

Colorimetría diferencial

Introducción

- Disponemos de un sistema de codificación y representación del color (CIE - 1931 XYZ)
- Objetivo: comparar colores a nivel industrial, no es tan importante la descripción numérica como la valoración de la diferencia
 - Se pueden ordenar → Atlas (catálogos) de colores



Introducción

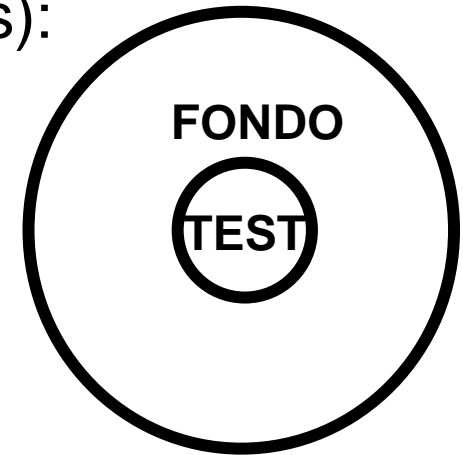
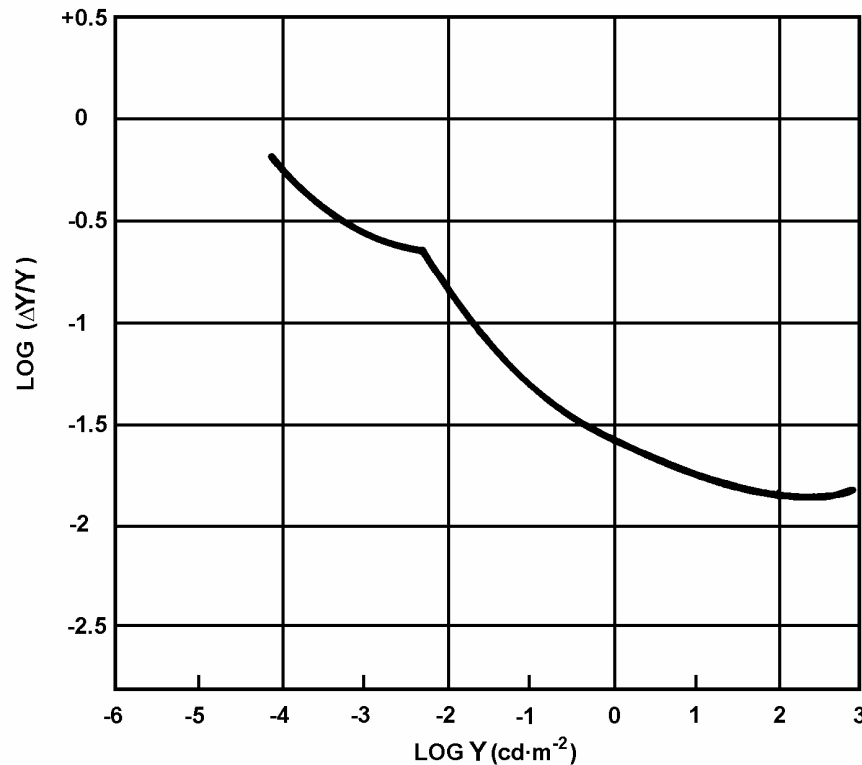
- Solución ideal: $\Delta V \propto \Delta E$ (diferencia/valoración perceptual \propto diferencia/valoración numérica de color)
- Condición: espacio uniforme perceptualmente para asignar distancias entre colores con distancias perceptuales
- Problema: XYZ no es uniforme

Sumario

- Capacidades de discriminación cromática humana
- Las elipses de MacAdam
- Valoración visual frente a diferencia de color
- Sistemas uniformes de color: CIELAB y CIELUV
 - Fórmulas de diferencias de color (ΔE)
 - Tolerancias industriales de color
- Sistemas más uniformes

Capacidades de discriminación cromática

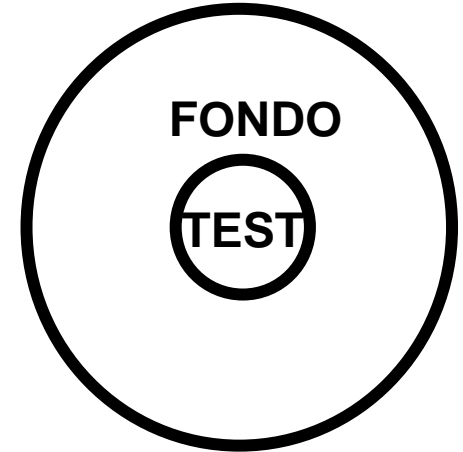
- Umbral diferencial de luminancia (H y C ctes):



Entre 1% y 2%, menos con Y menores

Capacidades de discriminación cromática

- Umbral diferencial de luminancia (H y C ctes):



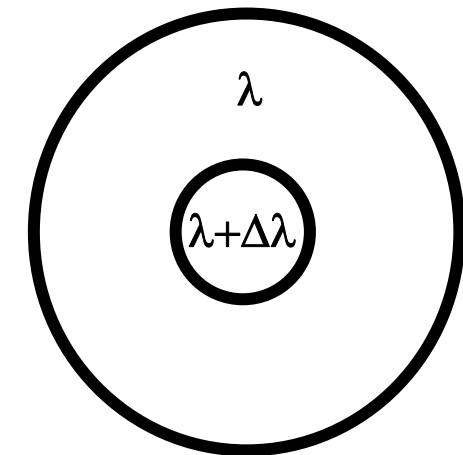
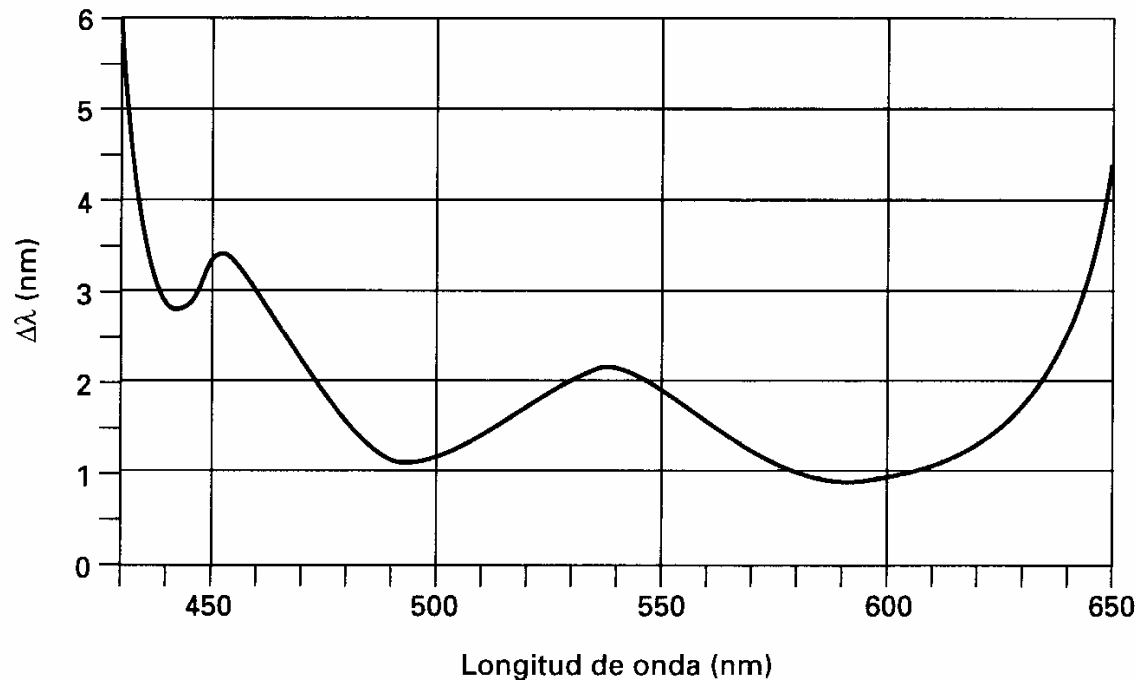
$$\text{Ley de Weber : } \left| \frac{L_{\text{TEST}} - L_{\text{FONDO}}}{L_{\text{FONDO}}} \right| = 0.01$$

$$\text{Ejemplo : } L_{\text{FONDO}} = 50 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

$$L_{\text{TEST}} = 50.5 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \quad , \quad L_{\text{TEST}} = 49.5 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Capacidades de discriminación cromática

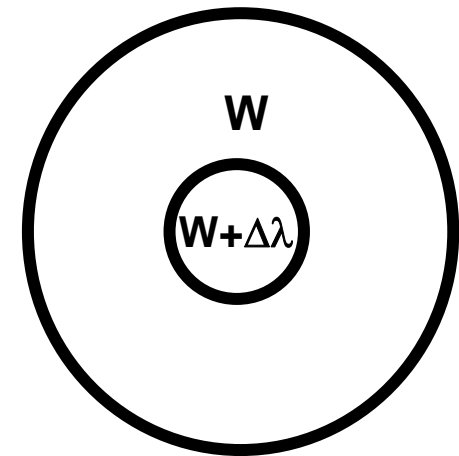
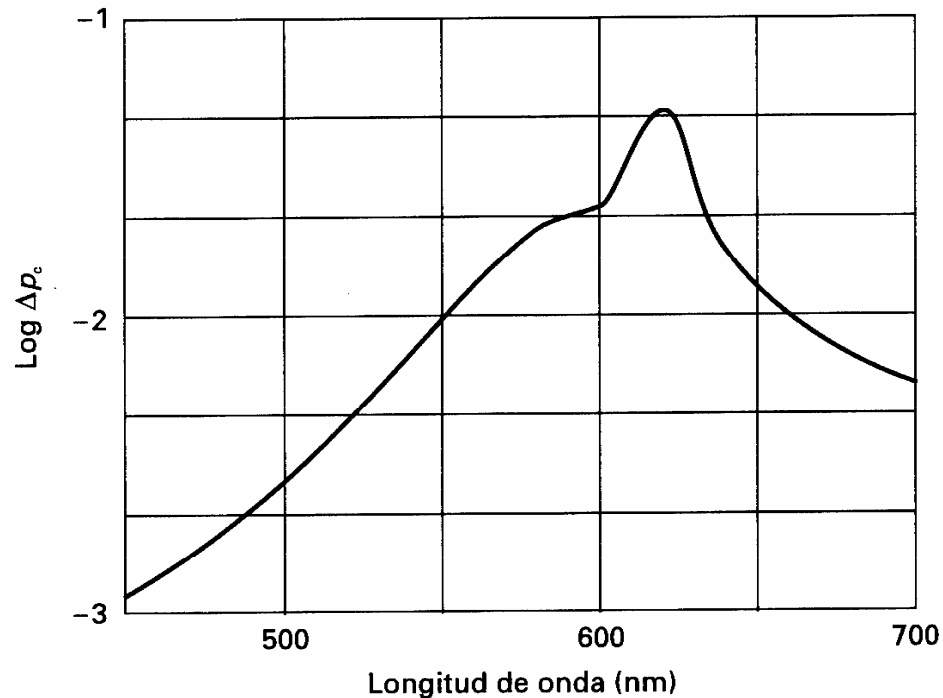
- Umbral diferencial de longitud de onda (L y C ctes):



Entre 1 y 3 nm

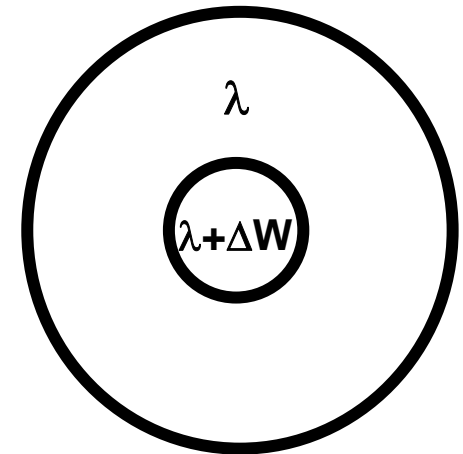
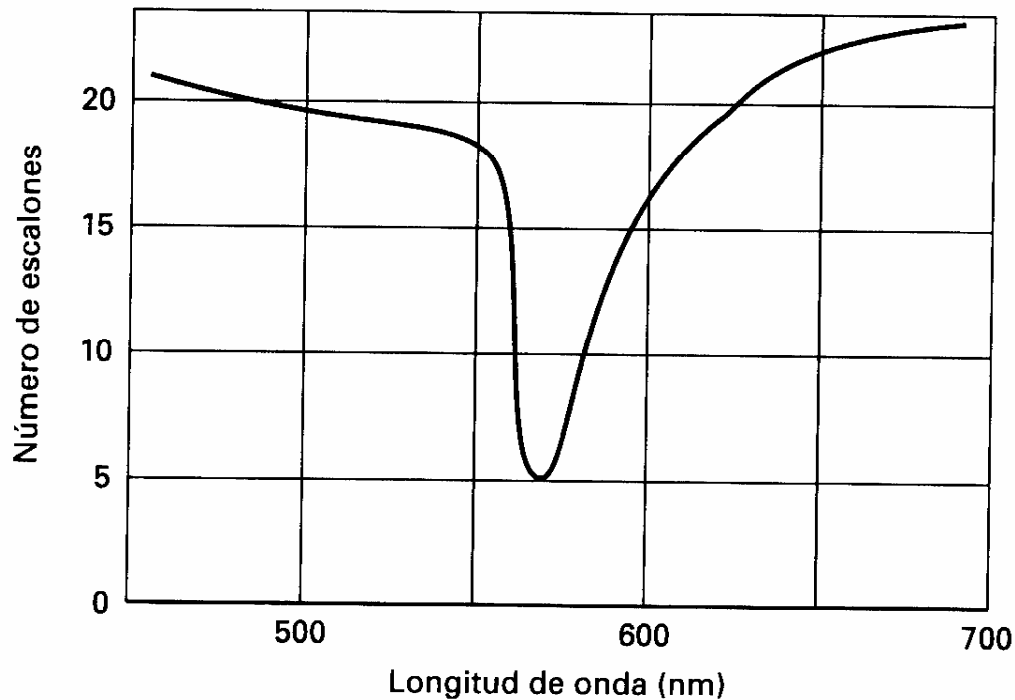
Capacidades de discriminación cromática

- Umbral diferencial de pureza (H y L ctes):



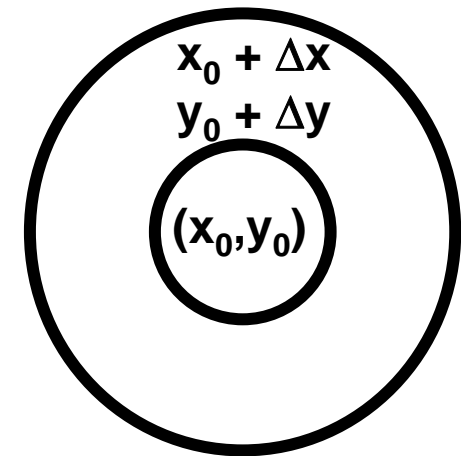
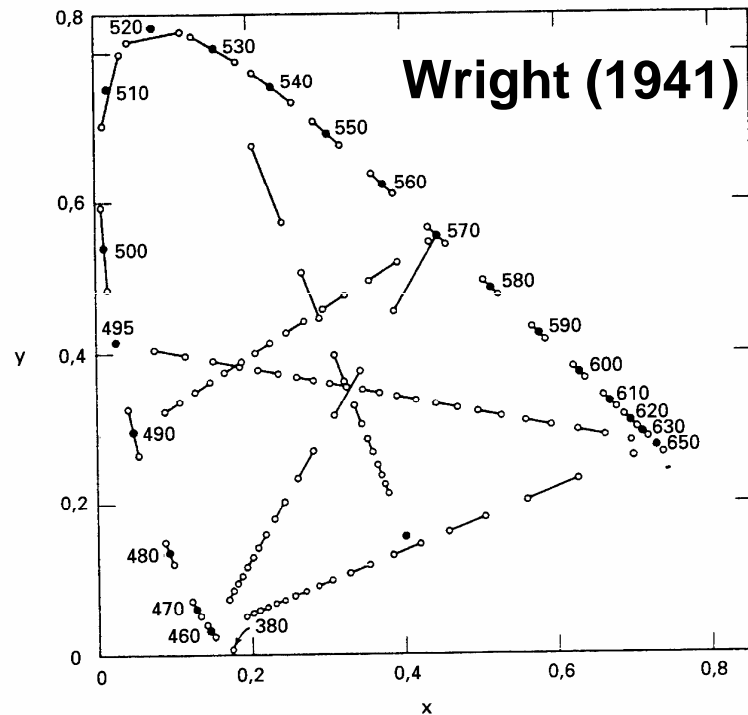
Capacidades de discriminación cromática

- Umbral diferencial de pureza (H y L ctes): $\Delta p_C = -0.035$



Capacidades de discriminación cromática

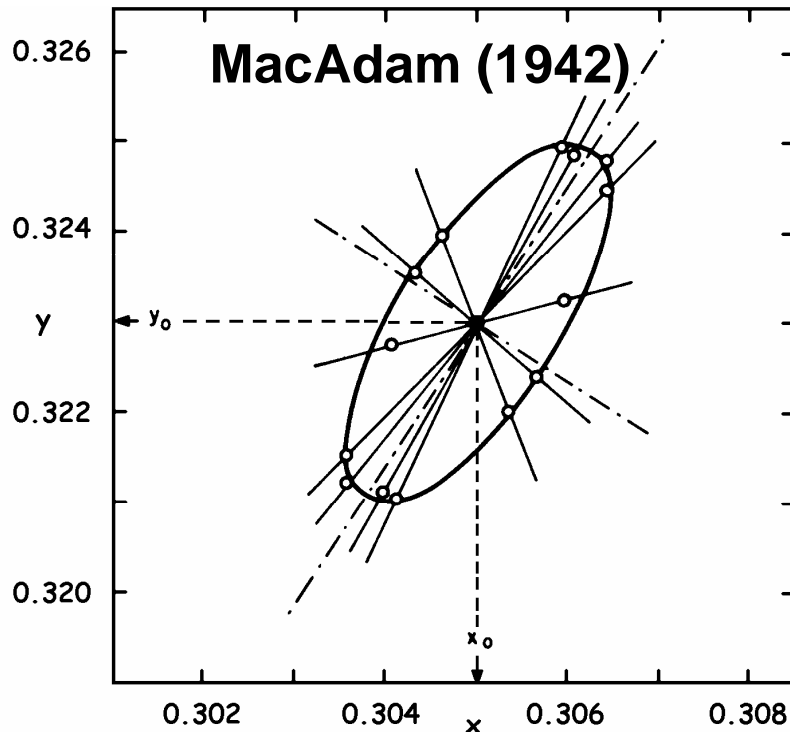
- **Elipses de MacAdam (Y cte, H y C variables):**



CIE - XYZ no es uniforme

Capacidades de discriminación cromática

- **Elipses de MacAdam** (Y cte, H y C variables):



50 igualaciones

**Región de colores no distinguibles
(2 s.d.)**

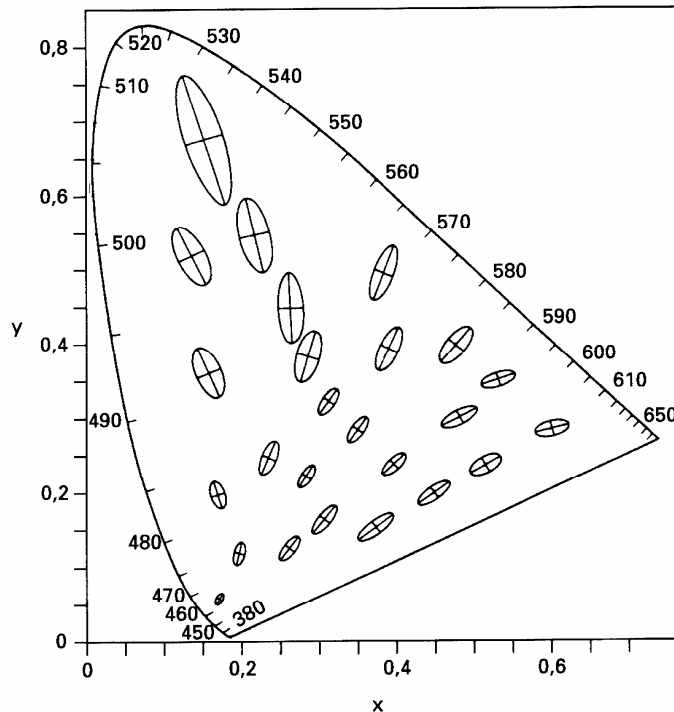
Ecuación elipse :

$$g_{11}\Delta^2x + 2g_{12}\Delta x\Delta y + g_{22}\Delta^2y = 1$$

$$\Delta x = x - x_0 \quad , \quad \Delta y = y - y_0$$

Capacidades de discriminación cromática

- **Elipses de MacAdam** (Y cte, H y C variables):



Ejes y orientación de las elipses :

$$g_{11} = \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \quad , \quad g_{22} = \frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2}$$

$$g_{12} = \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \cos \theta \cdot \sin \theta$$

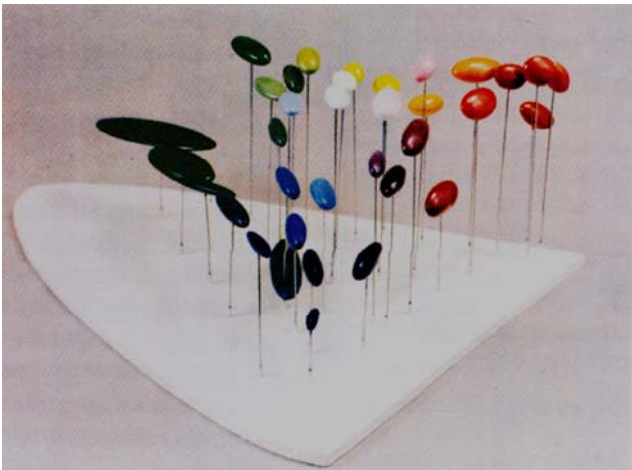
Elipses con tamaños y orientaciones diferentes

CIE - XYZ no es euclídeo y la métrica depende del punto

Capacidades de discriminación cromática

- **Elipsoides de Brown - MacAdam (Y, H y C variables):**

Brown-MacAdam (1949)



Ecuación de diferencia de color :

$$\Delta^2 E = g_{11} \Delta^2 x + 2g_{12} \Delta x \Delta y + g_{22} \Delta^2 y + \alpha \left(\frac{\Delta Y}{Y} \right)^2$$

si $\Delta E = 1 \Rightarrow$ desviación estándar

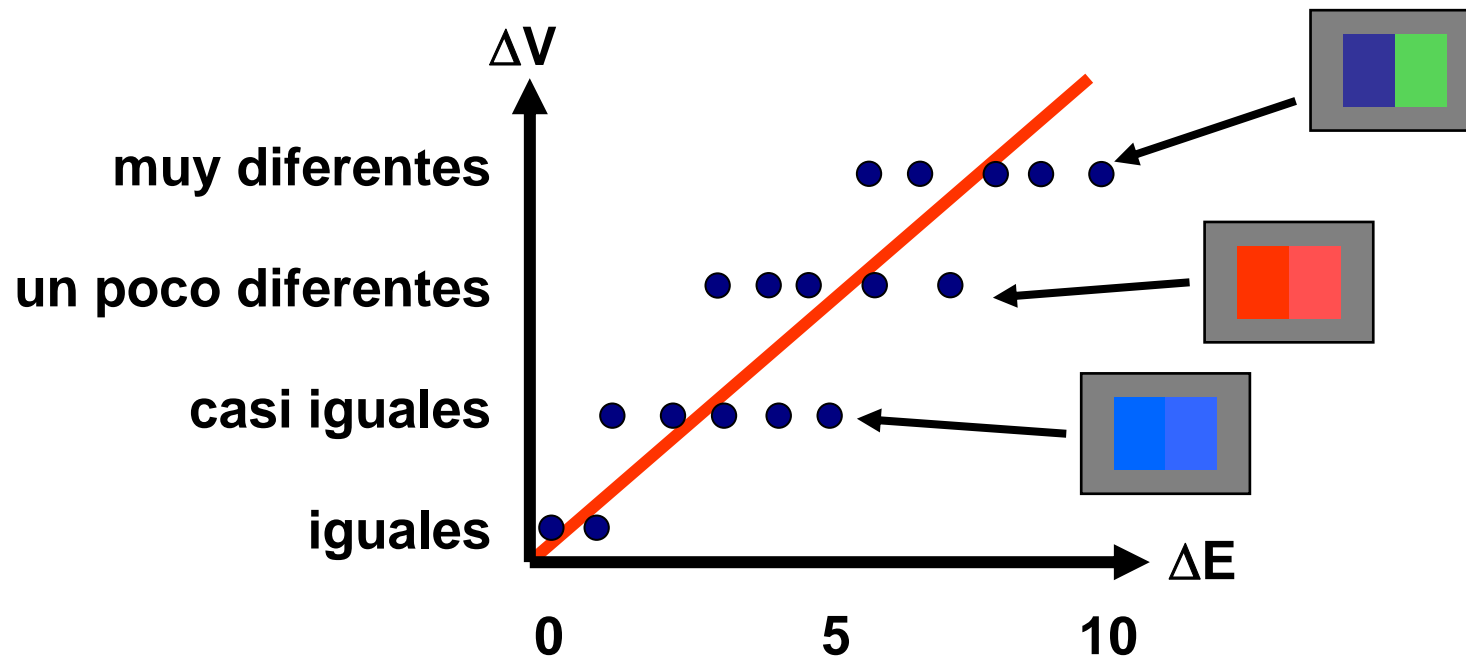
si $\Delta E = 2 \Rightarrow$ mínima diferencia perceptible

Ejemplo: $(x_0, y_0, Y_0) = (0.280, 0.385, 40)$

$(x, y, Y) = (0.3, 0.4, 40) \rightarrow \text{¿ } \Delta E \text{ ?}$

Valoración visual frente a diferencia de color

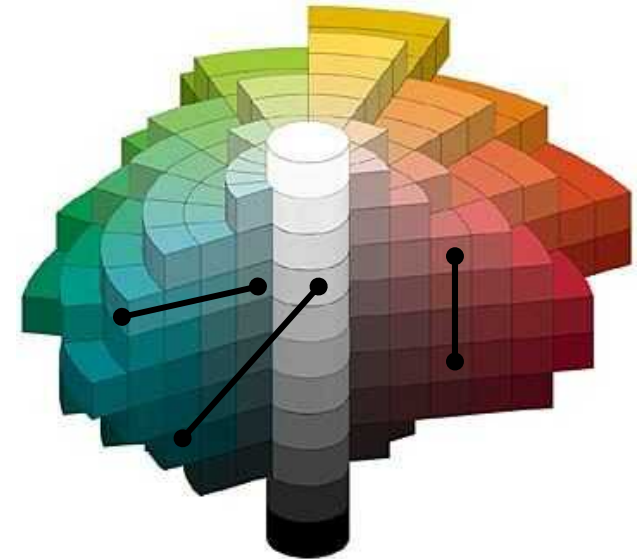
- Se puede valorar la diferencia visual (perceptual) (ΔV) usando el valor numérico de la diferencia de color (ΔE) entre variables de color
 - Condiciones de validez: iluminante fijado y fondo neutro



Sistemas uniformes de color

- Aspectos anteriores a tener en cuenta:
 - El sistema CIE - XYZ no es uniforme:

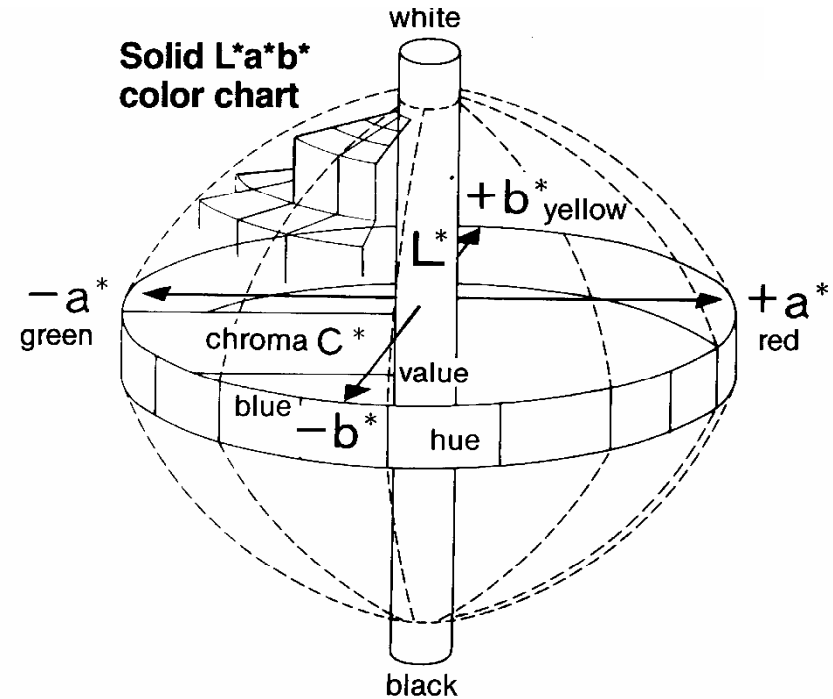
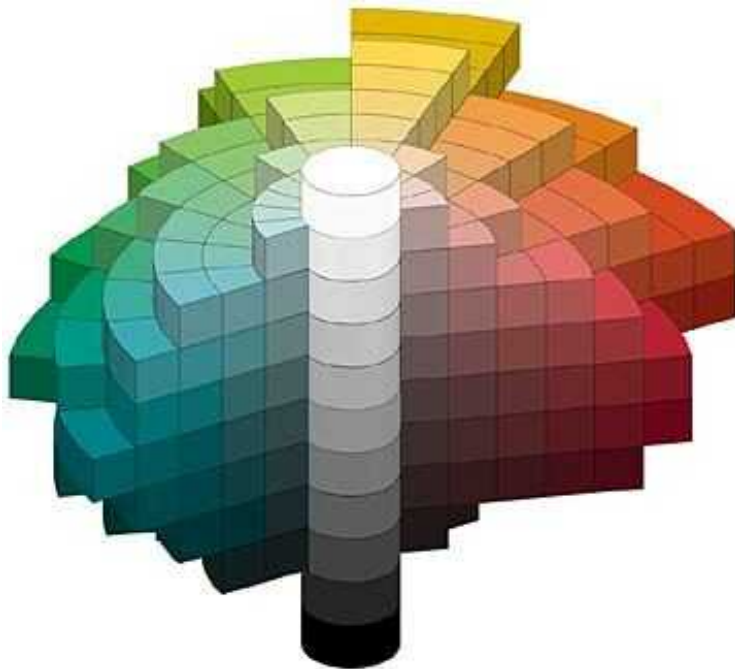
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2}$$



- Objetivo deseado:
 - variables perceptuales: claridad (L), tono (H), croma (C)
 - $\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta C)^2 + (\Delta H)^2}$ es la mejor opción
 - ¿CIE - XYZ → CIE - LCH? ¿qué modelo de apariencia del color?

Sistemas uniformes de color

- CIE - $L^*a^*b^*$ y CIE - $L^*u^*v^*$: sólido de color

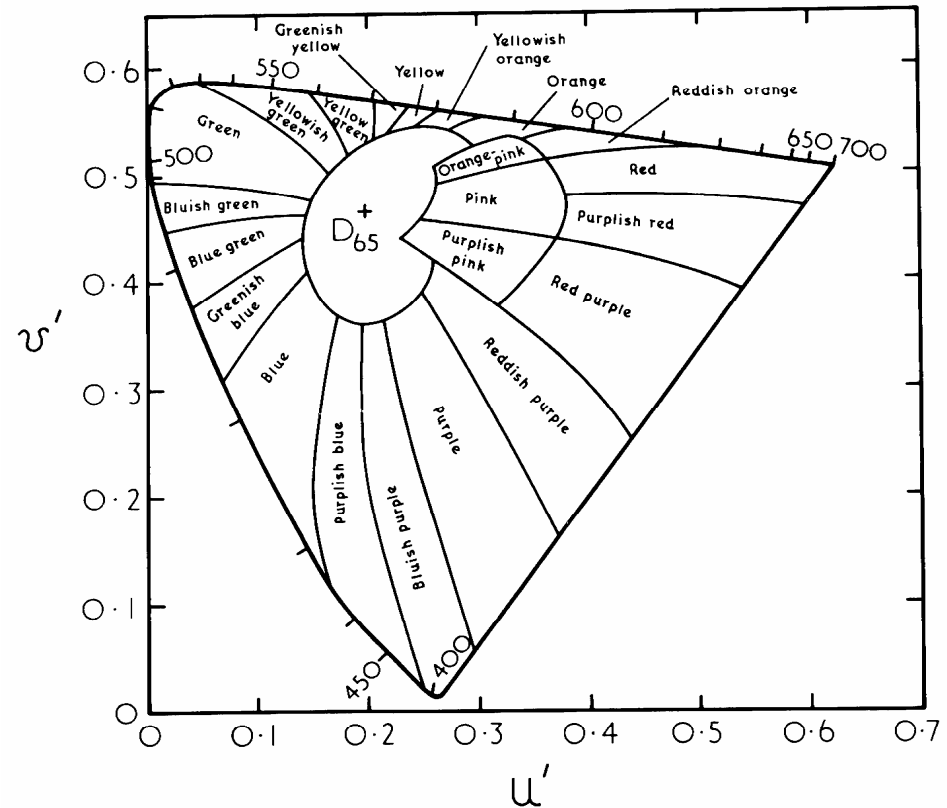


Sistemas uniformes de color

- Espacio de color CIE - 1976 (u' , v' , Y):

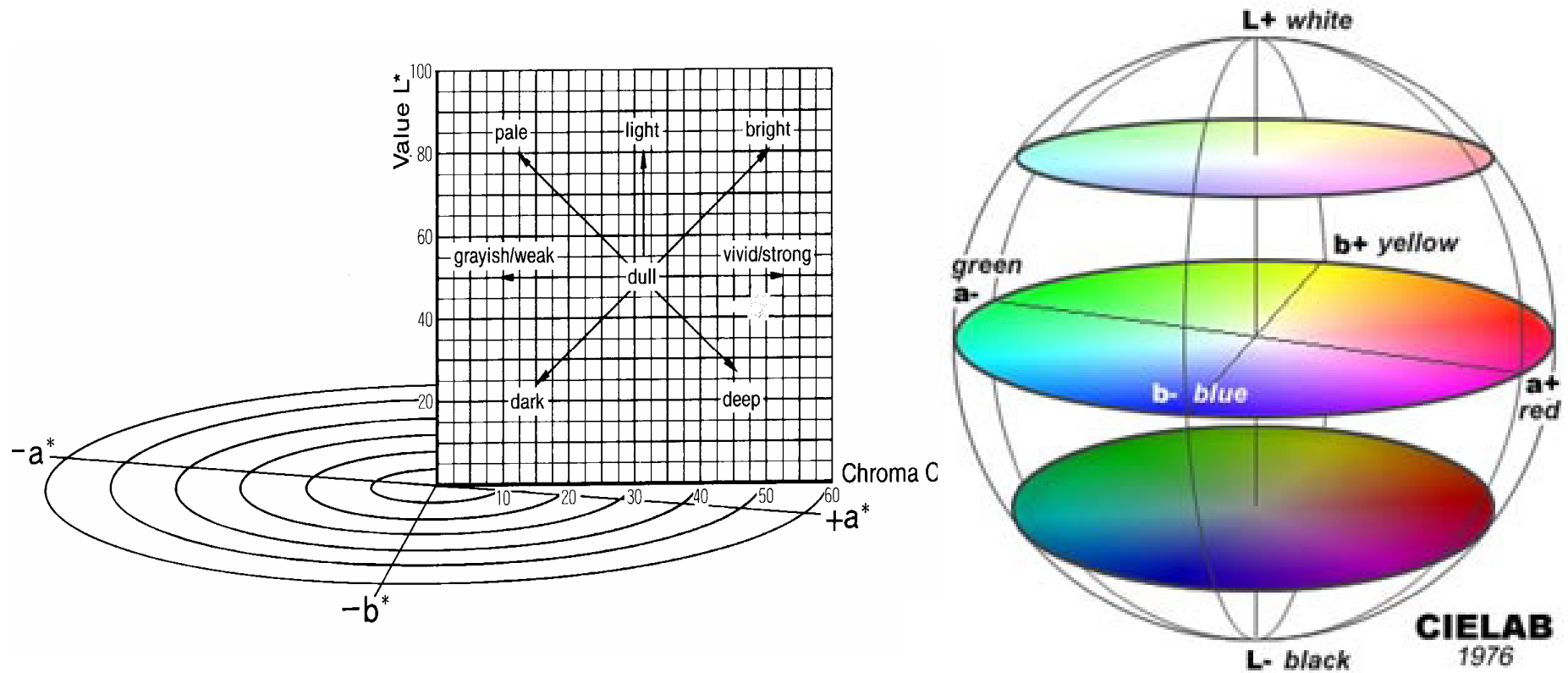
$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$



Sistemas uniformes de color

- CIE - $L^*a^*b^*$ y CIE - $L^*u^*v^*$: perfiles 2 - D



Sistemas uniformes de color

- CIE - XYZ \rightarrow CIE - L*a*b* y CIE - L*u*v* :

CIE-L*a*b*

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

CIE-L*u*v*

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$u^* = 13L^* (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_n)$$

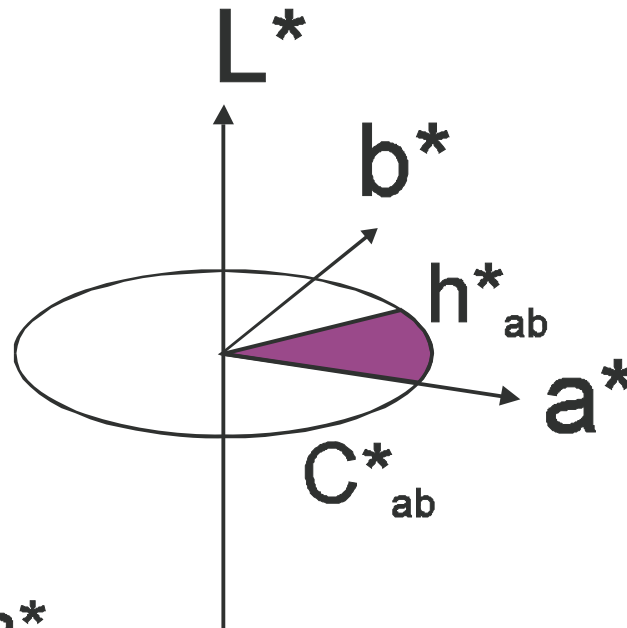
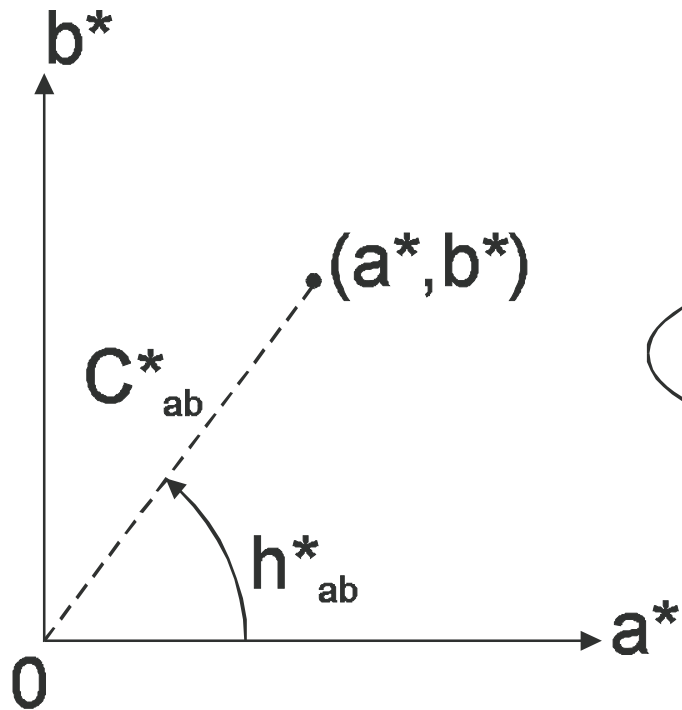
Acromático de referencia (adaptación cromática)



Modelo de apariencia simple

Sistemas uniformes de color

- Paso de CIE - L*a*b* y L*u*v* a CIE - L*C*h*:



$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$C_{uv}^* = \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2}$$

$$h_{ab}^* = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

$$h_{uv}^* = \arctg\left(\frac{v^*}{u^*}\right)$$

Sistemas uniformes de color

- Fórmula de diferencia de color:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$\Delta \equiv$ muestra – estándar

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2}$$

$$\Delta H_{ab}^* = 2 \sqrt{C_{ab, std}^* \cdot C_{ab, m}^*} \cdot \text{sen} \left(\frac{\Delta h_{ab}^*}{2} \right)$$

$\Delta \equiv$ muestra – estándar

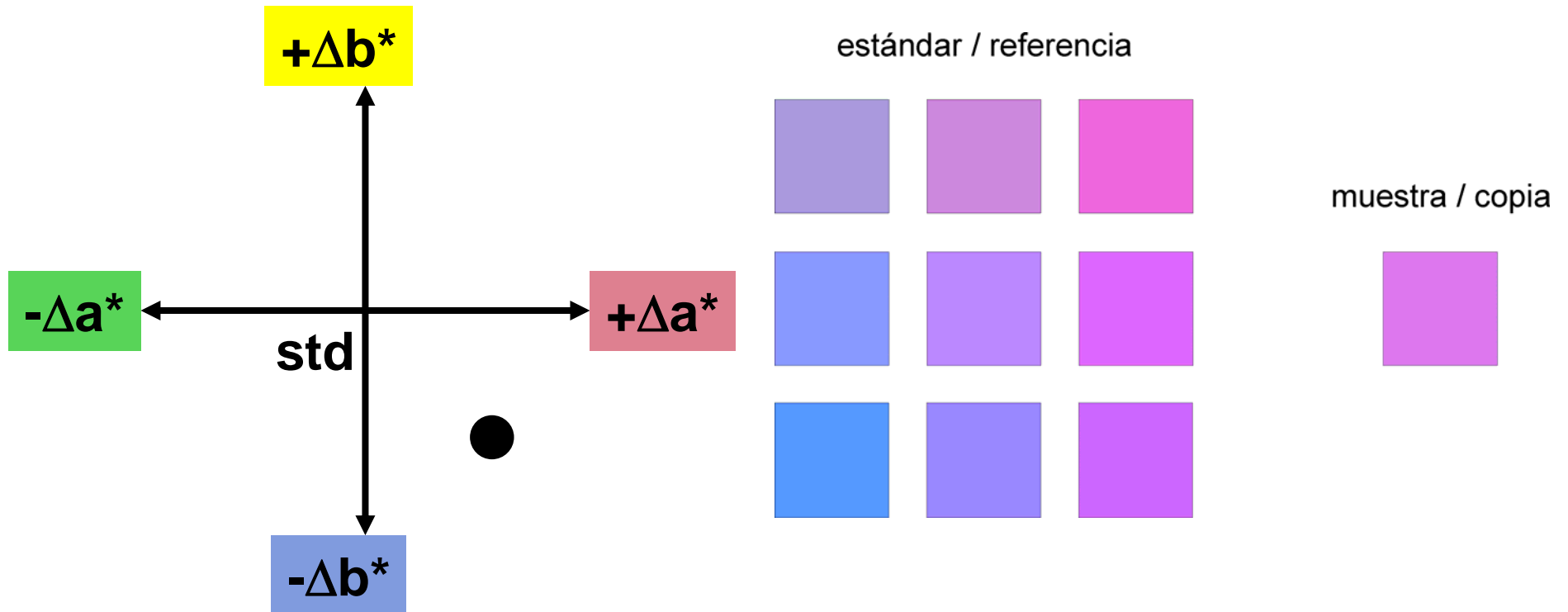
$$\Delta E_{uv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

$$\Delta E_{uv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{uv}^*)^2 + (\Delta H_{uv}^*)^2}$$

$$\Delta H_{uv}^* = 2 \sqrt{C_{uv, std}^* \cdot C_{uv, m}^*} \cdot \text{sen} \left(\frac{\Delta h_{uv}^*}{2} \right)$$

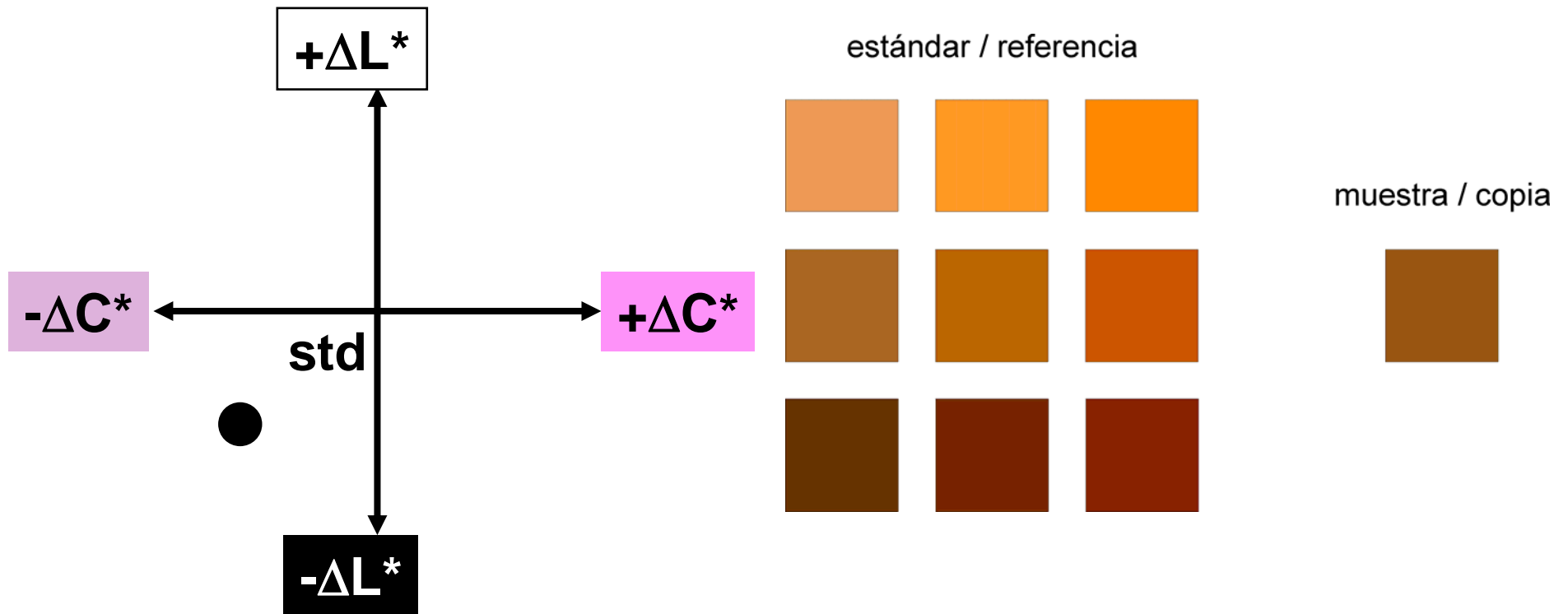
Sistemas uniformes de color

- Diferencias relativas de color en el perfil CIE - (a^* , b^*):



Sistemas uniformes de color

- Diferencias relativas de color en el perfil CIE - (C^* , L^*):



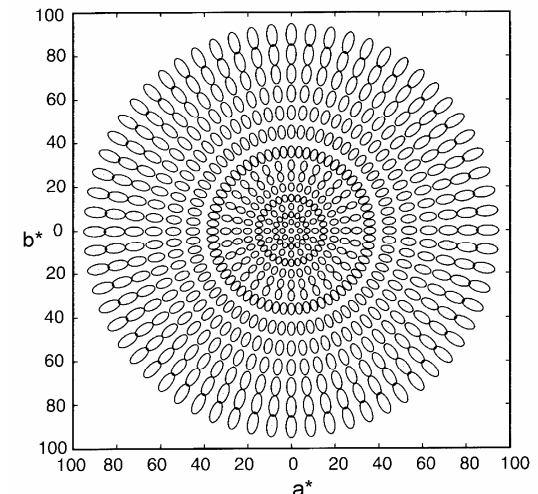
Modificaciones posteriores a CIELAB

- Mejoras del algoritmo ΔE basado en CIE - $L^*a^*b^*C^*h^*$
 - Ajuste de varios conjuntos de datos experimentales
 - Filosofía del comité CIE TC1-29

$$\Delta E = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L \cdot S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C \cdot S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H \cdot S_H} \right)^2 \right]^{0.5}$$

k : factor paramétrico (cte)

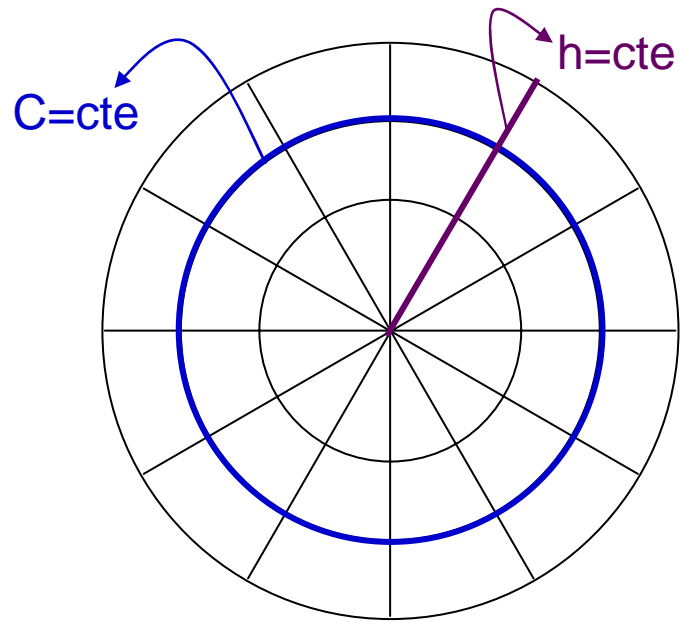
S : función de ponderación o correctiva



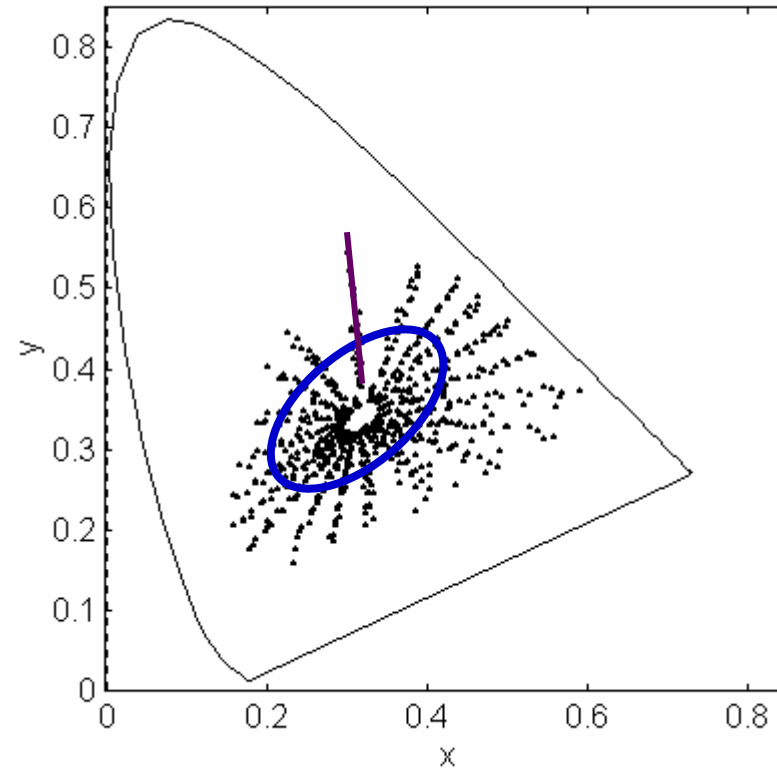
Modificaciones posteriores a CIELAB

- Fórmulas ΔE basadas en CIE - $L^*a^*b^*C_{ab}^*h_{ab}^*$
 - CMC (*l:c*), 1984, textiles (plásticos, colorantes, pinturas)
 - $k_H = 1$, $l \equiv k_L$, $c \equiv k_C$, según aplicación
 - $S_L = f(L^*)$, $S_C = f(C_{ab}^*)$, $S_H = f(C_{ab}^*, h_{ab}^*)$
 - BFD (*l:c*), 1987, mejor para diferencias pequeñas
 - $l \equiv k_L$, $c \equiv k_C$, $k_H = 1$
 - $S_L = 1$, S_H depende del croma C_{ab}^* y del ángulo-tono h_{ab}^*
 - Término adicional cruzado entre ΔC_{ab}^* y ΔH_{ab}^*
 - **CIE94**
 - $S_L = 1$, S_C y S_H dependen del croma C_{ab}^*
 - CIE2000, CIECAM, sCIELAB, etc

Sistemas más uniformes

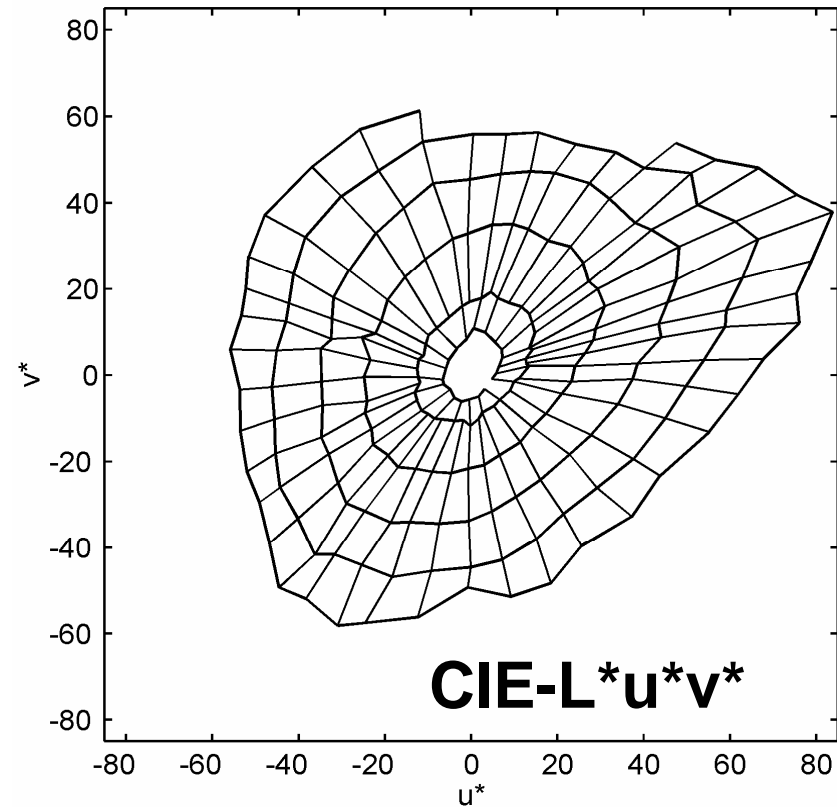
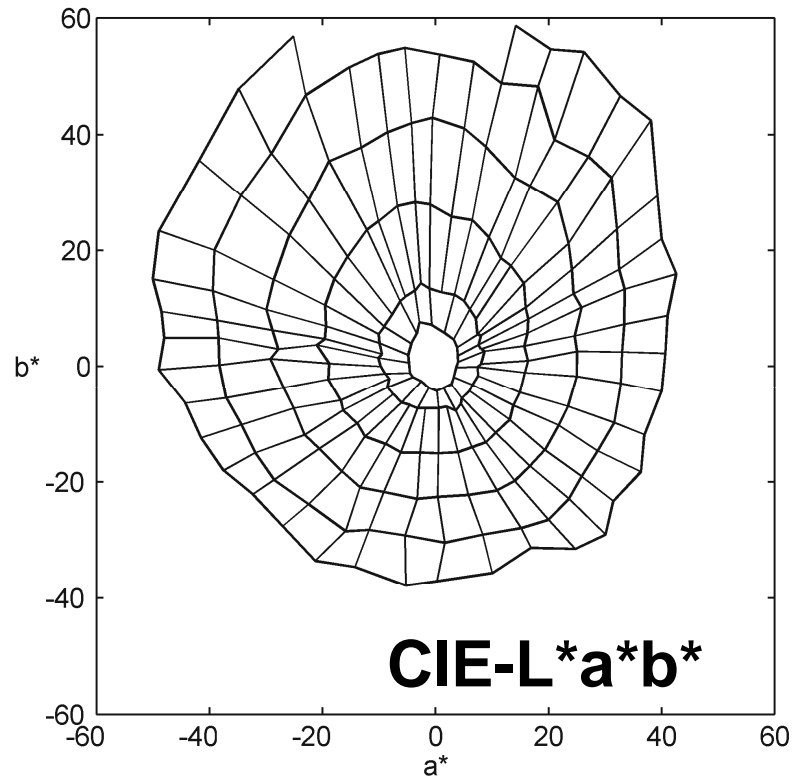


Locus de croma y tono constantes en un espacio uniforme, con $Y = cte$.



Locus de croma y tono constantes en el plano xy .

Sistemas más uniformes



Sistemas más uniformes

- **SVF**: Sigue línea mixta entre reproducir locus de croma constante Munsell y respuestas reales de fotorreceptores y diferentes clases de células del CGL
- ¿Y el futuro?
 - CIECAM10? ATTD10?

