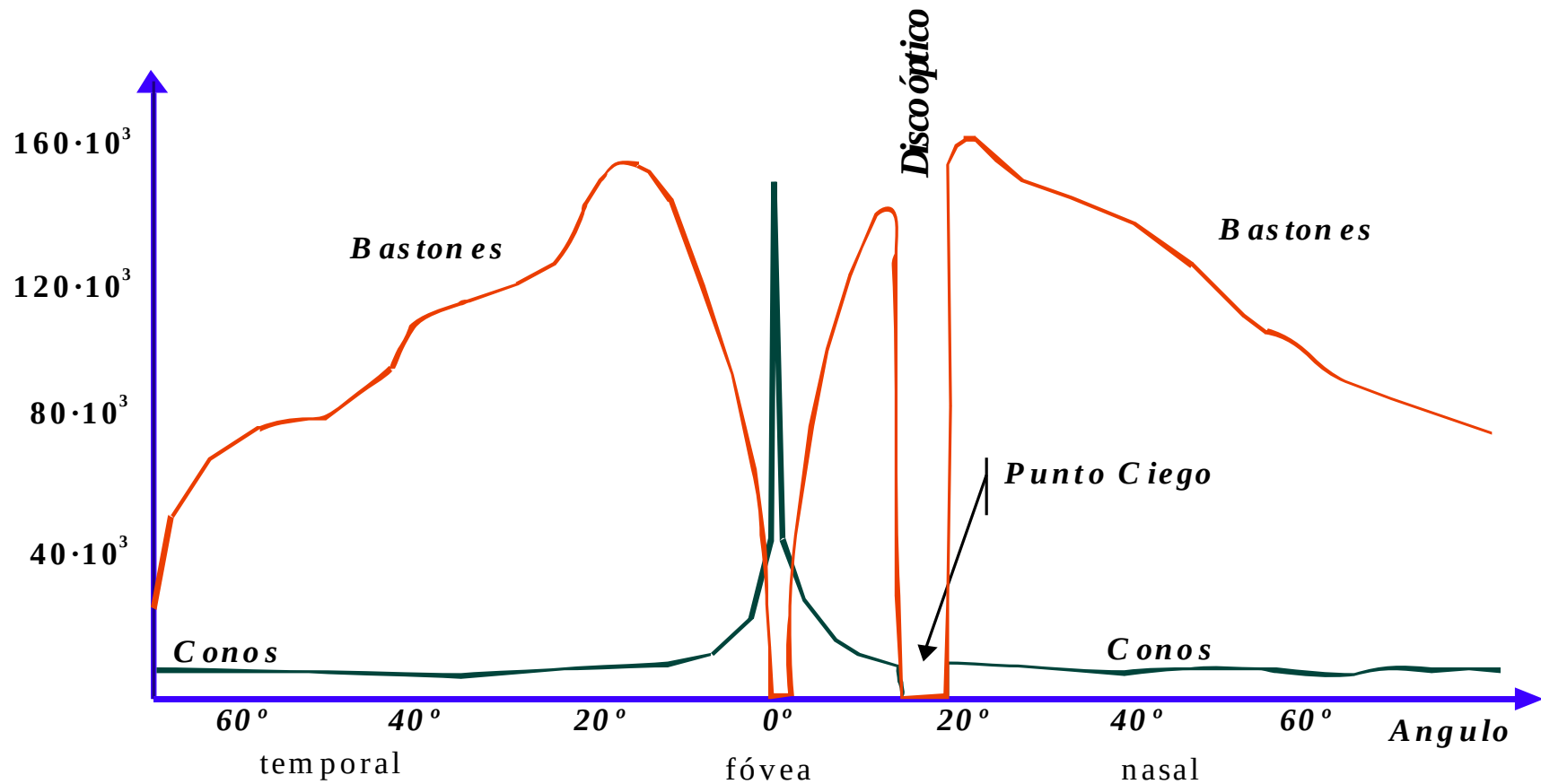
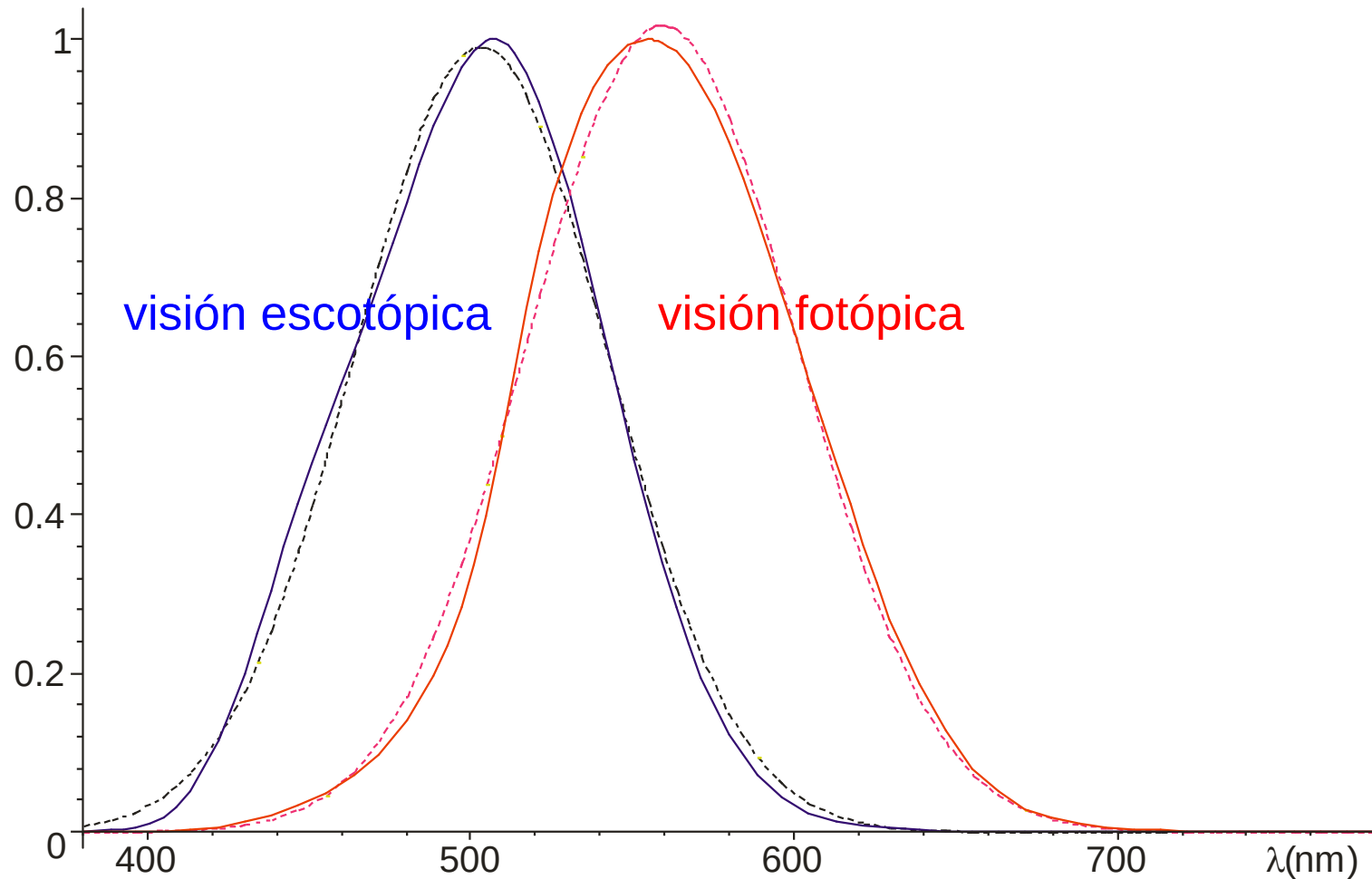
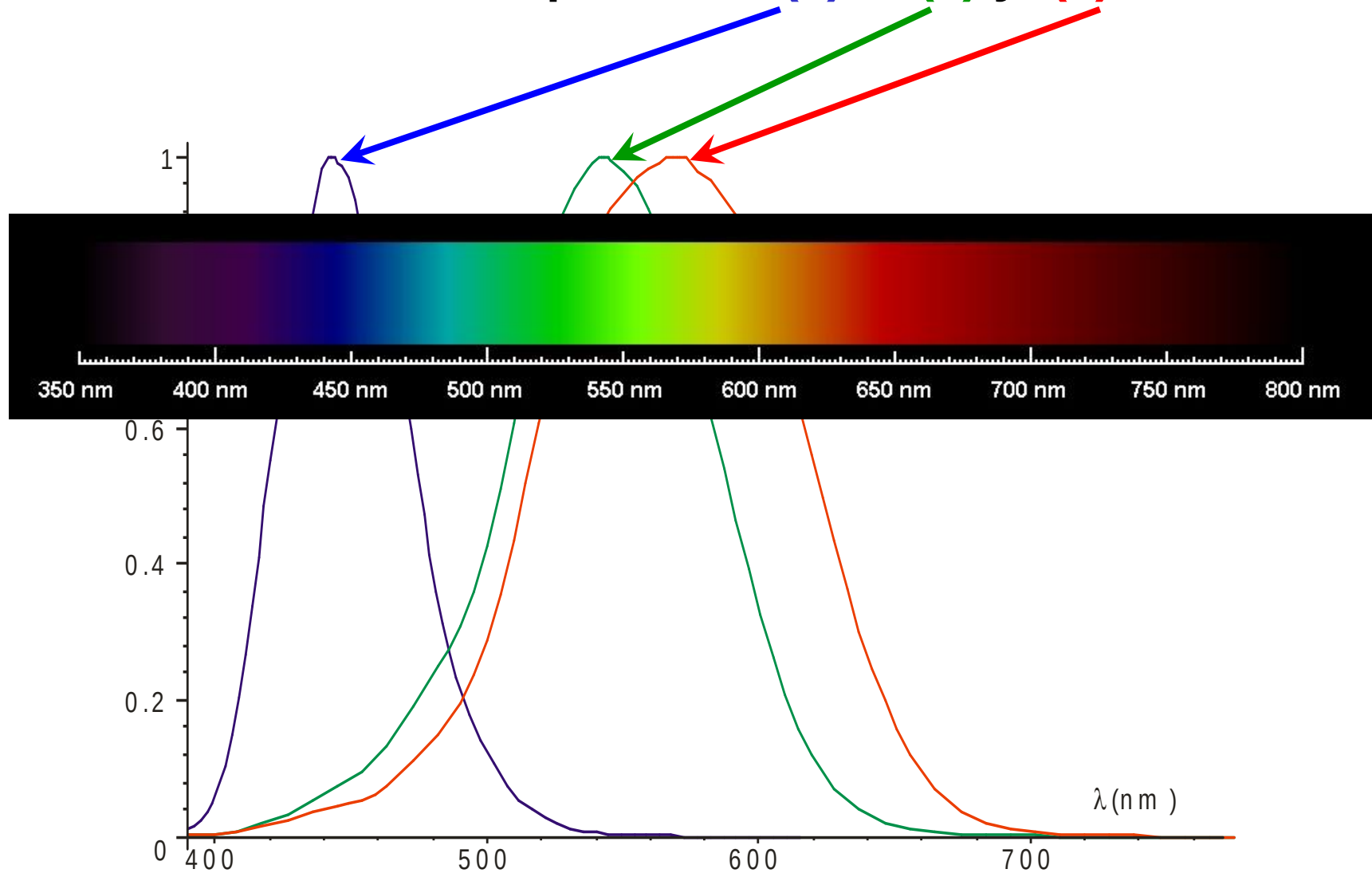


Foto-receptores: eficiencia luminosa



Conos: respuestas $s(\lambda)$, $m(\lambda)$ y $l(\lambda)$



Percepción del color: teoría tricromática

★ Trabajos de Young, Maxwell & Helmholtz (2ª mitad s. XIX)

- ★ Tres tipos de receptores recubriendo la retina
- ★ Salidas proporcionales a la excitación recibida
- ★ Parecido a un espacio vectorial 3D

★ Grassman (1853)

★ Leyes rigiendo ese “espacio vectorial 3D”

- Si $A \leftrightarrow B$, entonces $B \leftrightarrow A$ ($\leftrightarrow$ significa “se percibe como el mismo color”)
- Si $A \leftrightarrow B$ y $B \leftrightarrow C$, entonces $A \leftrightarrow C$
- Si $A \leftrightarrow B$, entonces $kA \leftrightarrow kB$
- Si se verifican cualesquiera dos de $A \leftrightarrow B$, $C \leftrightarrow D$ o $(A+C) \leftrightarrow (B+D)$, entonces $(A+D) \leftrightarrow (B+C)$

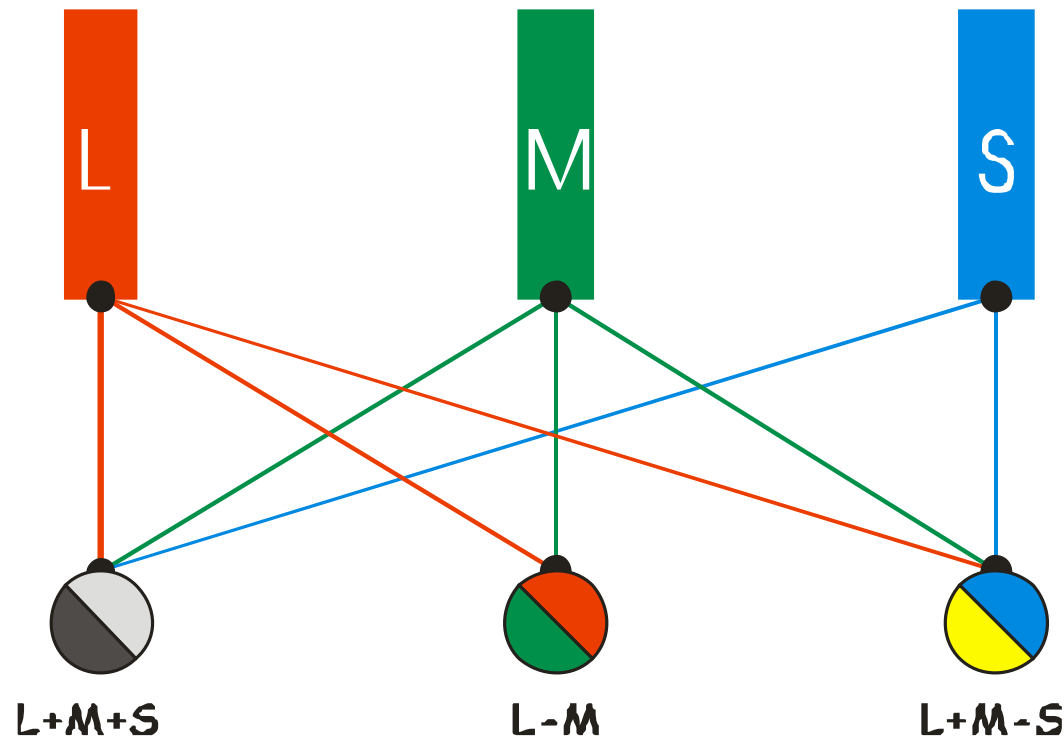
★ Hering (1878)

- ★ Teoría de colores oponentes: rojo vs. verde; azul vs. amarillo

Percepción del color: teoría moderna

★ Dos etapas

1. Tres tipos de receptores sensibles al distintas longitudes de onda
2. Codificación de los resultados en “oponentes”



Respuesta de los conos a un espectro $f(\lambda)$ (1/3)

★ Integral y aproximación discreta: ecuaciones

★ Para cada punto (x, y) de la retina, sean $f(\lambda)$ la FDP de la luz y $s_k(\lambda)$ la respuesta del k -ésimo tipo de cono: $k \in \{1, 2, 3\}$ (para $\{s, m, l\}$)

★ La respuesta en ese punto (x, y) es

$$c_k = \int_{\lambda} s_k(\lambda) f(\lambda) d\lambda, \quad \lambda \in [\lambda_{\text{mín}}, \lambda_{\text{Máx}}]$$

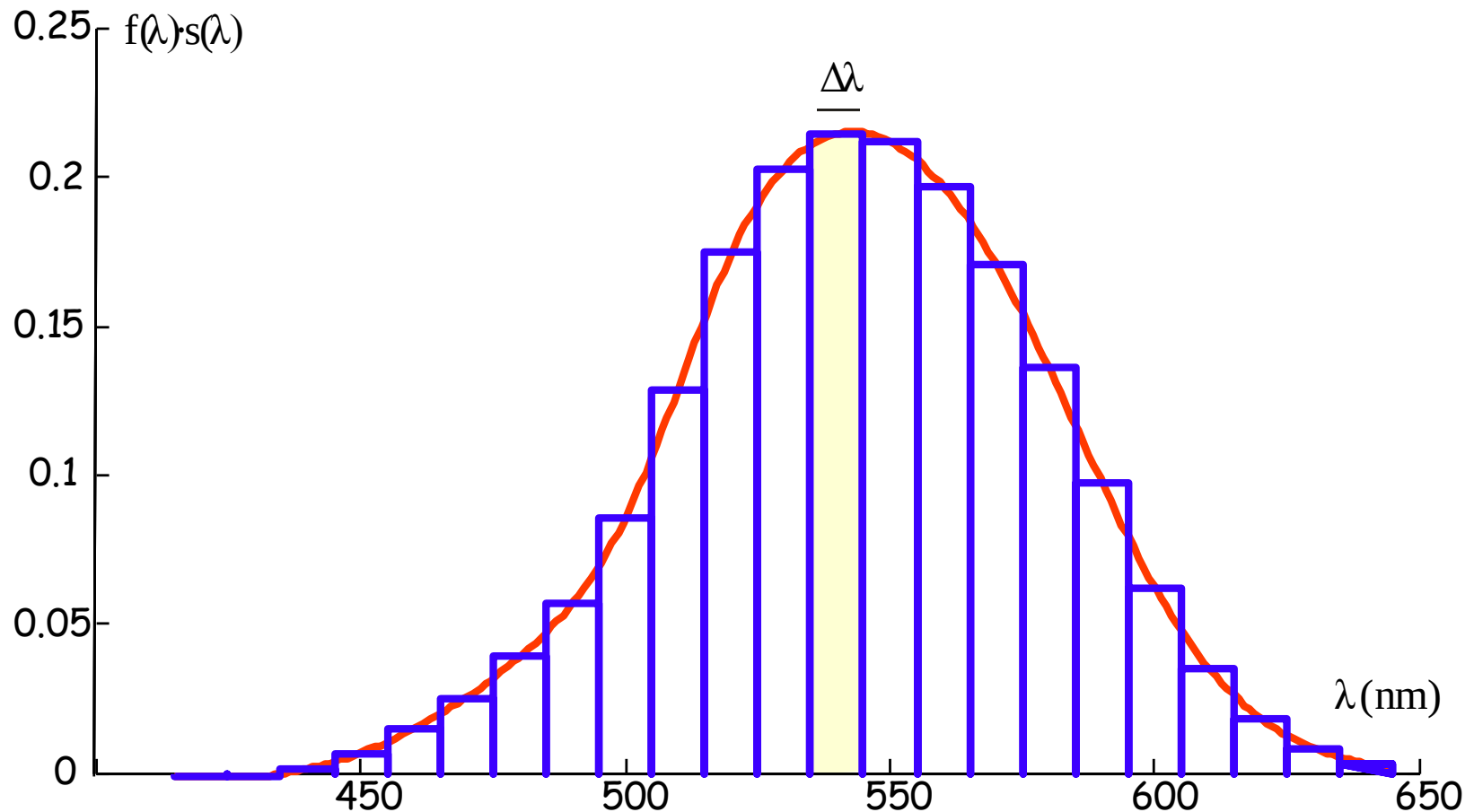
★ Puede aproximarse con $d\lambda \cong \Delta\lambda = (\lambda_M - \lambda_m)/N$, y entonces

$$c_k \cong \sum_i s_k(\lambda_i) f(\lambda_i) \Delta\lambda, \quad i \in \{1, \dots, N\}, \quad \lambda_i = \lambda_m + (i-1) \Delta\lambda$$

★ Típicamente, $\lambda_m = 400 \text{ nm}$, $\lambda_M = 700 \text{ nm}$ y $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ ($\Rightarrow N = 31$)

Respuesta de los conos a un espectro $f(\lambda)$ (2/3)

★ Integral y aproximación discreta: una imagen vale más...



Respuesta de los conos a un espectro $f(\lambda)$ (3/3)

★ Notación matricial (de $c_k \cong \sum_i s_k(\lambda_i) f(\lambda_i) \Delta\lambda = \Delta\lambda \sum_i s_{ki} f_i$)

$$c_k = \Delta\lambda \cdot [s_{k1}, s_{k2} \dots s_{kN}] \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} = \mathbf{s}_k^T \cdot \mathbf{f}$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1N} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2N} \\ s_{31} & s_{32} & \dots & s_{3N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} = \mathbf{S}^T \cdot \mathbf{f}$$

Metámeros

- ★ Dos espectros $f(\lambda)$ y $g(\lambda)$ distintos son metámeros (percibidos como el mismo color) si

$$\int_{\lambda} f(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} g(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda, \quad \lambda \in \{\lambda_m, \lambda_M\}, k \in \{1, 2, 3\}$$

- ★ Tras aproximación discreta y en forma matricial: $\mathbf{S}^T \mathbf{f} = \mathbf{S}^T \mathbf{g}$

★ Ejemplo

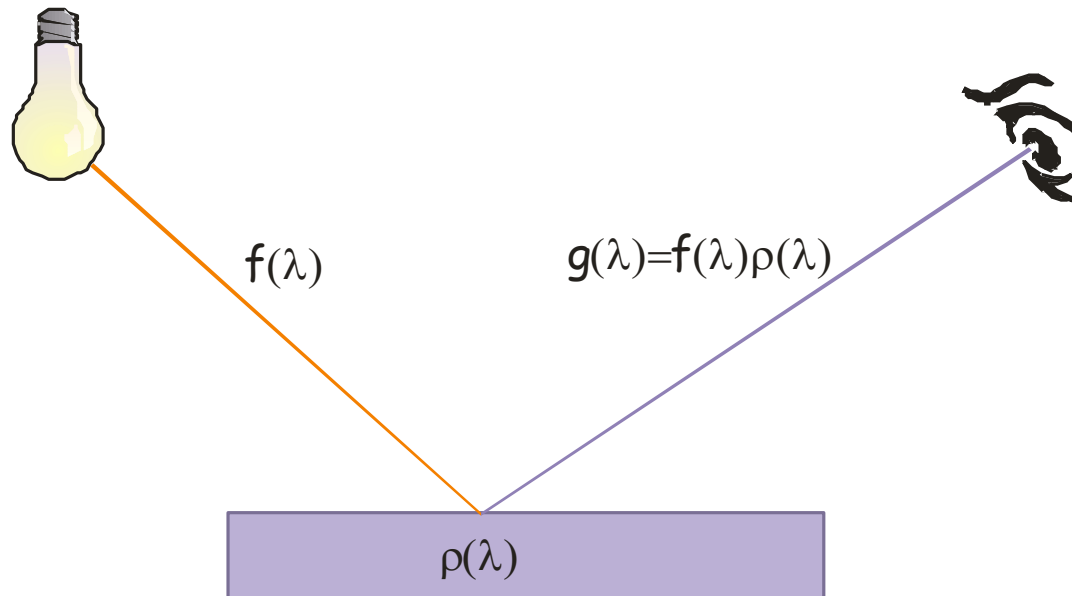
- ★ suponiendo medidas $\mathbf{s}_{1,2,3}$ para $\lambda_m=400\text{nm}$, $\lambda_M=700\text{nm}$ y $\Delta\lambda=75\text{nm}$:
 $\mathbf{s}_1^T = [1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 0]$, $\mathbf{s}_2^T = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2]$, $\mathbf{s}_3^T = [0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1]$
- ★ comparamos $\mathbf{f}^T = [0 \ 1 \ 6 \ 1 \ 1]$ (verde) y $\mathbf{g}^T = [6 \ 3 \ 0 \ 3 \ 3]$ (morado)...
- ★ ... y resultan ser metámeros porque $\mathbf{S}^T \mathbf{f} = \mathbf{S}^T \mathbf{g} = [15 \ 18 \ 9]^T$

Colores primarios y vectores de color

- ★ Sólo tres filas de $\mathbf{S}$ pueden ser linealmente independientes (si lo son menos, hay algún tipo de ceguera al color)
- ★ Cualesquiera tres espectros $\mathbf{p}_{1,2,3}$ **visualmente indep.** ($\mathbf{S}^T \mathbf{p}_i$ linealmente indep.) forman una base del “espacio vectorial 3D” del color y pueden ser sus colores primarios
- ★ Comparación con espacios vectoriales “de verdad”
 - ☺ La expresión vectorial de espectros (en realidad, metámeros) como suma ponderada de primarios es posible
 - ☺ Los cambios de base son posibles (mediante curvas de mezcla)
 - ☹ Hay espectros/colores irrealizables por tener coordenadas negativas respecto a los primarios (sólo tienen sentido sumas convexas)

Efecto de la iluminación

- ★ La iluminación afecta al color percibido

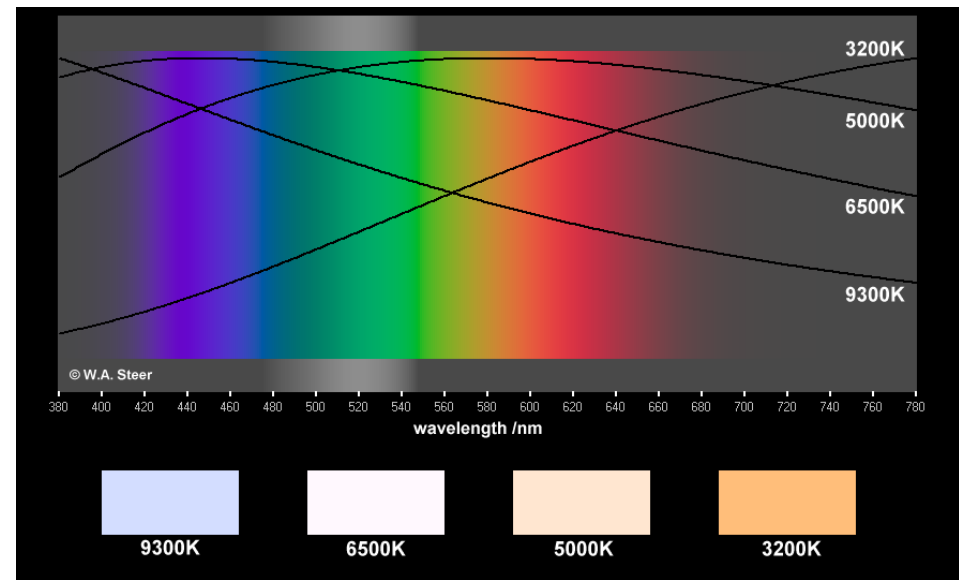
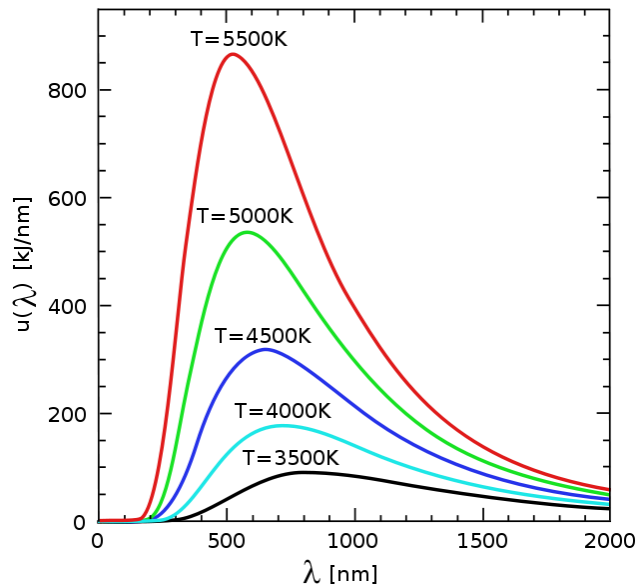


- ★ Ejemplo clásico: dos botones o camisas aparentemente del mismo color en una tienda dejan de parecerlo a la luz del sol

- ★ Hay distintos tipos de reflejo: difuso/mate vs. especular

Radiador de cuerpo negro y CCT

- ★ Radiador de cuerpo negro: cavidad cerrada con paredes a temperatura T y pequeña apertura en una, a través de la cual radia una energía cuyo espectro puede calcularse



- ★ CCT (*Correlated Colour Temperature*): T del radiador de cuerpo negro cuyo color es el más aproximado a la fuente de radiación bajo estudio

Iluminantes CIE: descripción

- ★ La CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) ha normalizado varios espectros iluminantes
 - ★ El iluminante A es un radiador de cuerpo negro con $T = 2856 \text{ K}$ y se usa para cálculos colorimétricos con iluminación incandescente
 - ★ El iluminante C se obtiene modificando el A con unos filtros líquidos normalizados y simula un día soleado medio con $\text{CCT} = 6774 \text{ K}$
 - ★ Los iluminantes Dxx han sido obtenidos estadísticamente
 - D65 (estándar UE) simula una luz diurna con $\text{CCT} = 6504 \text{ K}$
 - D50 (estándar USA) simula una luz diurna con $\text{CCT} = 5003 \text{ K}$
 - ★ El iluminante E (equienergético) representa una fuente que emitiría una potencia igual a cualquier λ y sólo tiene importancia teórica
 - ★ Los iluminantes Fxx recogen distribuciones espectrales de fuentes fluorescentes
 - F2 representa un fluorescente blanco con $\text{CCT} = 4230 \text{ K}$
 - F11 representa un fluorescente tribanda con $\text{CCT} = 4000 \text{ K}$

Iluminantes CIE: tabla

Name	CIE 1931		CIE 1964		CCT °K	Hue	Note
	x	y	x	y			
E	1/3	1/3	1/3	1/3	5400		Equal energy
D50	0.34567	0.35850	0.34773	0.35952	5000		
D55	0.33242	0.34743	0.33411	0.34877	5500		
D65	0.31271	0.32902	0.31382	0.33100	6500		Television, sRGB color space
D75	0.29902	0.31485	0.29968	0.31740	7500		
A	0.44757	0.40745	0.45117	0.40594	2856		Incandescent tungsten
B	0.34842	0.35161	0.3498	0.3527	4874		Discontinued
C	0.31006	0.31616	0.31039	0.31905	6774		Discontinued
9300	0.28480	0.29320			9300		Blue phosphor monitors
F2	0.37207	0.37512	0.37928	0.36723	4200		Cool White Fluorescent
F7	0.31285	0.32918	0.31565	0.32951	6500		Narrow Band Daylight Fluorescent
F11	0.38054	0.37691	0.38543	0.37110	4000		Narrow Band White Fluorescent

Sistema CIE RGB (1931)

★ La CIE definió en 1931 su sistema RGB, con curvas de mezcla y coordenadas cromáticas para el observador estándar (y en condiciones de iluminación estándar)

★ Requisitos

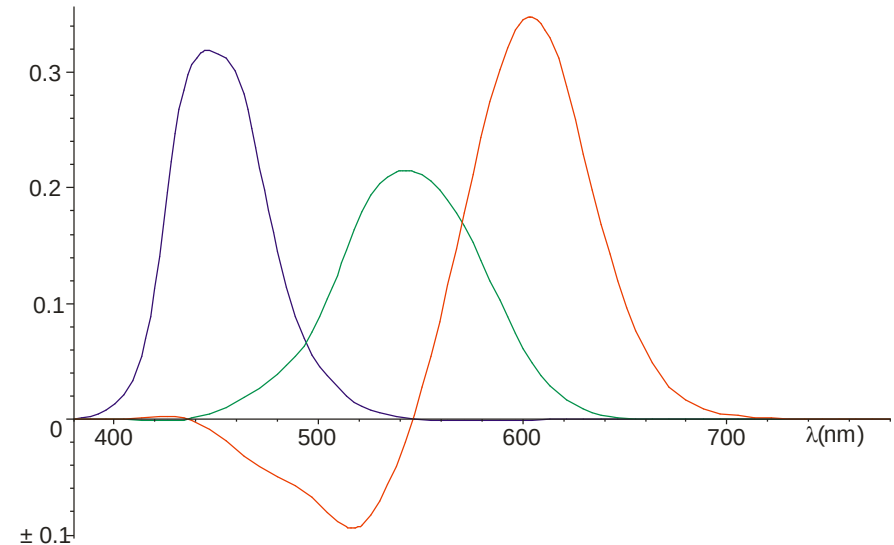
- Primarios monocromáticos R (700 nm), G (546,1 nm) y B (435,8 nm) de eficiencias luminosas en proporción 1 : 4,59 : 0,06
- Blanco equienergético (radiación con la misma potencia para cada λ) obtenible con cantidades iguales de cada primario

★ Para cada estímulo monocromático de potencia unidad, $C(\lambda)$, es posible hallar un vector $[\bar{r}(\lambda) \ \bar{g}(\lambda) \ \bar{b}(\lambda)]^T$ de igual brillo y color, obteniéndose así las **curvas de mezcla** del sistema

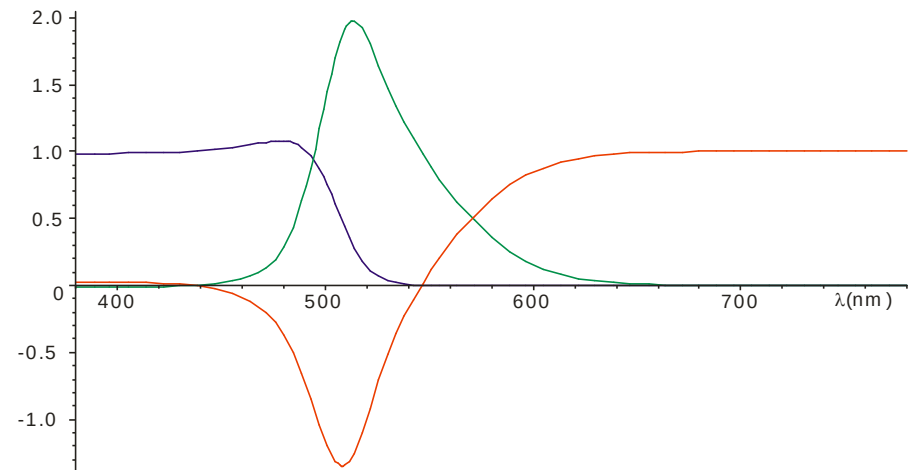
★ Siendo $s(\lambda) = \bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)$, las **coordenadas cromáticas** (proporciones de cada primario respecto a la potencia radiada total) son $r(\lambda) = \bar{r}(\lambda) / s(\lambda)$, $g(\lambda) = \bar{g}(\lambda) / s(\lambda)$ y $b(\lambda) = \bar{b}(\lambda) / s(\lambda)$.

Sistema CIE RGB (1931)

★ Curvas de mezcla:
 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$

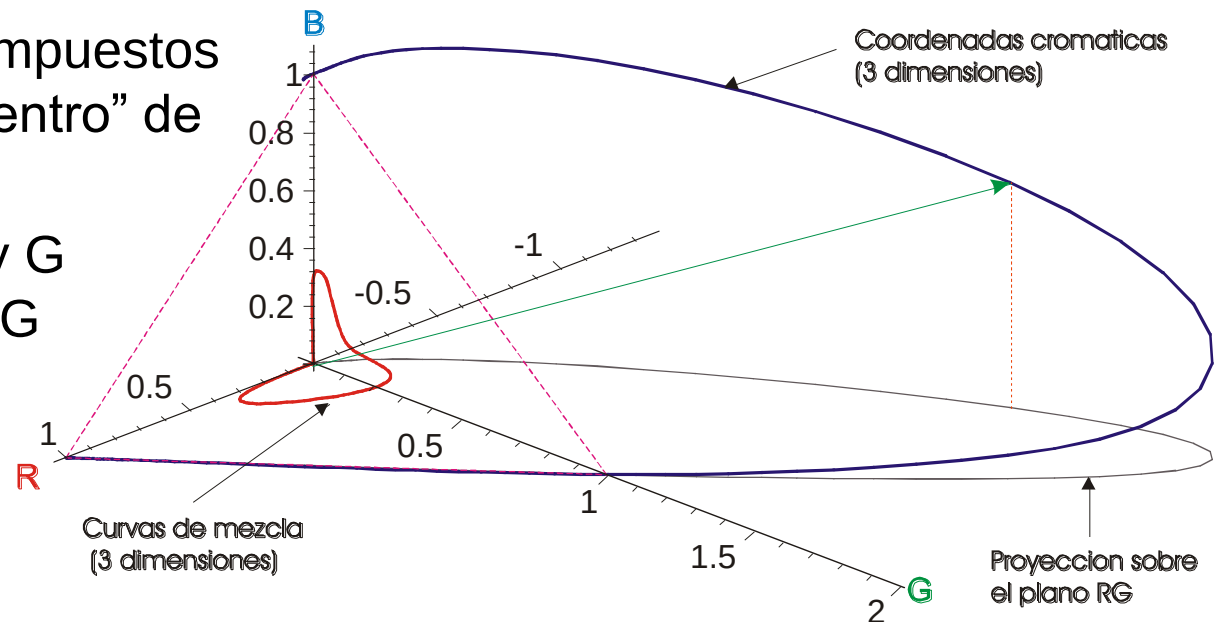


★ Coordenadas cromáticas:
 $r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda) = 1$



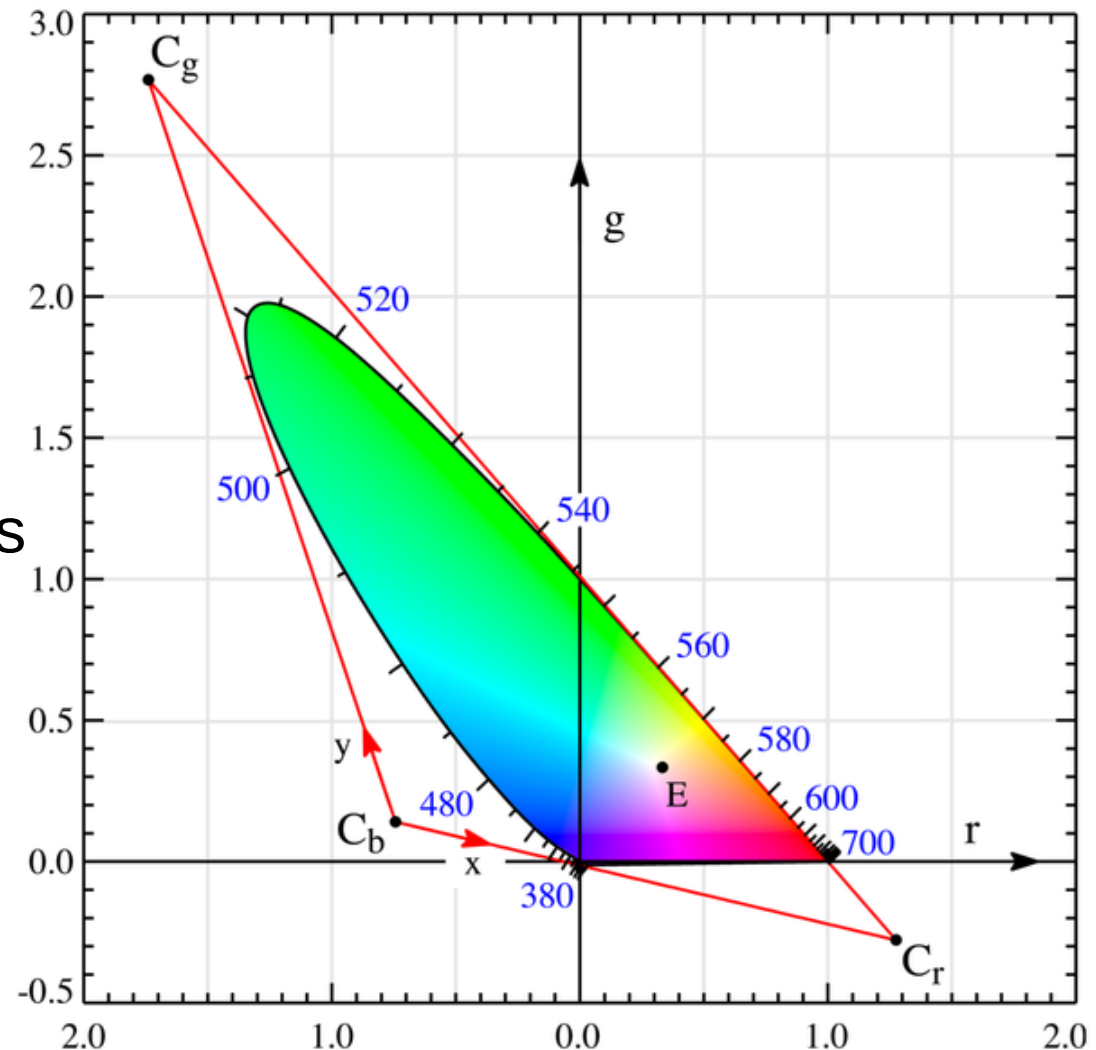
Carta CIE RG[B] (1931): construcción

- ★ El vector $[\bar{r}(\lambda) \ \bar{g}(\lambda) \ \bar{b}(\lambda)]^T$ de las curvas de mezcla describe una curva alabeada en un espacio 3D de ejes $\{R, G, B\}$
- ★ Como $r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda) = 1$
 - ★ El vector $[r(\lambda) \ g(\lambda) \ b(\lambda)]^T$ de las coordenadas cromáticas describe la curva plana intersección del plano $R + G + B = 1$ con el “cono” de vértice el origen y “base” la curva alabeada
 - ★ Los espectros compuestos posibles están “dentro” de la curva plana
 - ★ Basta con dar R y G pues $B = 1 - R - G$



Carta CIE RG (1931): comentarios

- ★ Espectros puros sobre borde curvo: 380-500-540-700 nm
- ★ Ojo: el borde recto (línea púrpura) tiene “colores imposibles”
- ★ Espectros compuestos en el interior
- ☹ Problema: una gran mayoría de colores es irrealizable con esos primarios...



Sistema CIE XYZ (1931)

★ La CIE también definió en 1931 su sistema XYZ para evitar el problema del sistema RGB

★ Requisitos

- Curvas de mezcla siempre positivas: $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda) > 0$
- $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$, curva de visibilidad o eficiencia luminosa
- Blanco equienergético obtenible con $X=Y=Z$ (como para RGB)

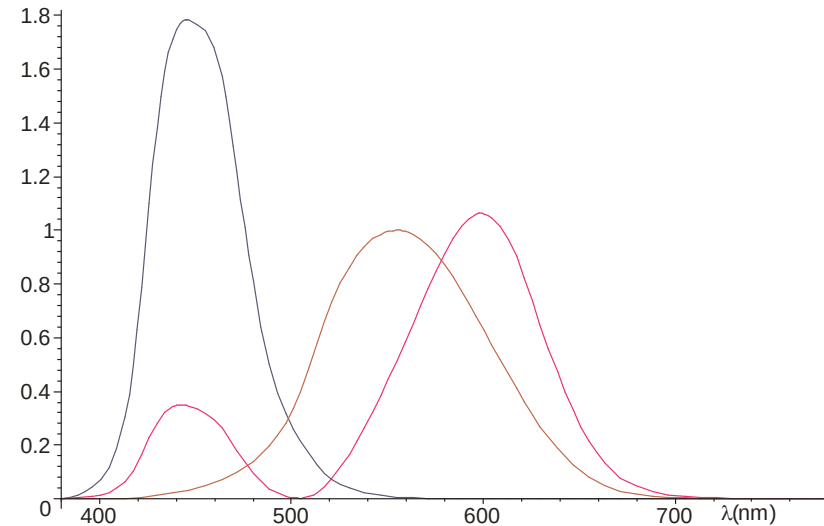
★ Obtención por cambio de base

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.76888 & 1.75175 & 1.13016 \\ 1.00000 & 4.59070 & 0.06010 \\ 0 & 0.05651 & 5.59427 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}$$

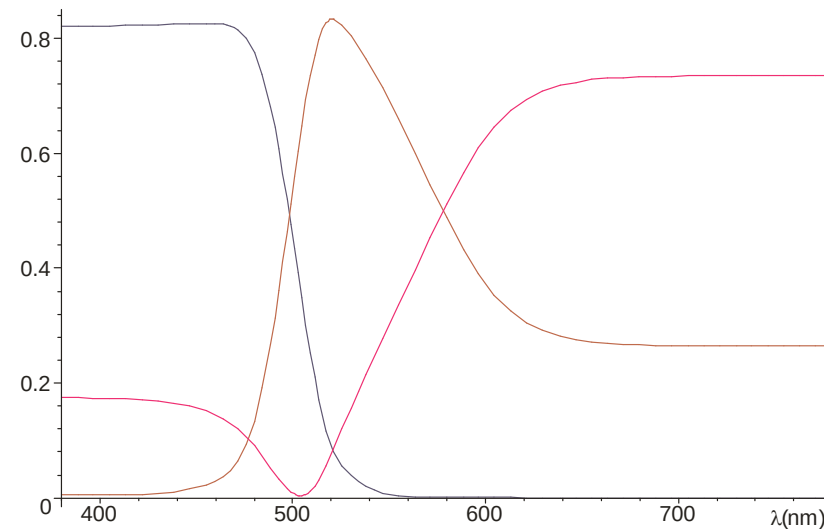
★ Problema (menor...☺): primarios irrealizables físicamente

Sistema CIE XYZ (1931)

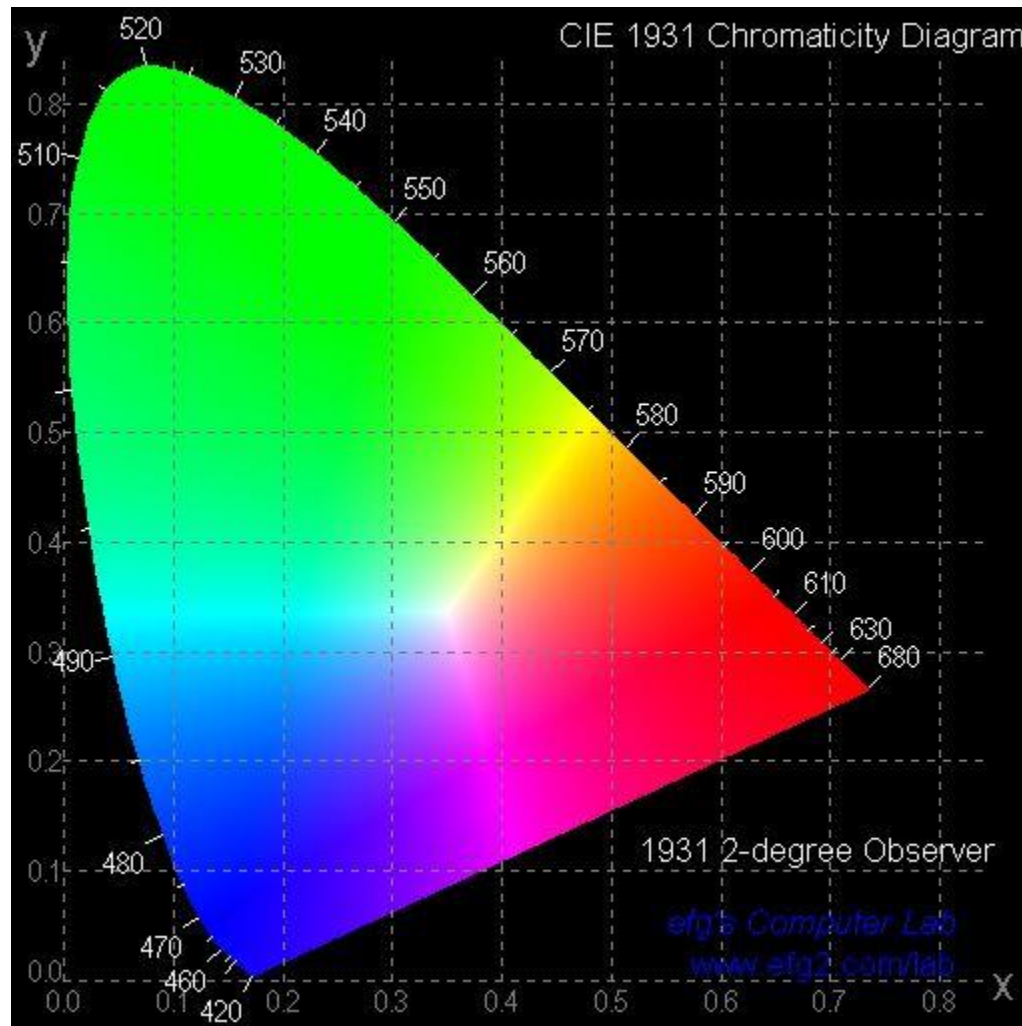
★ Curvas de mezcla:
 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$



★ Coordenadas cromáticas:
 $x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda) = 1$



Carta CIE XY (1931)



Sistema CIE $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ (1964)

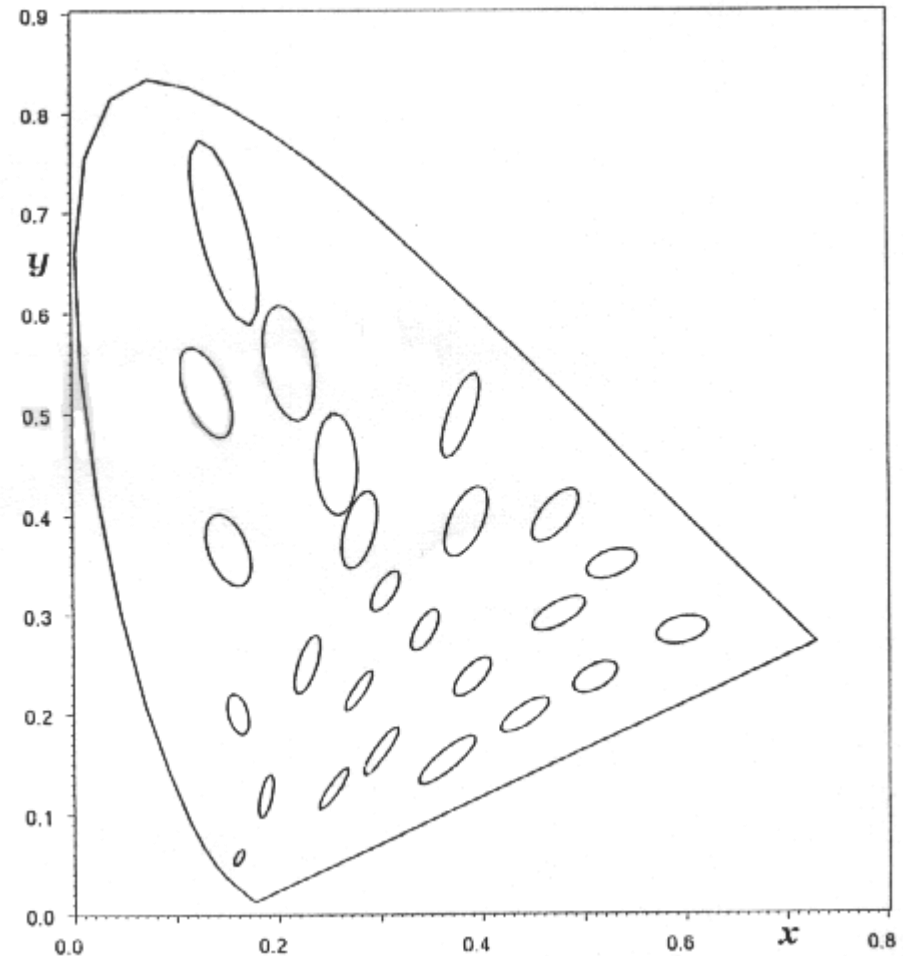
- ★ Los sistemas CIE RGB y XYZ de 1931 son válidos para el observador colorimétrico estándar con campo visual $\leq 4^\circ$
- ★ La CIE definió luego el observador colorimétrico estándar suplementario de 1964 y las correspondientes curvas de mezcla para un campo visual de 10°
- ★ Demo: programa Chromaticity de Earl F. Glynn II

Espacios de color uniforme

- ★ Problema de espacio/sistema XYZ (o RGB): no permite comparar colores porque no es ni aproximadamente un espacio métrico
 - ★ El efecto en el color percibido de un pequeño desplazamiento en XYZ depende de posición de partida y dirección del cambio
 - ★ El mínimo desplazamiento necesario para percibir un cambio fue estudiado y descrito por MacAdam
- ★ Se han propuesto diferentes sistemas y transformaciones (del CIE XYZ) para conseguir un espacio de color uniforme, pero todas las “soluciones” tienen limitaciones...

Elipses de MacAdam (1942)

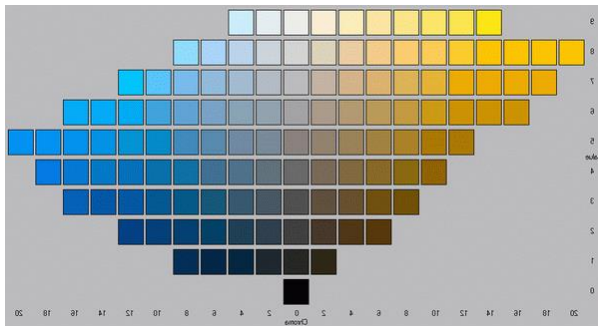
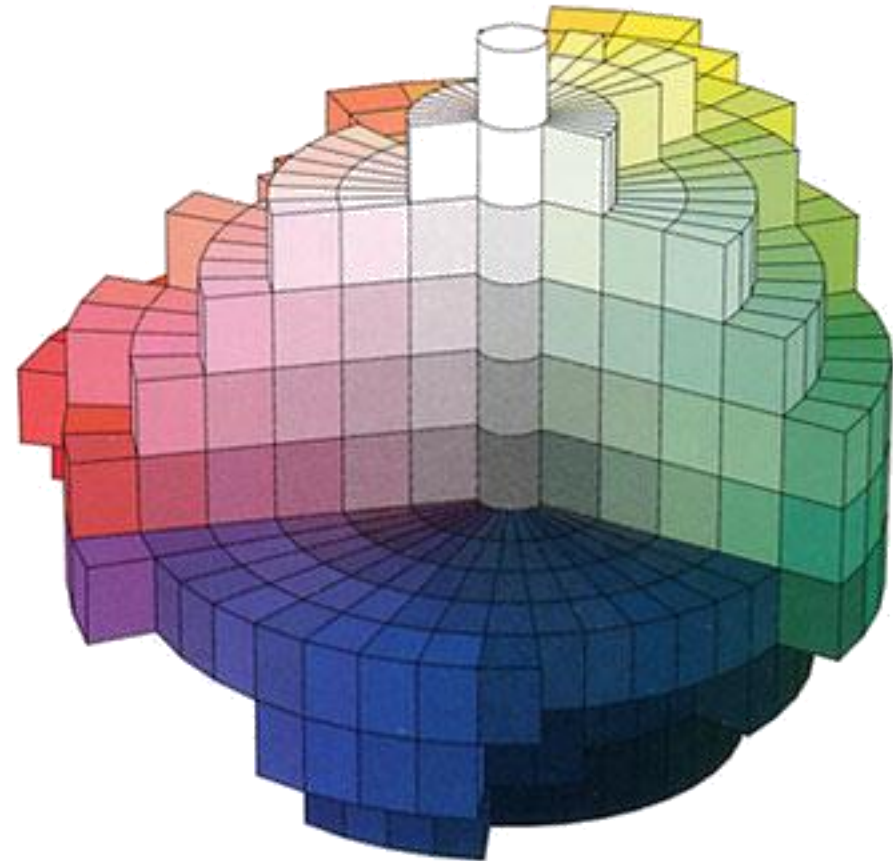
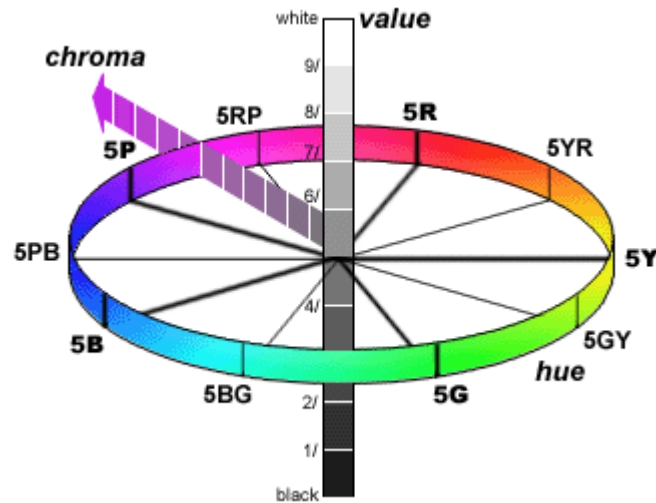
- ★ Elipses aumentadas 10x
- ★ Se detectan cambios muy pequeños en azules
- ★ Cambios mucho mayores en verdes saturados son difíciles de percibir



Sistema de Munsell (1900's)

- ★ En los primeros 1900's, Albert H. Munsell elaboró un atlas de colores prácticamente uniforme en que cada color está separado de sus vecinos por la misma distancia **perceptual**
- ★ En el sistema de Munsell, los colores están dispuestos en un cilindro de radio variable
 - ★ La altura mide el valor (*value*) o brillo percibido, cuya relación con la luminancia Y es no lineal, entre 0 (negro) y 9 (blanco)
 - ★ La distancia al eje mide la saturación: el eje contiene los colores totalmente no saturados (negro... grises... blanco) y al alejarse de él la saturación (*chroma*) crece hasta 8, estando situados en la periferia las radiaciones monocromáticas y los púrpuras
 - ★ El color o tinte (*hue*), está representado por un ángulo: Munsell dividió el círculo en 10 arcos de 36° , y cada uno en 10 subsectores de $3,6^\circ$

Sistema de Munsell (1900's)



★ Demo: sistema de Munsell generado por Mark D. Fairchild

Sistema CIELAB (1976)

★ Diseñado para especificar diferencias de color

- ★ La distancia euclídea entre dos puntos del espacio de CIELAB, ΔE^*_{ab} , quiere ser una medida fiel de la diferencia entre esos colores
- ★ Recomendado en 1976 por la CIE para las industrias textil, y de plásticos y pinturas

★ Transformación de coordenadas XYZ a CIELAB

- ★ Hace falta también un blanco de referencia $X_n Y_n Z_n$
- ★ Siendo $x = X/X_n$, $y = Y/Y_n$, $z = Z/Z_n$, se hace
 $L^* = 116 f(y) - 16$, $a^* = 500 [f(x) - f(y)]$, $b^* = 200 [f(y) - f(z)]$ con
 $f(w) = (w > 0,008856) ? w^{1/3} : 7,787w + 16/116$
- ★ L^* mide razonablemente bien la luminosidad percibida
 a^* mide la saturación percibida en el eje rojo ($a^*>0$) – verde ($a^*<0$)
 b^* mide la saturación percibida en el eje amarillo ($b^*>0$) – azul ($b^*<0$)

Sistema CIELUV (1976)

- ★ Diseñado para especificar diferencias de color
 - ★ La distancia euclídea entre dos puntos del espacio de CIELUV, ΔE^*_{uv} , quiere ser una medida fiel de la diferencia entre esos colores
 - ★ Recomendado en 1976 por la CIE para las industrias del vídeo y la TV

- ★ Transformación de coordenadas XYZ a CIELUV
 - ★ L^* se calcula como en CIELAB
 - ★ La adaptación cromática se realiza con una traslación ($u^* = u' - u'_n$) en lugar de con un escalado ($x = X/X_n$)
 - ☹ Problema: esa traslación puede “predecir” colores irrealizables

- ★ La CIE ya no recomienda usar CIELUV, sino una versión más moderna de CIELAB: CIE94 (1995)

Modelos de apariencia de color: CIECAM

- ★ Intentan tener en cuenta los “fenómenos de apariencia de color”
 - ★ El tinte varía con la luminancia
 - ★ El tinte varía con la pureza del color
 - ★ El brillo depende de la luminancia y la cromaticidad
 - ★ La saturación y el contraste crecen con la luminancia
 - ★ El contraste depende del entorno
 - ★ ...

- ★ CIECAM (Color Appearance Model)
 - ★ Proyecto iniciado en 1996
 - ★ Primera versión en 1997 (CIECAM97s)
 - ★ Versión actual de 2004 (CIECAM02)

Fuentes y agradecimientos

★ Carlos Muñoz Pérez

- ★ Apuntes y transparencias capítulo 3 “Televisión digital” (asignatura 5º curso grado plan 94 ETSIT-UPM)
- ★ Libros (ver más abajo)

★ Jesús Bescós Cano

- ★ Transparencias capítulo 1 “Temas avanzados en proceso de señales” (asignatura máster IIT EPS-UAM)

★ Mark D. Fairchild

- ★ QuickTime VRs: www.rit-mcsl.org/fairchild/QTVRs.html

★ Earl F. Glynn II

- ★ Chromaticity: www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm

★ Wikipedia

- ★ Imágenes varias

Fuentes++: bibliografía

- ★ Mark D. Fairchild: “*Color Appearance Models*”, Addison-Wesley, 1998
- ★ Daniel Malacara: “*Color Vision and Colorimetry. Theory and Applications*”, SPIE Press, 2002
- ★ Günter Wyszecki & Walter S. Stiles, “*Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*” (2nd ed.), John Wiley & Sons, 1982