

# Reproducción digital del color



# Sumario

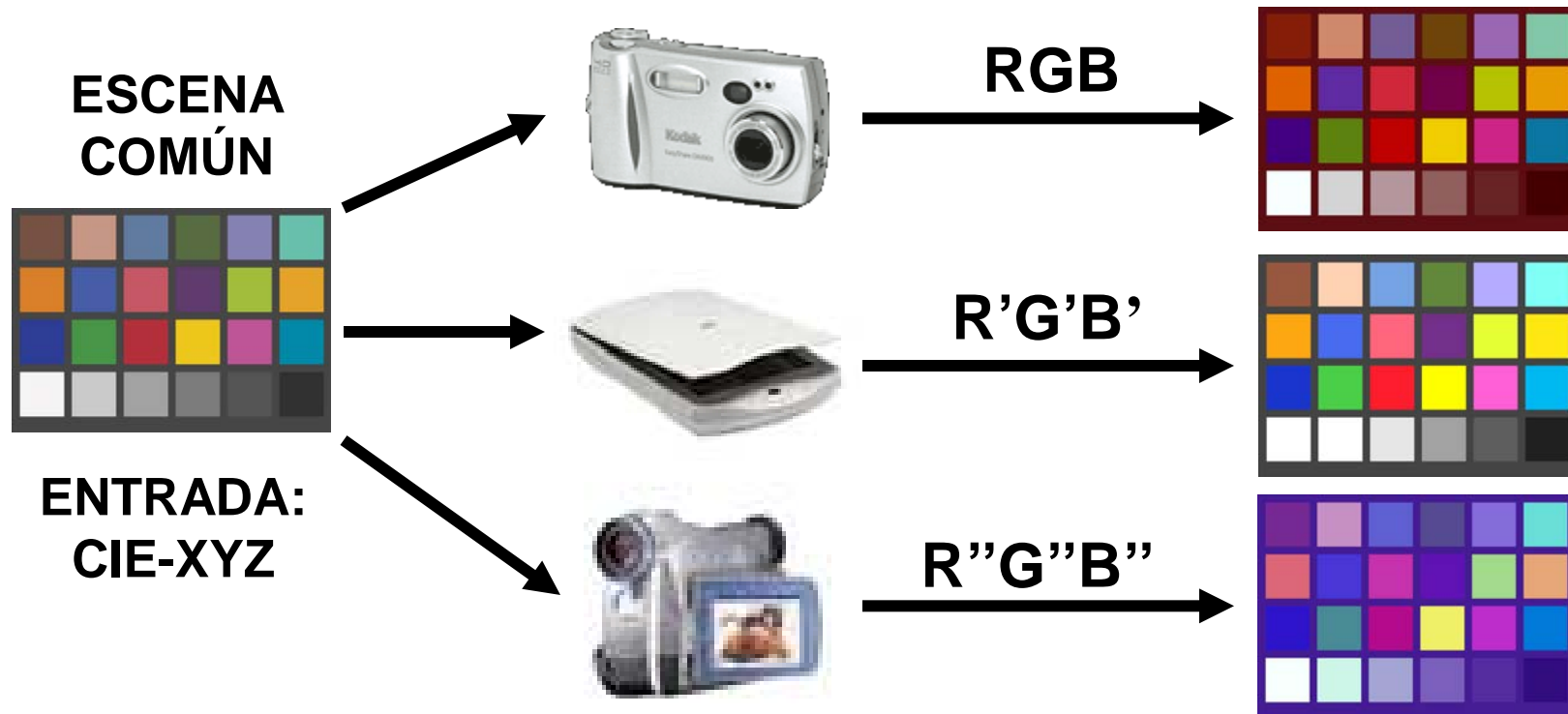
- Principios de gestión del color
- El perfil ICC
- Algoritmos CLUT
- Dispositivos de captura
- Dispositivos de visualización
- Dispositivos de impresión

# Principios de gestión del color

- Cadena completa de reproducción del color de una imagen
  - Origen: escena real o simulada por ordenador (vectorial, etc)
  - Sistemas de captura:
    - cámara fotográfica, escáner, cámara digital, videocámara
  - Almacenamiento: RAW, TIFF, JPEG, GIF, etc
  - Sistemas de visualización:
    - monitor CRT, pantalla LCD, OLEDs,
  - Sistemas de edición:
    - Impresión, vídeo, internet, red local, etc
  - Sistemas de impresión:
    - Electrofotográfico (láser), chorro de tinta, sublimación, offset

# Principios de gestión del color

- Inconsistencia de color entre dispositivos de captura:



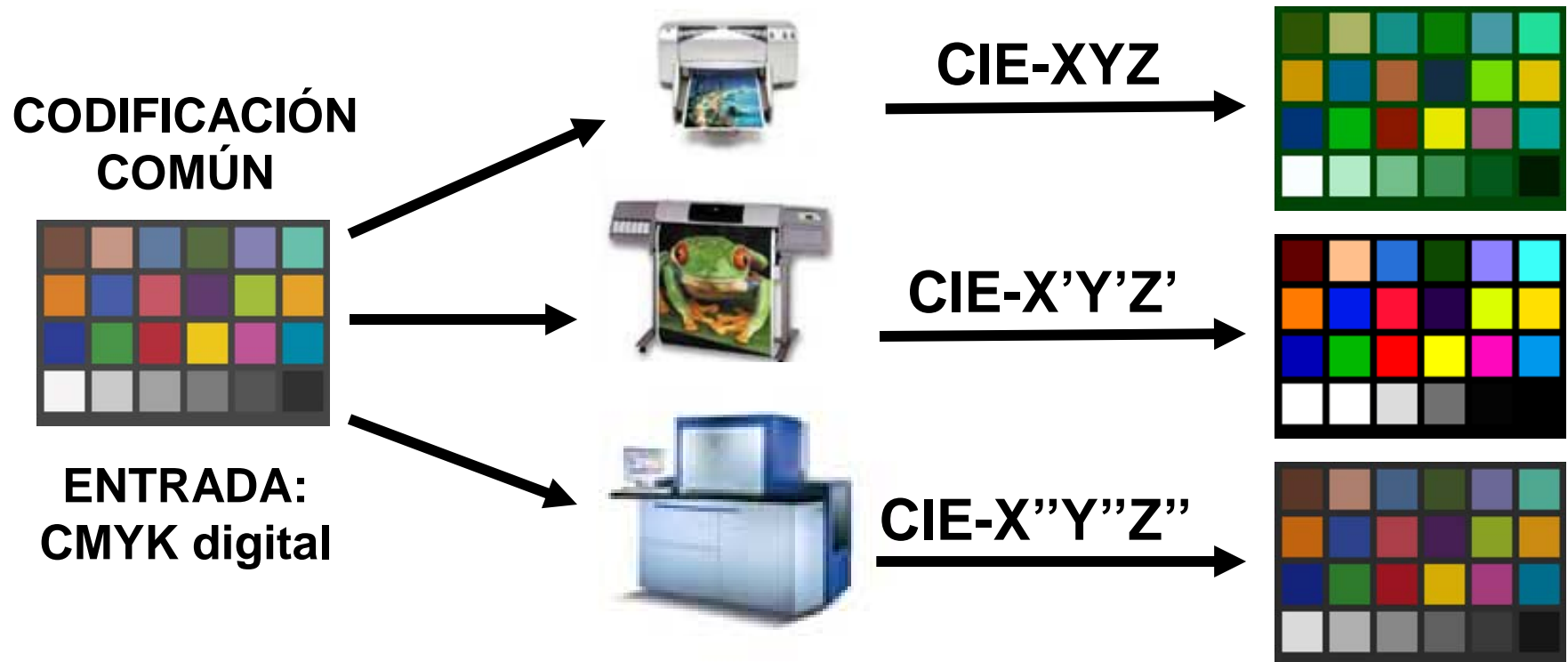
# Principios de gestión del color

- Inconsistencia de color entre dispositivos de visualización:



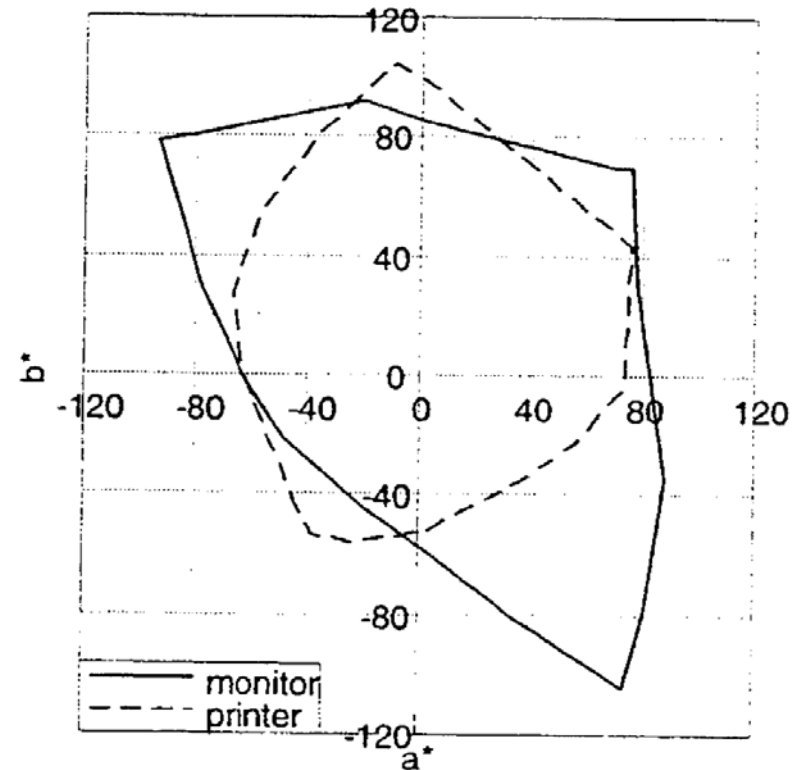
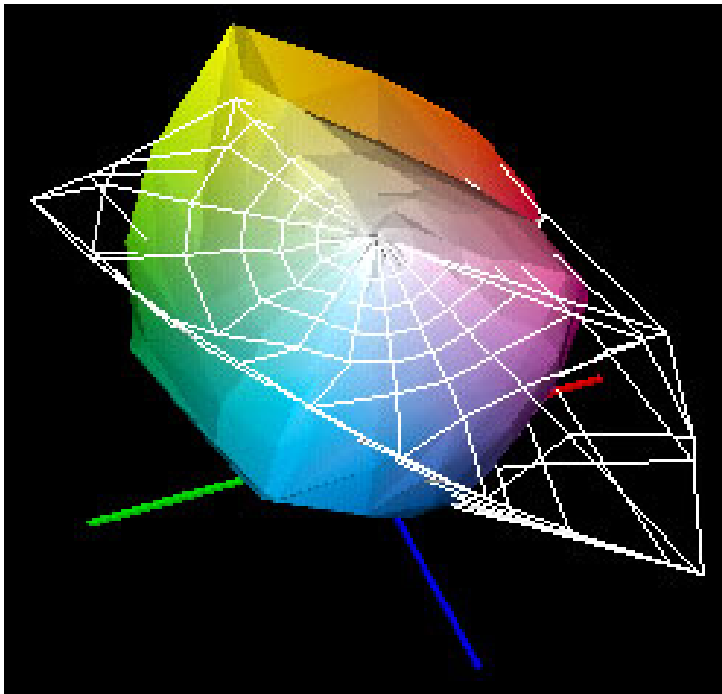
# Principios de gestión del color

- Inconsistencia de color entre dispositivos de impresión:



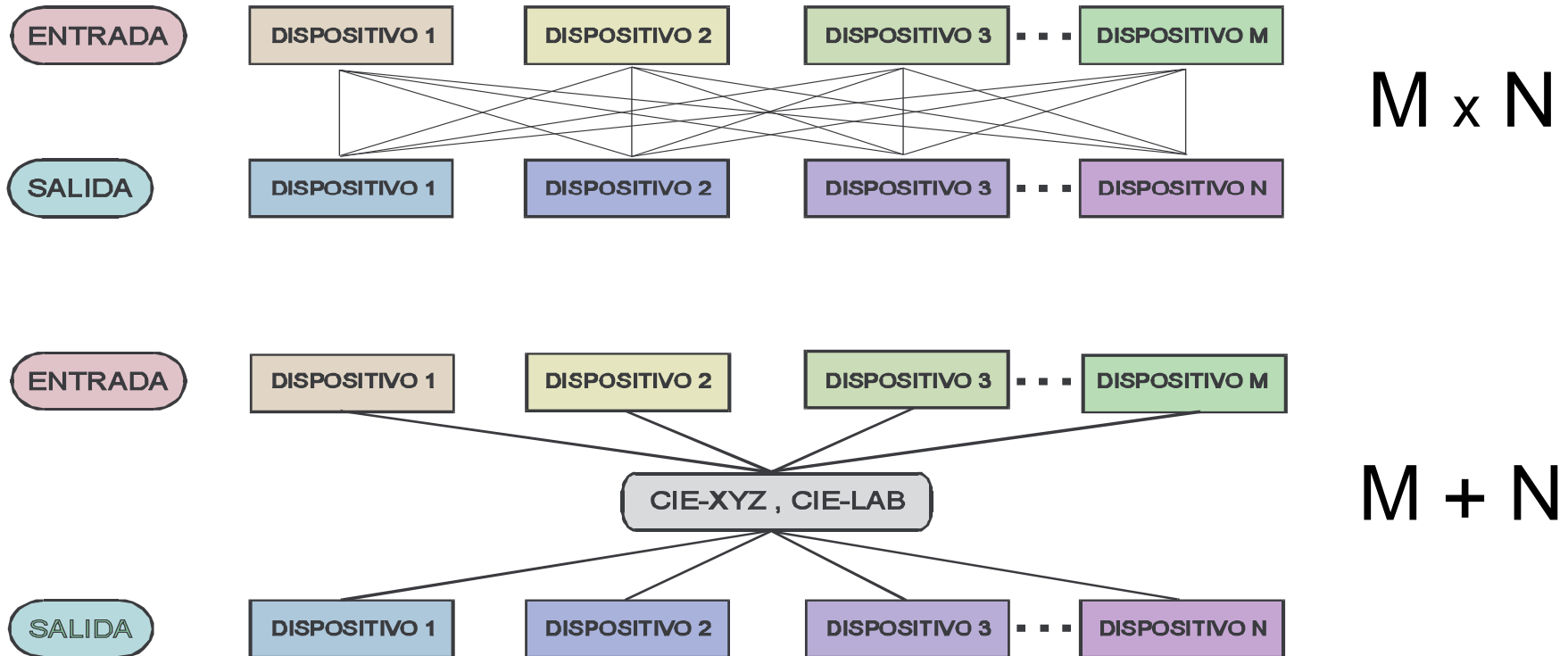
# Principios de gestión del color

- Monitor RGB vs. impresora CMYK



# Principios de gestión del color

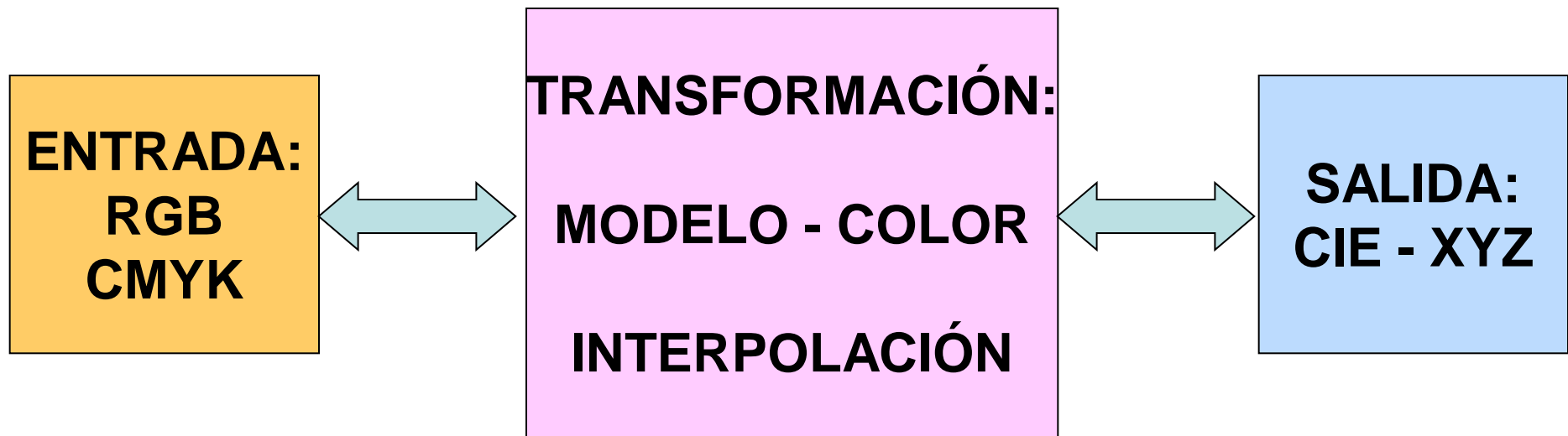
- Espacio del color independiente del dispositivo:





# Principios de gestión del color

- Caracterización vs. Calibración de un dispositivo:
  - Calibración: ajuste de los parámetros del modelo de caracterización

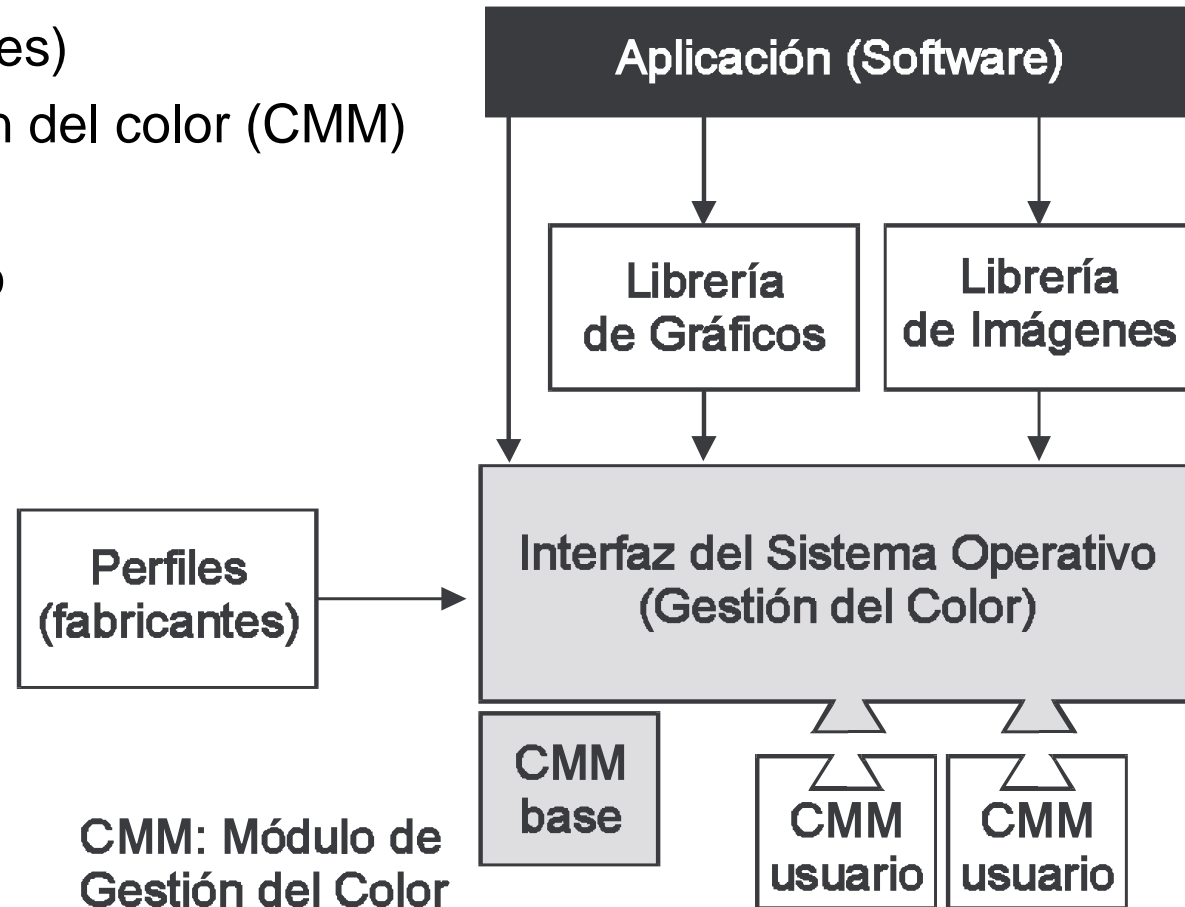


# El perfil ICC

- ICC = International Color Consortium: <http://www.color.org>
- Fundadores en 1993:
  - Adobe, Agfa, Apple, Kodak, FOGRA, Microsoft, Silicon y Sun
  - Actualmente: + de 70 miembros
- Motivación y Objetivo:
  - Crear, promover y fomentar la evolución de manera abierta o neutral de plataformas, aplicaciones informáticas y otros sistemas que manejen el color en formato digital
- ICC promueve un formato de intercambio digital de color:
  - Origen: Apple ColorSync 2.0
  - Versión actual: ICC.1:2004-10 (versión 4.2.0.0)

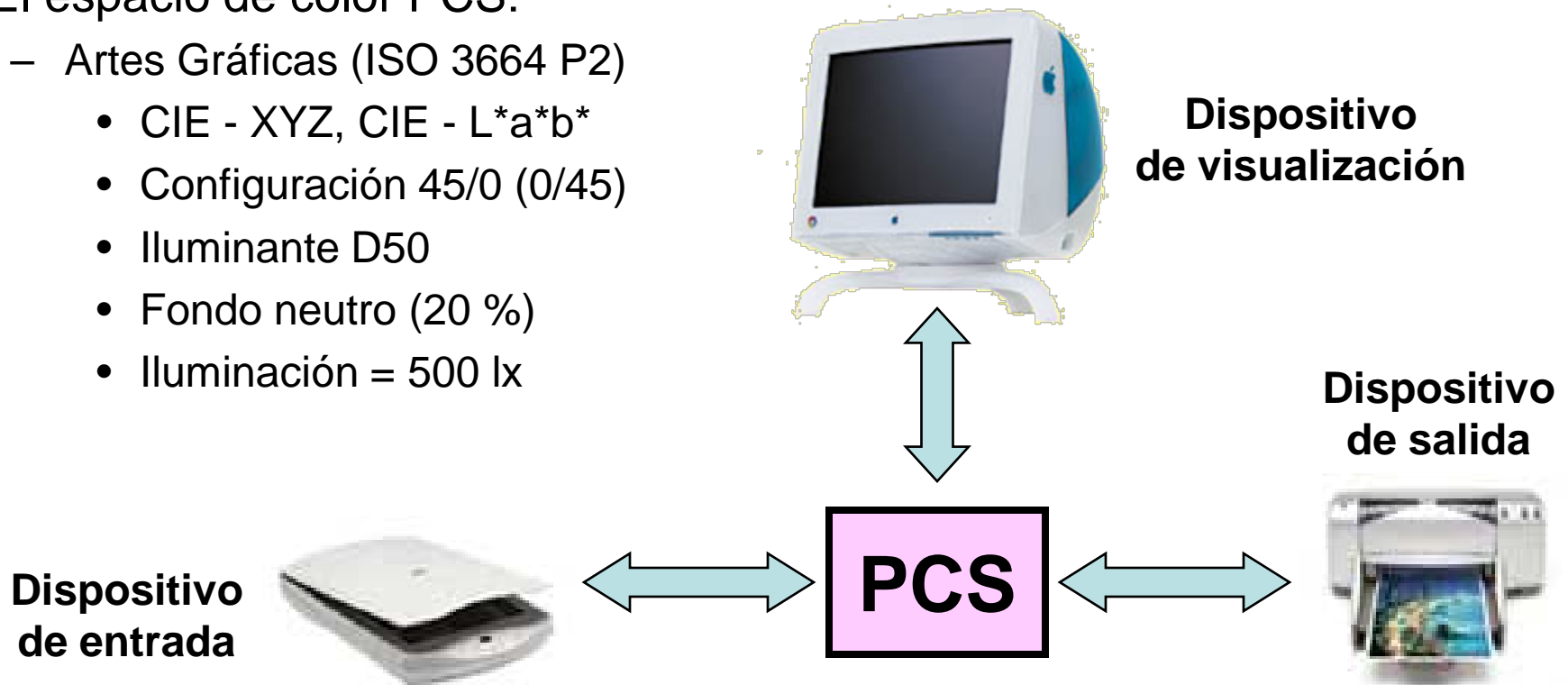
# El perfil ICC

- Estructura:
  - Perfiles (fabricantes)
  - Módulo de gestión del color (CMM)
  - Software
  - Sistema operativo



# El perfil ICC

- El espacio de color PCS:
  - Artes Gráficas (ISO 3664 P2)
    - CIE - XYZ, CIE - L\*a\*b\*
    - Configuración 45/0 (0/45)
    - Iluminante D50
    - Fondo neutro (20 %)
    - Iluminación = 500 lx



# El perfil ICC

- Métodos de proyección de la gama de colores:
- Colorimétrico relativo:
  - el punto blanco del medio actual se proyecta sobre el punto blanco del medio de referencia. El resto de colores se proyectan en concordancia.
- Colorimétrico absoluto:
  - El punto blanco del iluminante se proyecta sobre el iluminante de referencia. El resto de colores se proyectan en concordancia.

# El perfil ICC

- Métodos de proyección de la gama de colores:
- Perceptual (del vendedor): para imágenes
  - la gama completa de colores se comprime o expande para llenar la gama del espacio de destino. El balance de grises se preserva a costa de perder exactitud colorimétrica.
- Saturación (del vendedor): para esquemas o figuras
  - la saturación de los píxels de la imagen se preserva, a expensas quizás de la exactitud del tono y la claridad.

# El perfil ICC

- Enlaces de interés:
  - ICC: <http://www.color.org>
  - Windows y Gestión del Color: ICM 2.0
    - <http://www.microsoft.com/whdc/device/display/color/default.msp>
  - Erasmus Mundus - CIMET:
    - <http://www.master-erasmusmundus-color.eu/>
  - Gestión del color desde AIDO:
    - <http://www.gestiondecolor.com/articulos-tecnicos>
  - CIE y Tecnología del Color:
    - <http://www.colour.org/info/TCs.htm>

# Introducción

- Transformaciones genéricas de color:
  - Modelo de mezclas de colores: analítico e invertible
    - Aditivo (RGB) vs. Sustractivo (CMYK)
  - Algoritmos de interpolación multidimensional (CLUT): no invertible
    - 3-D  $\rightarrow$  4-D, o viceversa: XYZ / L\*a\*b\*  $\leftrightarrow$  CMYK, RGB  $\leftrightarrow$  XYZ / L\*a\*b\*, etc





# Introducción

- Tipos de transformaciones de color en el perfil ICC:

## ENTRADA



**Modelo: Matriz + TRC**  
**CLUT: más usual**

## VISUALIZACIÓN



**Modelo: Matriz + TRC**  
**CLUT: raro**

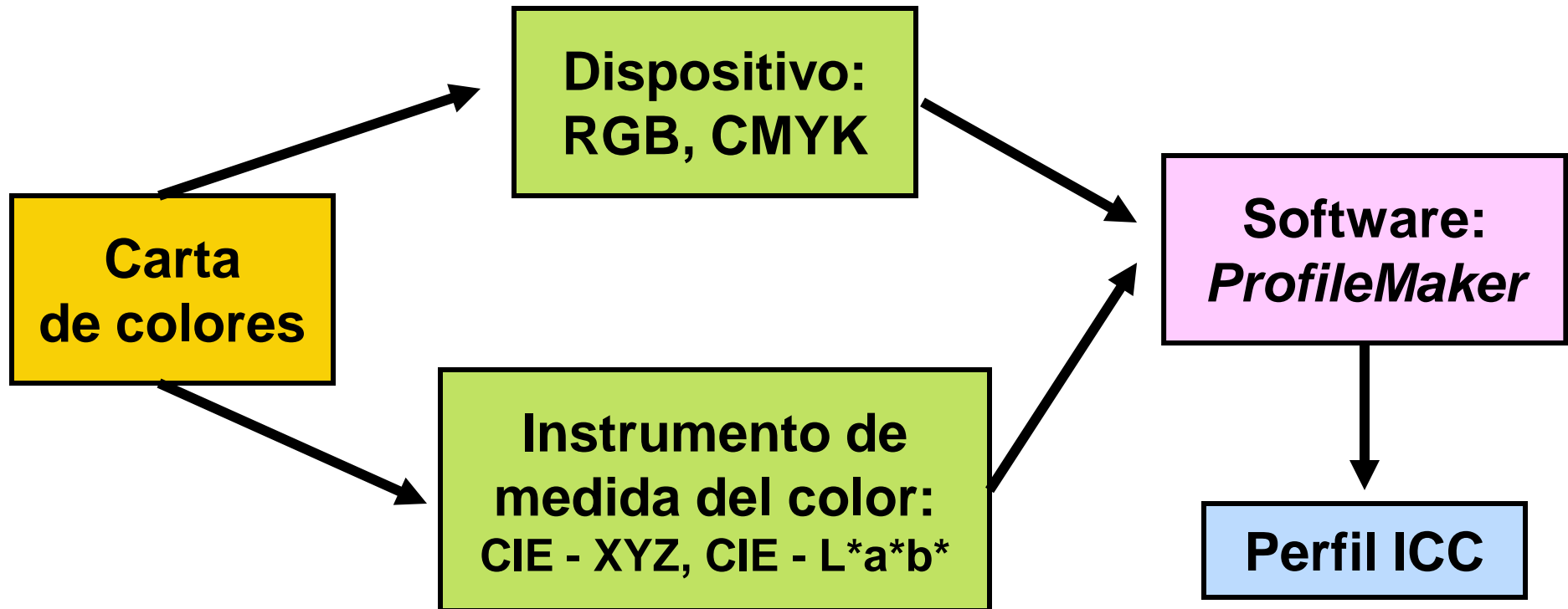
## SALIDA



**Modelo: No**  
**CLUT: Sí**

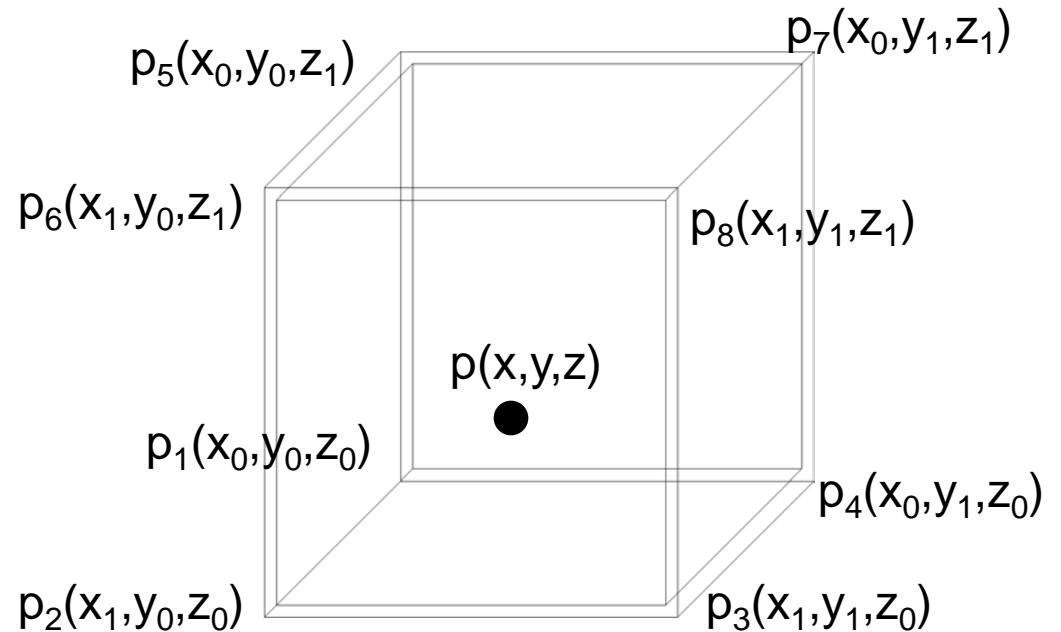
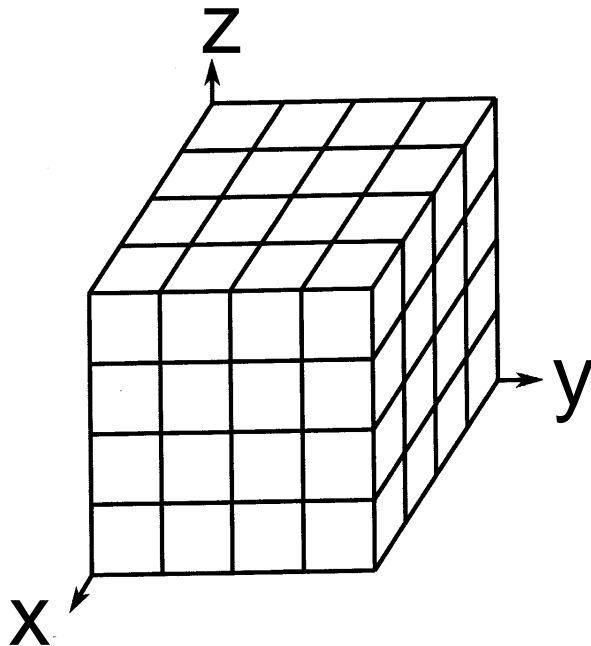
# Introducción

- Elementos imprescindibles para la caracterización:



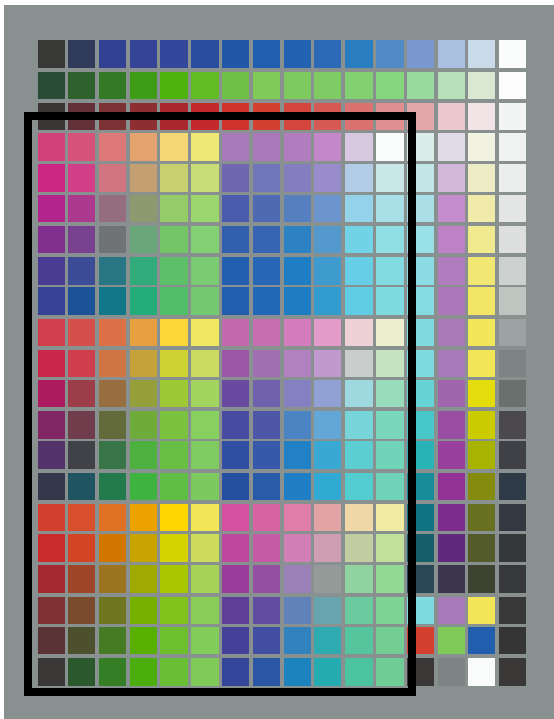
# Algoritmos CLUT

- Interpolación lineal 3 - D:
  - Espaciado uniforme en el espacio de entrada



# Algoritmos CLUT

- Interpolación lineal 3 - D: sRGB (impresión)  $\rightarrow$  L\*a\*b\*



**Muestreo de sRGB: 6x6x6 (216 colores)**

R	G	B
0	0	0
51	51	51
102	102	102
153	153	153
204	204	204
255	255	255

# Algoritmos CLUT

- Interpolación lineal 3 - D: Extracción de un color “ $p$ ”
  - Si  $p \equiv [R_p, G_p, B_p]$  cualesquiera  $\rightarrow$  ¿  $[L^*_p, a^*_p, b^*_p]$  ?
  - Datos conocidos: celda de interpolación trilineal
    - $p_1 \equiv [R_0, G_0, B_0]$  ,  $[L^*_1, a^*_1, b^*_1]$
    - $p_2 \equiv [R_1, G_0, B_0]$  ,  $[L^*_2, a^*_2, b^*_2]$
    - $p_3 \equiv [R_1, G_1, B_0]$  ,  $[L^*_3, a^*_3, b^*_3]$
    - $p_4 \equiv [R_0, G_1, B_0]$  ,  $[L^*_4, a^*_4, b^*_4]$
    - $p_5 \equiv [R_0, G_0, B_1]$  ,  $[L^*_5, a^*_5, b^*_5]$
    - $p_6 \equiv [R_1, G_0, B_1]$  ,  $[L^*_6, a^*_6, b^*_6]$
    - $p_7 \equiv [R_0, G_1, B_1]$  ,  $[L^*_7, a^*_7, b^*_7]$
    - $p_8 \equiv [R_1, G_1, B_1]$  ,  $[L^*_8, a^*_8, b^*_8]$

# Algoritmos CLUT

- Interpolación lineal 3 - D: Extracción de un color “p”

$$L_p^* = \sum_{i=1}^8 w_i L_i^*$$

$$a_p^* = \sum_{i=1}^8 w_i a_i^*$$

$$b_p^* = \sum_{i=1}^8 w_i b_i^*$$

$$w_1 = (1 - q_R)(1 - q_G)(1 - q_B)$$

$$w_2 = q_R (1 - q_G)(1 - q_B)$$

$$w_3 = q_R q_G (1 - q_B)$$

$$w_4 = (1 - q_R) q_G (1 - q_B)$$

$$w_5 = (1 - q_R)(1 - q_G) q_B$$

$$w_6 = q_R (1 - q_G) q_B$$

$$w_7 = (1 - q_R) q_G q_B$$

$$w_8 = q_R q_G q_B$$

y

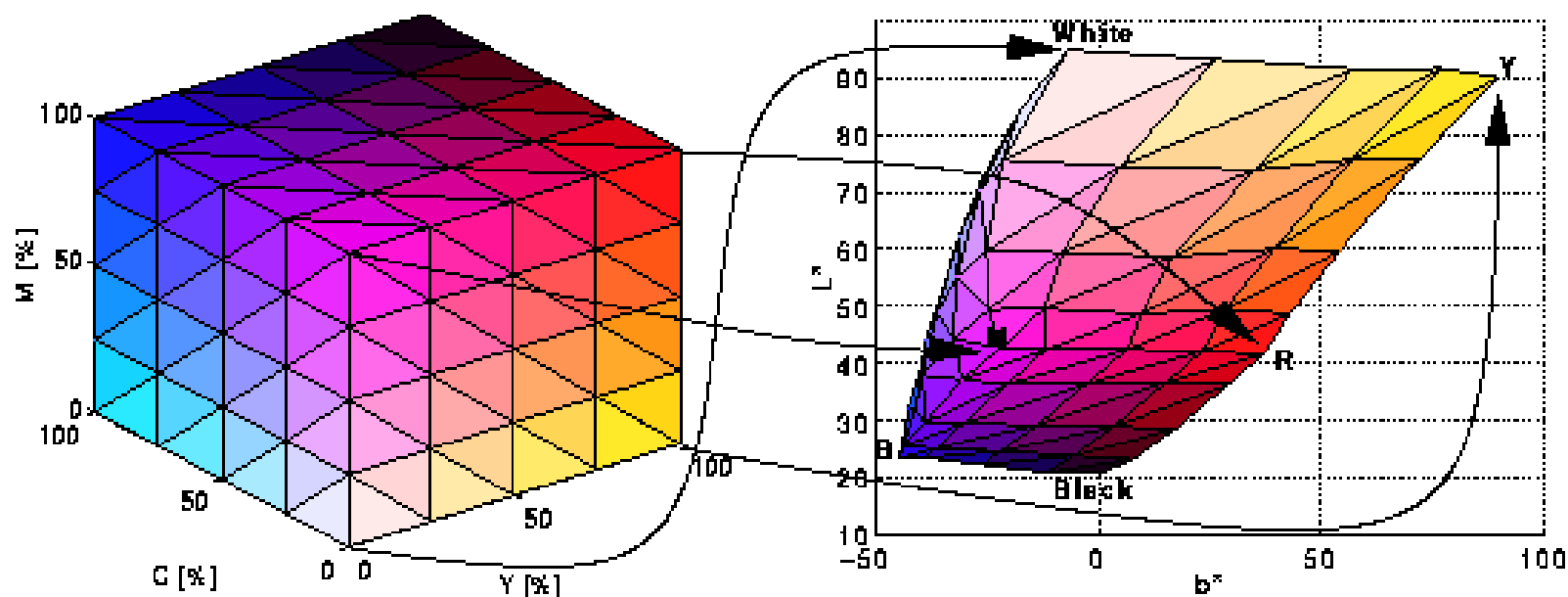
$$q_R = \frac{R_p - R_0}{R_1 - R_0}$$

$$q_G = \frac{G_p - G_0}{G_1 - G_0}$$

$$q_B = \frac{B_p - B_0}{B_1 - B_0}$$

# Algoritmos CLUT

- Regresión polinómica (no lineal) multidimensional:
  - Espaciado no uniforme en el espacio de entrada



# Algoritmos CLUT

- Regresión polinómica (no lineal) multidimensional:
  - $L^*a^*b^*$  → sRGB de la carta de colores IEC 61966 7-1 Ed.1: 2001

$$R = m_{11} + m_{12}L + m_{13}a + m_{14}b + m_{15}La + m_{16}Lb + m_{17}ab + m_{18}L^2 +$$

$$m_{19}a^2 + m_{110}b^2 + m_{111}L^2a + m_{112}L^2b + m_{113}a^2L + m_{114}a^2b + m_{115}b^2L +$$

$$m_{116}b^2a + m_{117}Lab + m_{118}L^3 + m_{119}a^3 + m_{120}b^3$$

$$G = m_{21} + m_{22}L + m_{23}a + m_{24}b + m_{25}La + m_{26}Lb + m_{27}ab + m_{28}L^2 +$$

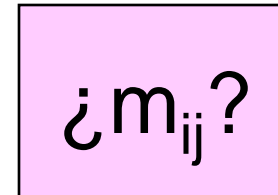
$$m_{29}a^2 + m_{210}b^2 + m_{211}L^2a + m_{212}L^2b + m_{213}a^2L + m_{214}a^2b + m_{215}b^2L +$$

$$m_{216}b^2a + m_{217}Lab + m_{218}L^3 + m_{219}a^3 + m_{220}b^3$$

$$B = m_{31} + m_{32}L + m_{33}a + m_{34}b + m_{35}La + m_{36}Lb + m_{37}ab + m_{38}L^2 +$$

$$m_{39}a^2 + m_{310}b^2 + m_{311}L^2a + m_{312}L^2b + m_{313}a^2L + m_{314}a^2b + m_{315}b^2L +$$

$$m_{316}b^2a + m_{317}Lab + m_{318}L^3 + m_{319}a^3 + m_{320}b^3$$





# Algoritmos CLUT

- Regresión polinómica (no lineal) multidimensional:

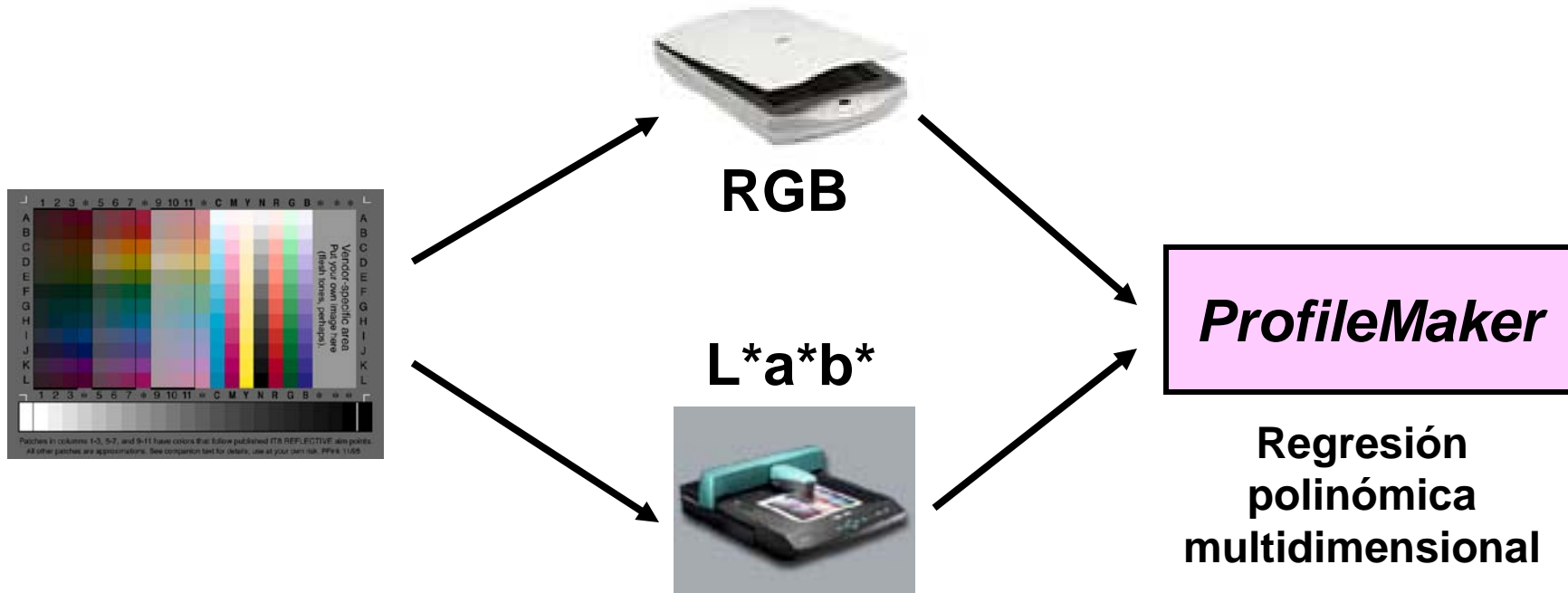
$$\mathbf{M} = [m_{ij}]_{3 \times 20} = \left[ (\mathbf{V}^t \cdot \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^t \cdot \mathbf{D} \right]^t$$

$$\text{donde } \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 & a_1 & b_1 & L_1 a_1 & L_1 b_1 & \cdots & L_1^3 & a_1^3 & b_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & L_{216} & a_{216} & b_{216} & L_{216} a_{216} & L_{216} b_{216} & \cdots & L_{216}^3 & a_{216}^3 & b_{216}^3 \end{bmatrix}$$

$$\text{y } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{216} & G_{216} & B_{216} \end{bmatrix}$$

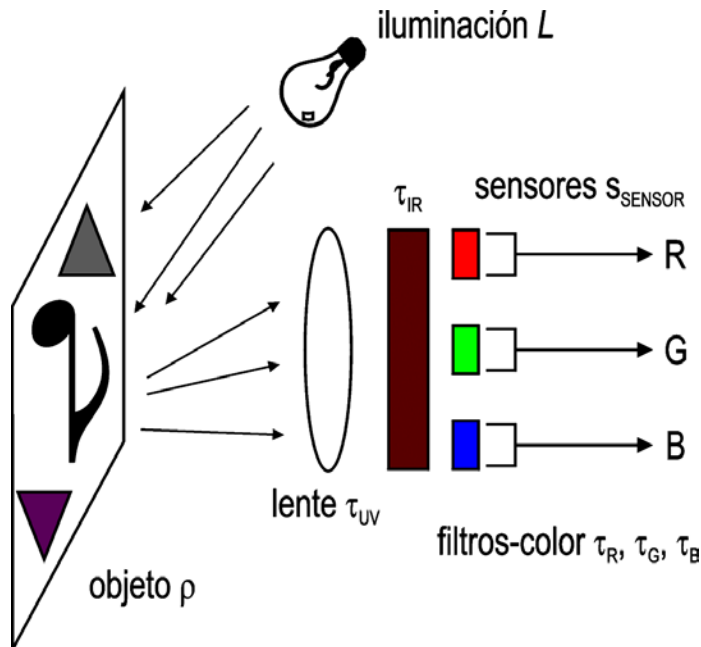
# Dispositivos de captura

- Esquema de obtención del perfil vía CLUTs:



# Dispositivos de captura

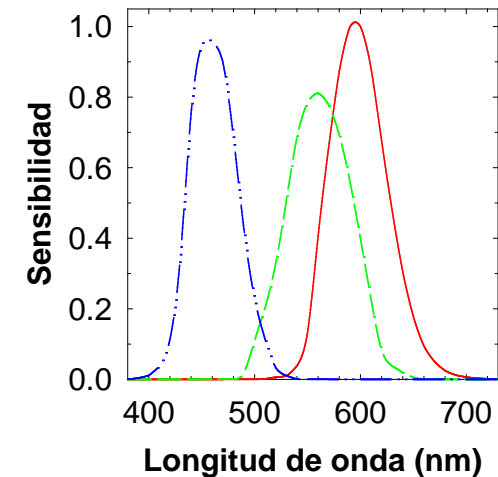
- Modelo de caracterización colorimétrica:
  - Diseño de las sensibilidades espectrales:



$$S_R \propto \tau_{UV} \cdot \tau_{IR} \cdot \tau_R \cdot S_{SENSOR}$$

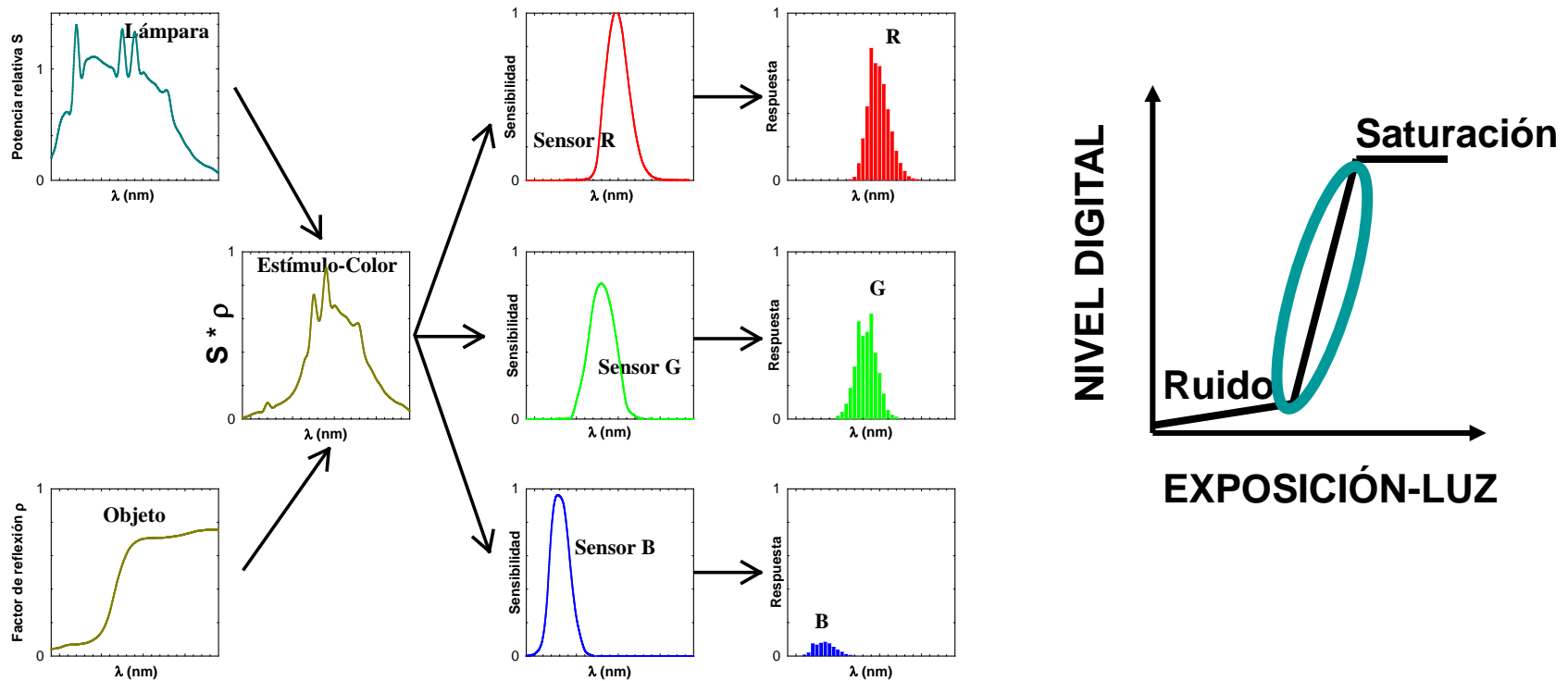
$$S_G \propto \tau_{UV} \cdot \tau_{IR} \cdot \tau_G \cdot S_{SENSOR}$$

$$S_B \propto \tau_{UV} \cdot \tau_{IR} \cdot \tau_B \cdot S_{SENSOR}$$



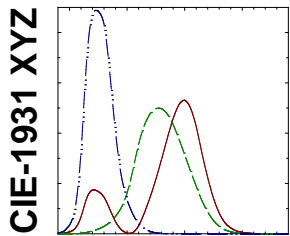
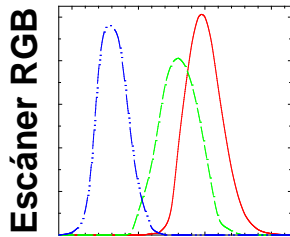
# Dispositivos de captura

- Modelo de caracterización colorimétrica:
  - Captura y codificación triestímulo de la luz:



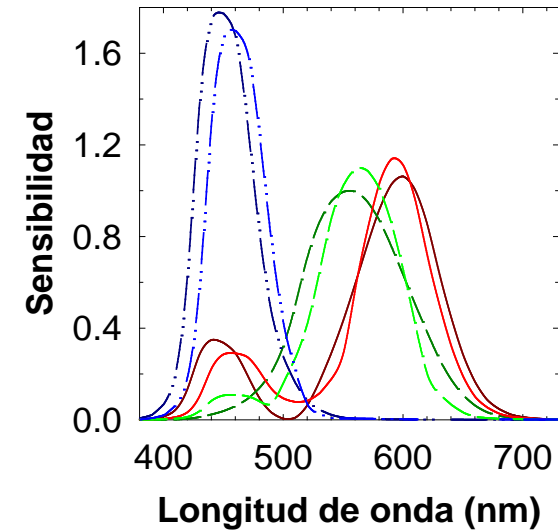
# Dispositivos de captura

- Modelo de caracterización colorimétrica:
  - Errores sistemáticos de reproducción:



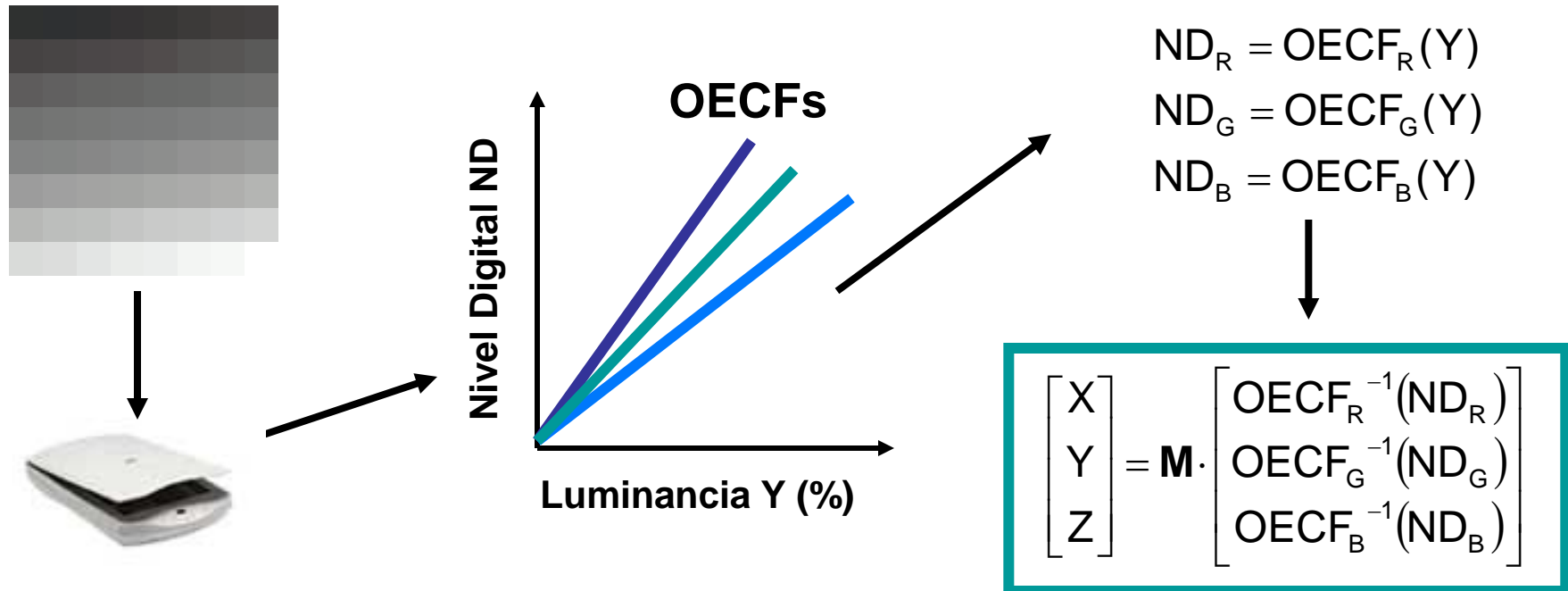
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1.0248 & 0.2040 & 0.3017 \\ 0.1253 & 1.2878 & 0.1116 \\ -0.0014 & 0.0056 & 1.7681 \end{bmatrix}$$



# Dispositivos de captura

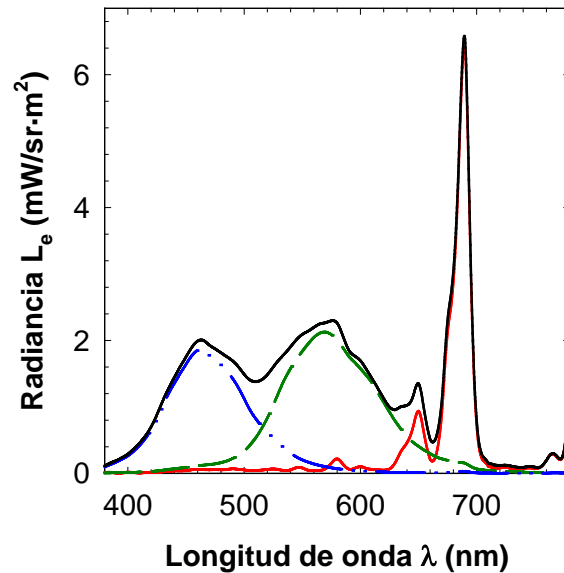
- Modelo de caracterización colorimétrica:
  - Curvas de balance de grises  $\equiv$  TRC del perfil ICC



# Dispositivos de visualización

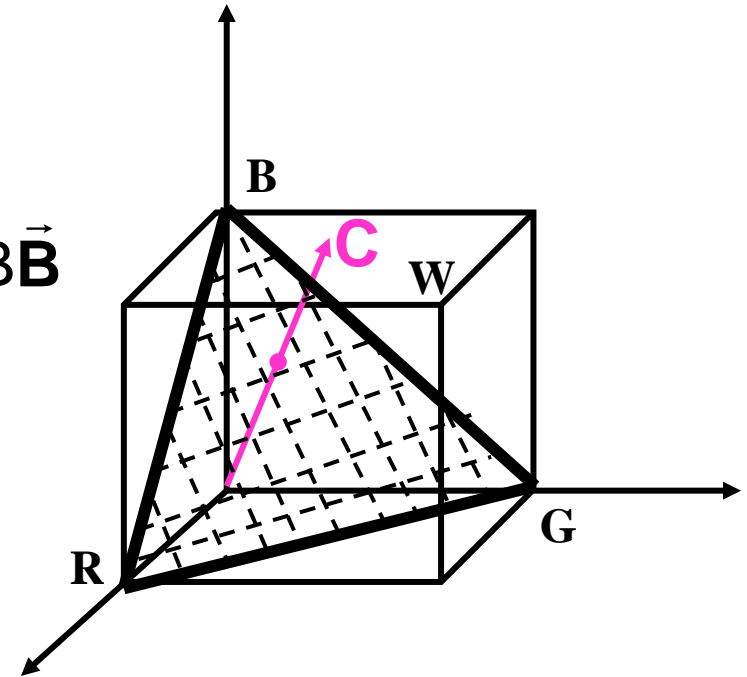
- Emisión de los primarios RGB y del blanco W:

Primarios RGB y W  
en monitor CRT



$$\vec{C} = R\vec{R} + G\vec{G} + B\vec{B}$$

$$\vec{W} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{B}$$



# Dispositivos de visualización

- Medida de los primarios RGB y del blanco W:

$$R \equiv [1,0,0]$$

$$G \equiv [0,1,0]$$

$$B \equiv [0,0,1]$$

$$W \equiv [1,1,1]$$



	x	y	$L_{\text{máx}}$
R			
G			
B			
W			

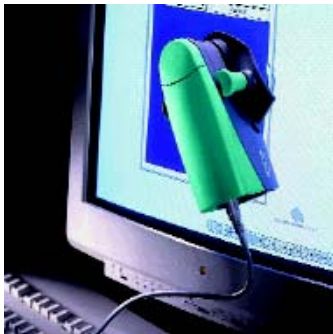
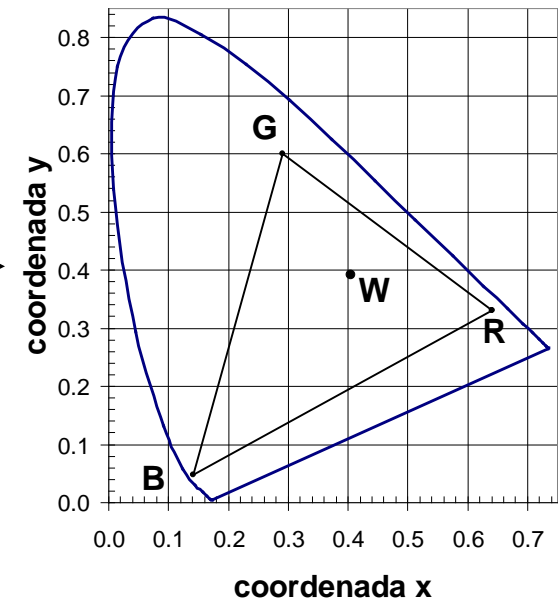


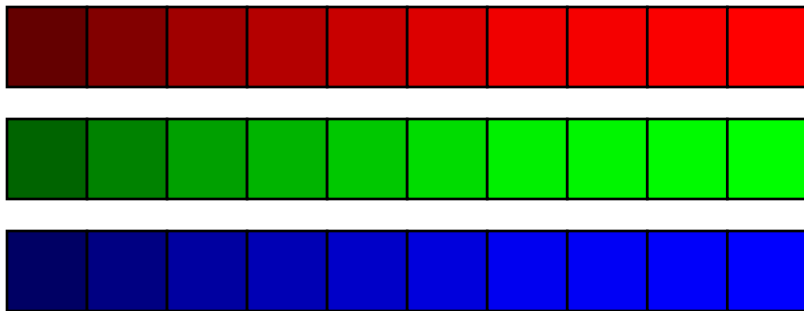
Diagrama cromático CIE-xy



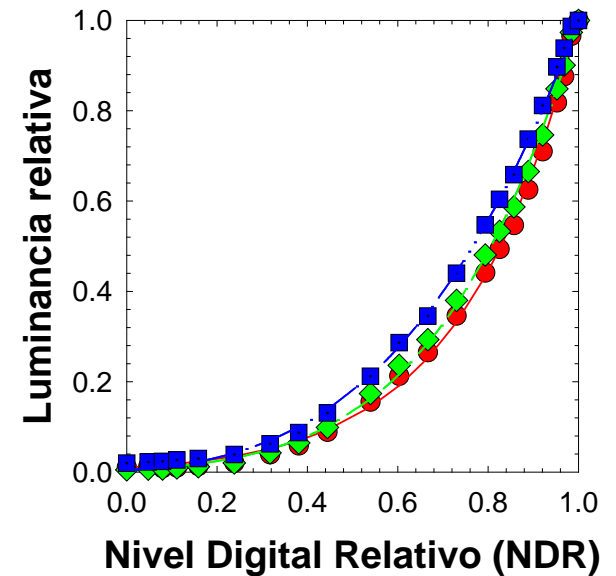


# Dispositivos de visualización

- Curvas de balance de grises  $\equiv$  TRC del perfil ICC:

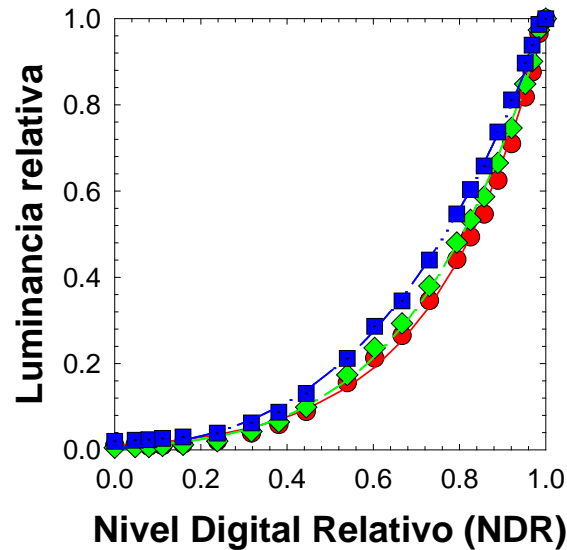


Rampa de colores primarios



# Dispositivos de visualización

- Curvas de balance de grises  $\equiv$  TRC del perfil ICC:
  - Modelo GOG de calibración ( $g$  = contraste,  $o$  = brillo)



$k = R, G, B$

$$C_k \equiv \left( \frac{L}{L_{\max}} \right)_k = (g_k \cdot \text{NDR}_k + o_k)^{\gamma_k}$$

$$g_k + o_k = 1$$

$$\text{NDR}_k = \frac{\text{ND}_k}{2^{\text{bits}} - 1} \quad \longrightarrow$$

	$g$	$o$	$\gamma$
<b>R</b>			
<b>G</b>			
<b>B</b>			

# Dispositivos de visualización

- Modelo de caracterización colorimétrica:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{XYZ} \rightarrow \text{RGB}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{\text{XYZ} \rightarrow \text{RGB}} = [\mathbf{M}_{\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}}]^{-1}, \quad C_k \equiv R, G, B$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(\mathbf{R}) & X(\mathbf{G}) & X(\mathbf{B}) \\ Y(\mathbf{R}) & Y(\mathbf{G}) & Y(\mathbf{B}) \\ Z(\mathbf{R}) & Z(\mathbf{G}) & Z(\mathbf{B}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

# Dispositivos de visualización

- Modelo de caracterización colorimétrica:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_R}{y_R} L_R & \frac{X_G}{y_G} L_G & \frac{X_B}{y_B} L_B \\ L_R & L_G & L_B \\ \frac{Z_R}{y_R} L_R & \frac{X_G}{y_G} L_G & \frac{X_B}{y_B} L_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (g_R \cdot \text{NDR}_R + o_R)^{\gamma_R} \\ (g_G \cdot \text{NDR}_G + o_G)^{\gamma_G} \\ (g_B \cdot \text{NDR}_B + o_B)^{\gamma_B} \end{bmatrix}$$

# Dispositivos de visualización

- Modelo de caracterización colorimétrica:
  - Ejemplo directo:  $ND_{RGB} \rightarrow XYZ$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66.14 & 43.27 & 22.86 \\ 36.53 & 77.34 & 19.59 \\ 8.56 & 16.11 & 110.09 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (0.266 \cdot NDR_R + 0.734)^{14.828} \\ (0.623 \cdot NDR_G + 0.377)^{5.388} \\ (0.808 \cdot NDR_B + 0.192)^{3.313} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} ND_R \\ ND_G \\ ND_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63 \\ 63 \\ 63 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} NDR_R \\ NDR_G \\ NDR_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 132.30 \\ 133.46 \\ 134.76 \end{bmatrix} \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = \begin{bmatrix} 0.9913 \\ 1 \\ 1.0097 \end{bmatrix}$$

# Dispositivos de visualización

- Modelo de caracterización colorimétrica:
  - Ejemplo directo: XYZ  $\rightarrow$  ND<sub>RGB</sub>

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9271 & -1.5691 & -0.3292 \\ -1.3758 & 2.5296 & -0.1641 \\ -0.0265 & -0.2481 & 1.2619 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \text{XYZ relativos al blanco } Y_W$$

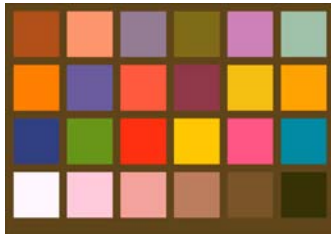
$$ND_k = (2^{\text{bits}} - 1) \frac{C_k^{1/\gamma_k} - o_k}{g_k}, \quad C_k \equiv R, G, B$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63 \\ 63 \\ 63 \end{bmatrix} \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = \begin{bmatrix} 0.4721 \\ 0.4721 \\ 0.4721 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.486 \\ 0.467 \\ 0.466 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} NDR_R \\ NDR_G \\ NDR_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.821 \\ 0.789 \\ 0.745 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} ND_R \\ ND_G \\ ND_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 52 \\ 50 \\ 47 \end{bmatrix}$$

# Dispositivos de visualización

- Conversión entre RGB - monitor 1 y RGB - monitor 2:

$R_1G_1B_1$  digital



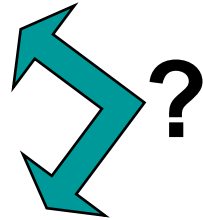
CIE-XYZ



$R_2G_2B_2$  digital



CIE-XYZ



# Dispositivos de visualización

- Conversión del RGB - monitor a sRGB:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{W\text{-monitor}} = M_{\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad C_k = [g_k \cdot \text{NDR}_k + o_k]^{\gamma_k}, \quad \text{NDR}_k = \frac{\text{ND}_k}{2^{\text{bits}} - 1}$$

Si W - monitor  $\neq$  iluminante D65 (sRGB)  $\Rightarrow$  **Adaptación cromática (BFD)**

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{D65}} = M_{\text{adapt}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{W\text{-monitor}} \Rightarrow \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{sRGB}} = M_{\text{XYZ} \rightarrow \text{sRGB}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{D65}}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{si } C_k \leq 0.0031308 & \rightarrow \text{NDR}_k = 12.92 \cdot C_k \rightarrow \text{ND}_k = (2^{\text{bits}} - 1) \cdot \text{NDR}_k \\ \text{si } C_k > 0.0031308 & \rightarrow \text{NDR}_k = 1.055 \cdot (C_k)^{1/2.4} - 0.055 \rightarrow \text{ND}_k = (2^{\text{bits}} - 1) \cdot \text{NDR}_k \end{cases}$$



# Dispositivos de visualización

- Conversión del RGB - monitor a sRGB:

Como posiblemente  $W$  - monitor  $\neq$  iluminante D65 (sRGB)

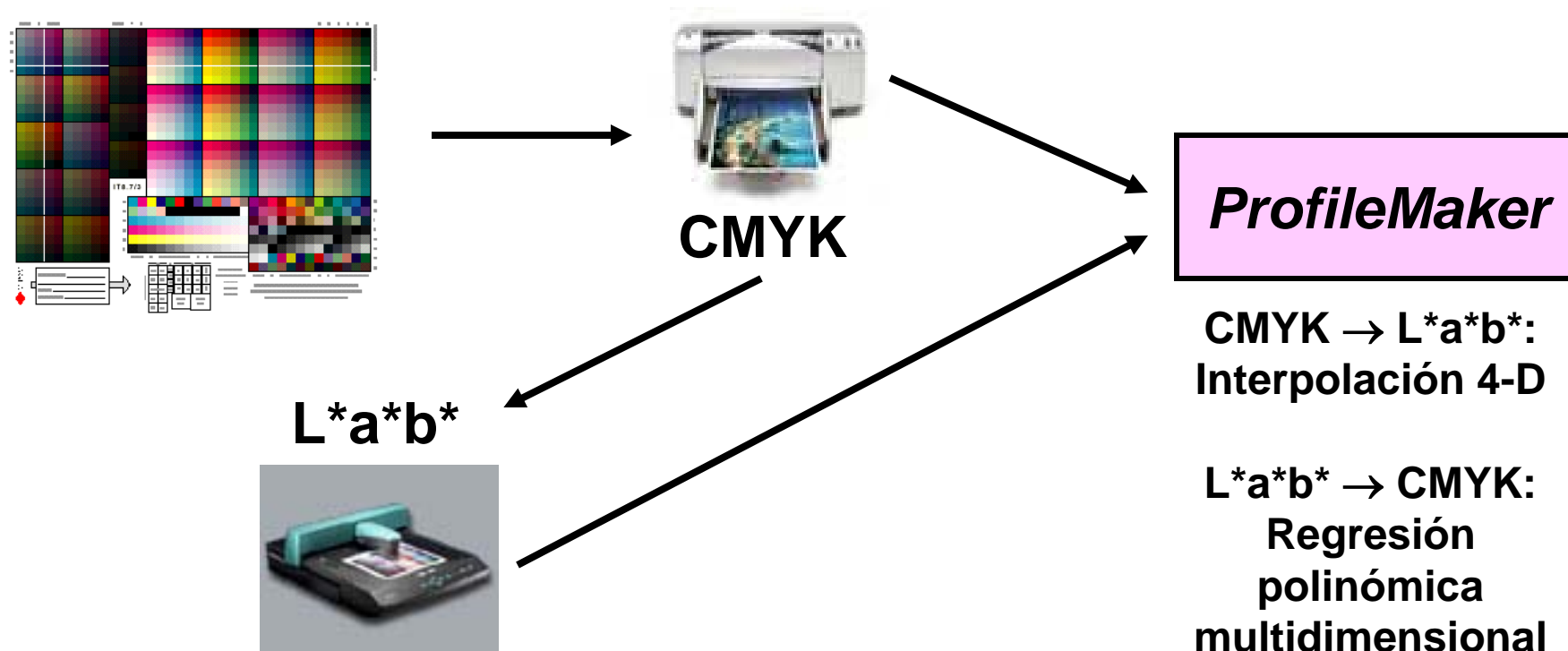
$\Rightarrow$  **Adaptación cromática (BFD)**

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65} = \mathbf{M}_{\text{adapt}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{W\text{-monitor}}, \quad \mathbf{M}_{\text{adapt}} = \mathbf{M}_{\text{BFD}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L_{D65} / L_W & 0 & 0 \\ 0 & M_{D65} / M_W & 0 \\ 0 & 0 & S_{D65} / S_W \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{\text{BFD}}$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{BFD}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

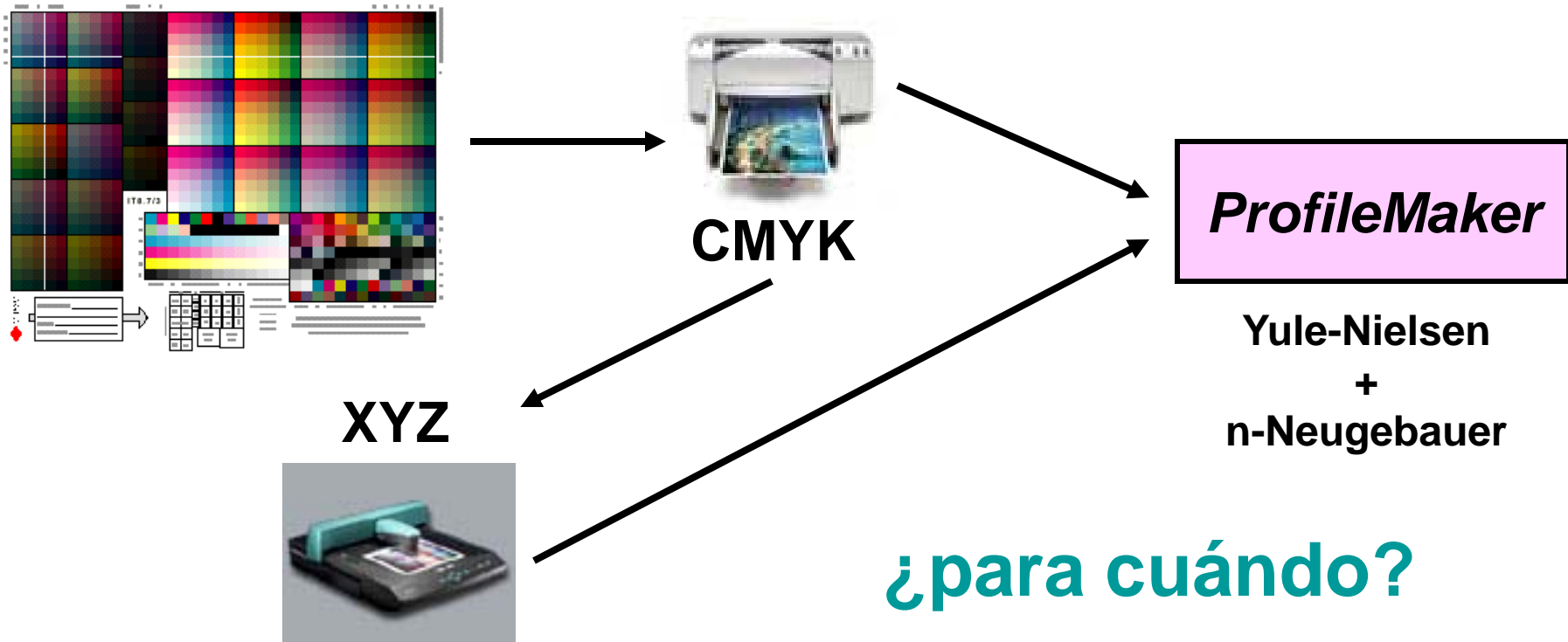
# Dispositivos de impresión

- Esquema de obtención del perfil vía CLUTs:



# Dispositivos de impresión

- Según modelos de mezcla de impresión tramada:





**Y eso es todo, muchas gracias**

Verdu@ua.es