

Visualización de la Información

Maestría en Explotación de Datos y Descubrimiento del Conocimiento

Clase teórica 2: Color – Espacios Cromáticos - Paletas

Claudio Delrieux – cad@uns.edu.ar

Laboratorio de Ciencias de las Imágenes – www.imaglabs.org

Universidad Nacional del Sur – www.uns.edu.ar

Emmanuel Iarussi - earussi@conicet.gov.ar

FRBA UTN - CONICET

EL COLOR: Definiciones

El color es un atributo perceptual (no existe en la “realidad”) y obedece a una serie de fenómenos complejos, físicos (objetivos) y fisiológicos (subjetivos).

Entre los primeros, se cuentan la generación de luz (iluminantes) y la reflexión. Entre los segundos, la sensación cromática, y la percepción.

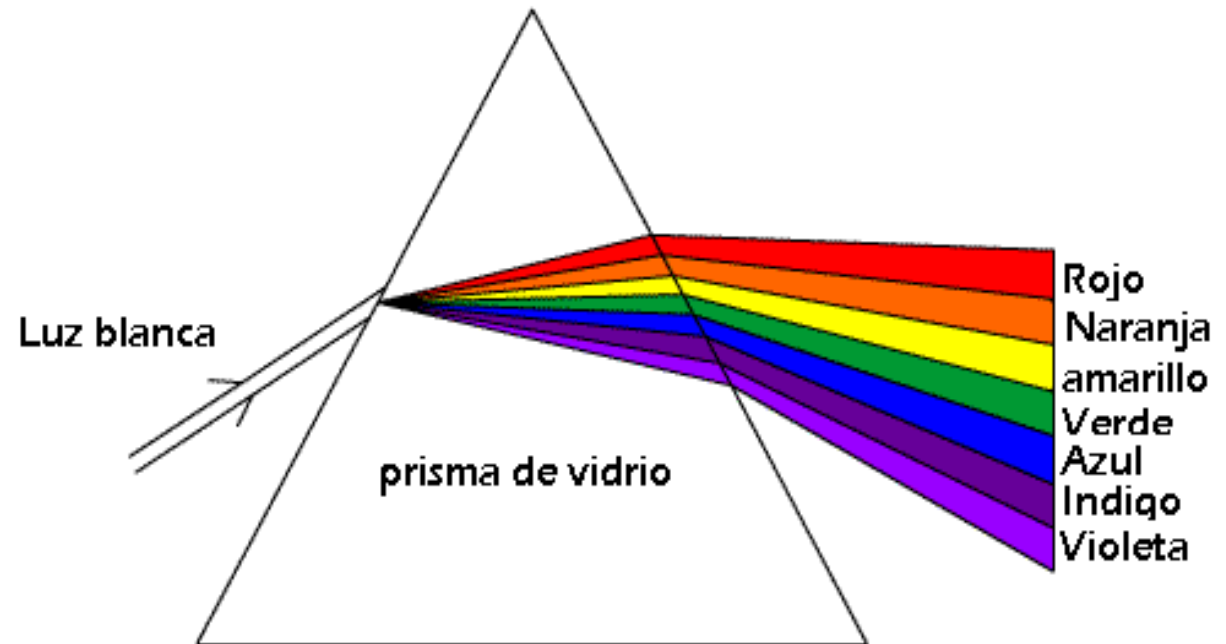
Iluminante => objeto => estímulo => sensación => percepción

EL COLOR: Definiciones

Todos conocemos que los dispositivos de reproducción de imágenes (monitores, TV, etc.) utilizan el “espacio cromático” RGB. Cada posible estímulo cromático (“color”) puede reproducirse con una combinación de esos tres colores primarios.

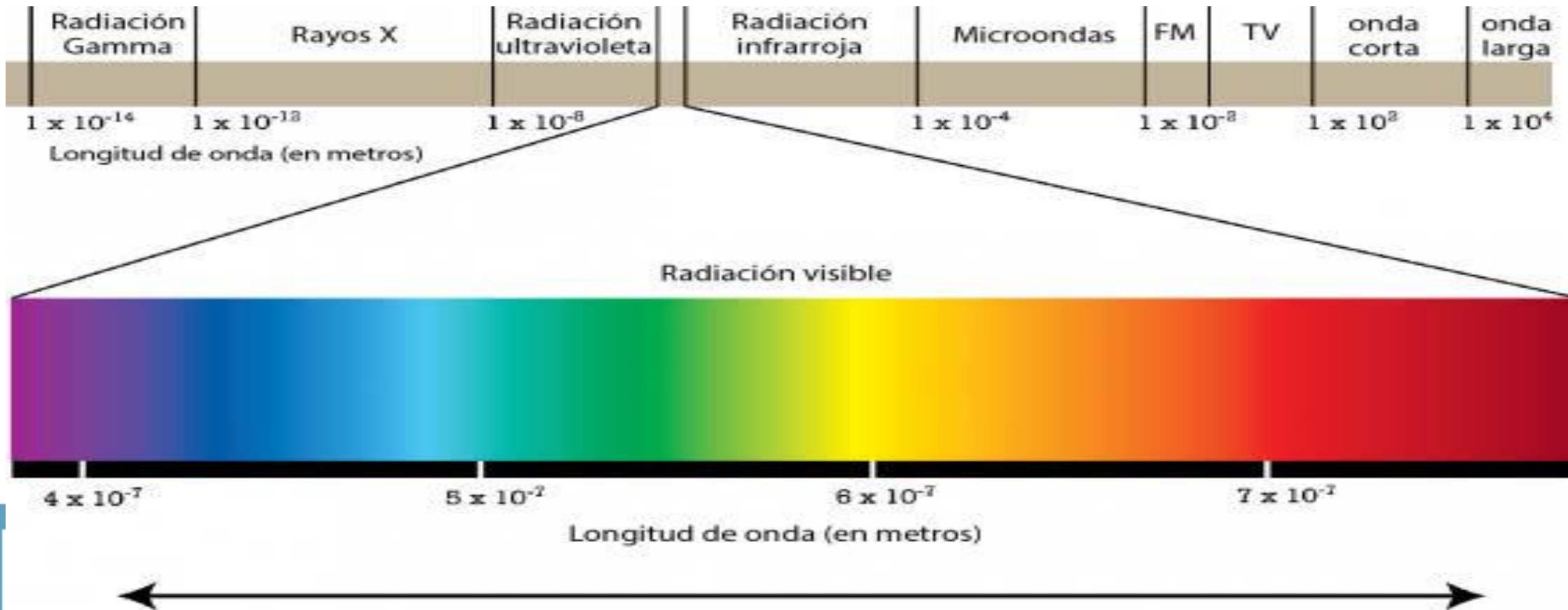
Por otro lado, todos conocemos la experiencia del prisma de Newton y que la luz contiene un sinnúmero de colores.

Cómo pueden ambas cosas ser posibles?



EL COLOR: Campo electromagnético

La luz visible es parte (muy pequeña!) de un fenómeno más abarcativo, conocido como *electromagnetismo*, que nos acompaña en la vida diaria en muchos aspectos: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiación_electromagnética



EL COLOR: Campo electromagnético

Las ondas electromagnéticas pueden caracterizarse por un único parámetro, la frecuencia, o bien la longitud de onda (dado que ambos están relacionados por la velocidad de la luz). La luz visible tiene una longitud de onda entre 380 y 730 nanómetros (milimillonésimas de metro), lo cual hace que los fotones puedan interactuar con los pigmentos ubicados en la retina y de esa forma generar un estímulo perceptible. <https://es.wikipedia.org/wiki/Color>

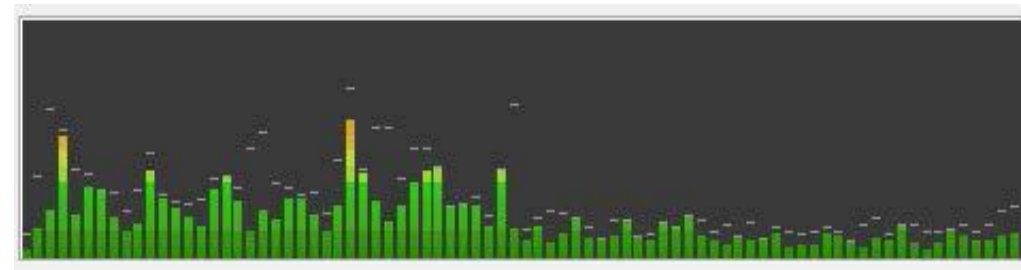
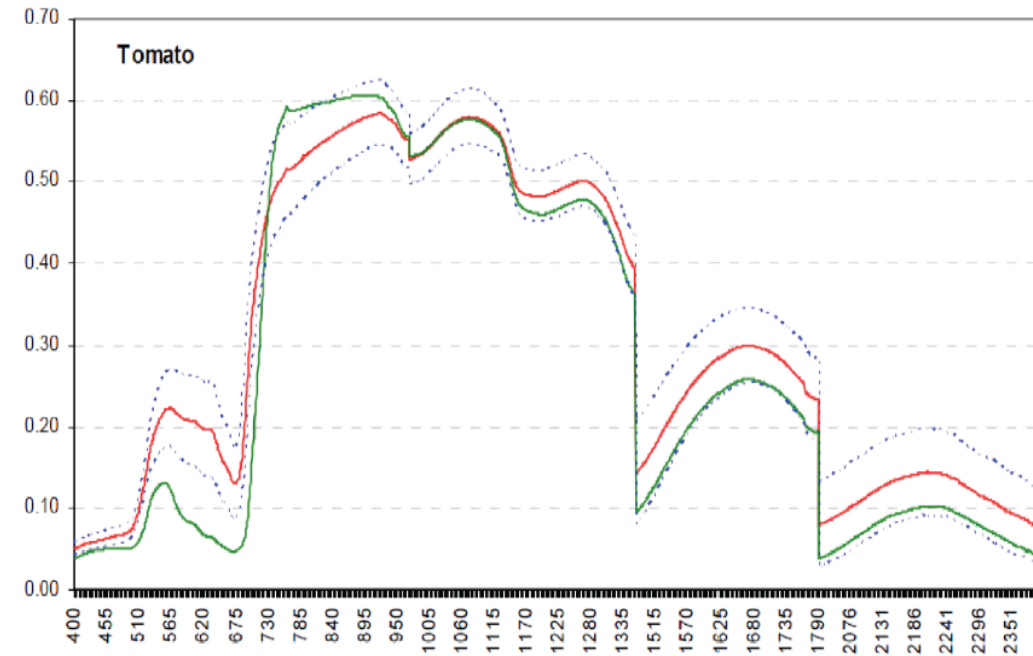


EL COLOR: Distribución espectral o espectro

Los diferentes objetos en el mundo emiten diferentes cantidades de energía a cada una de esas longitudes de onda, conocidas como distribuciones espectrales, o *espectros*. Vemos el espectro de diversos frutos de tomate.

Los espectros también se utilizan en música, como se muestra en analizador de espectros de un típico reproductor de audio.

https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_frecuencias



EL COLOR: La retina humana

De esa manera, el “color” con el cual se nos aparece un objeto, depende de la luz que lo ilumina, y de cómo ese objeto la refleja.

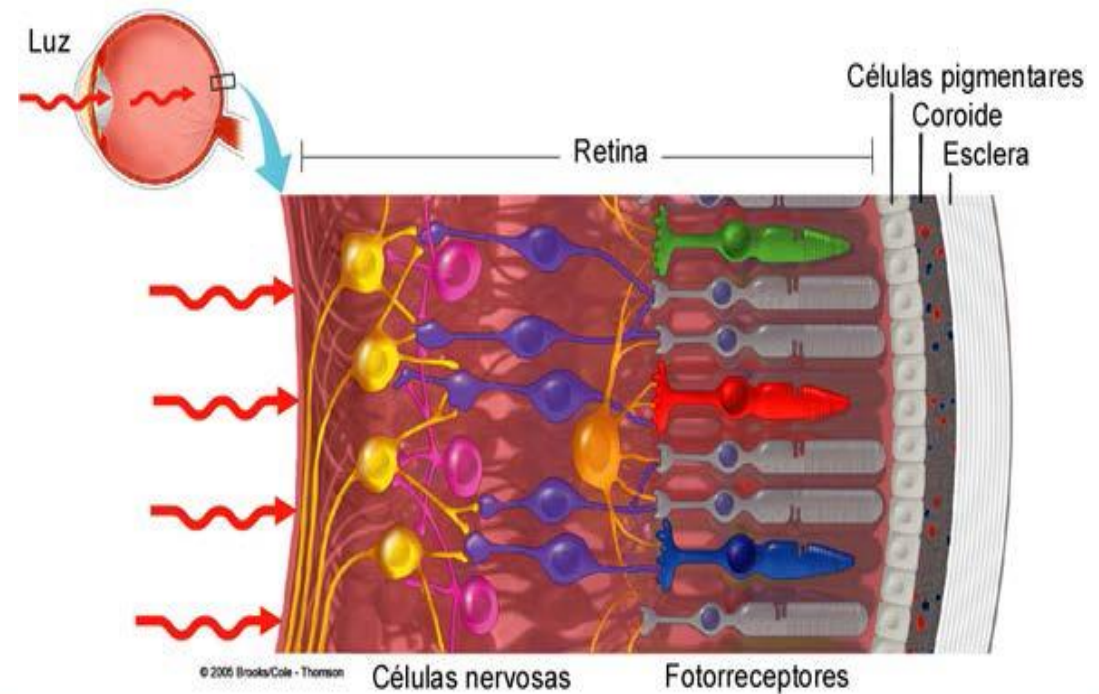
Por qué entonces si el espectro de la luz visible contiene “infinitos colores”, podemos representar cada color con solo tres valores RGB?

El hecho concreto que responde esta pregunta es que la retina humana contiene solamente tres tipos de receptores, cada uno sensible a una parte diferente del espectro, centrados aproximadamente en la zona del azul, el verde y el amarillo.

EL COLOR: La retina humana

En la figura se observa un ojo humano, y un detalle esquemático de la retina. Increíblemente los receptores están en la parte de atrás de la misma. Cada receptor cromático (conos) está pintado del color aproximado (el del amarillo está en rojo, después veremos por qué).

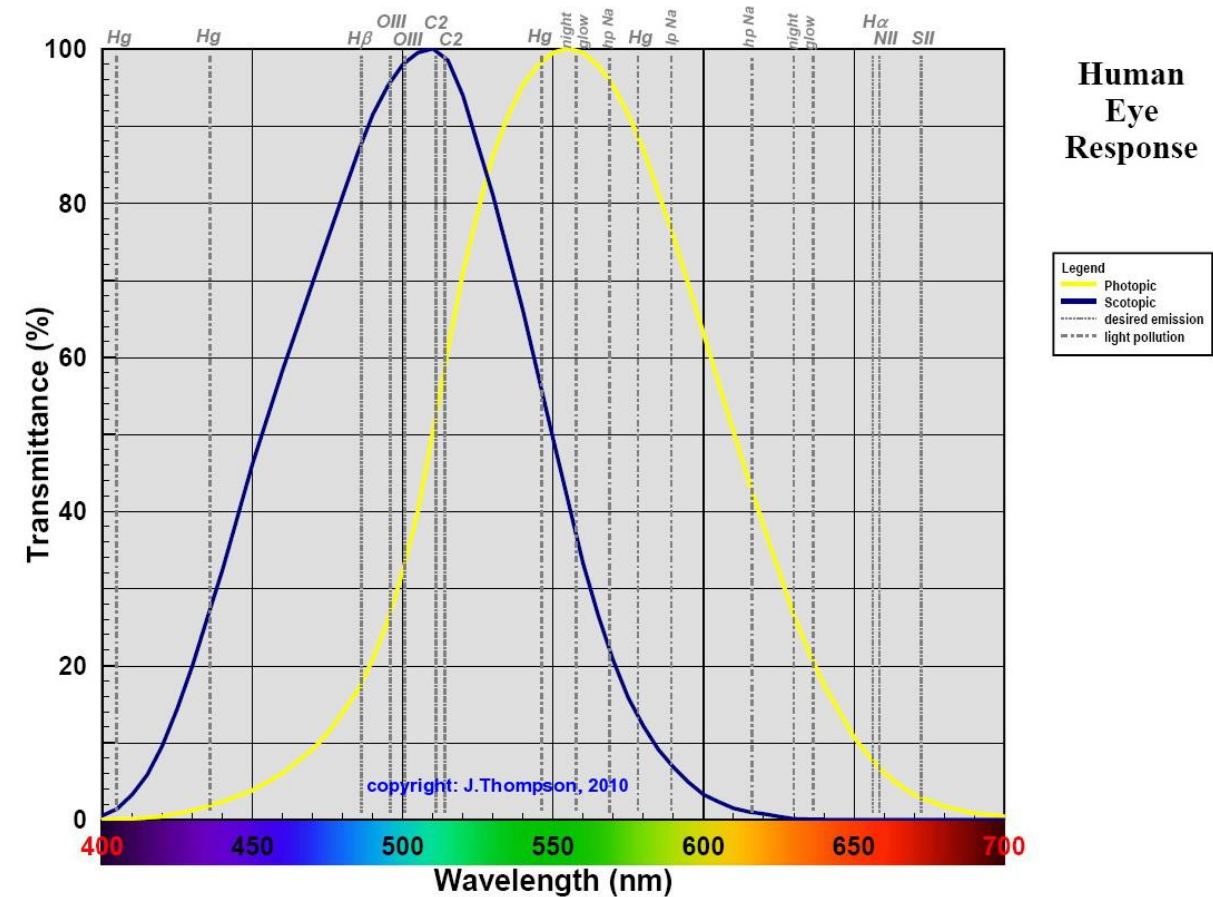
Hay además receptores acromáticos (bastones) que funcionan en condiciones de muy poca iluminación.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Retina>



EL COLOR: La retina humana

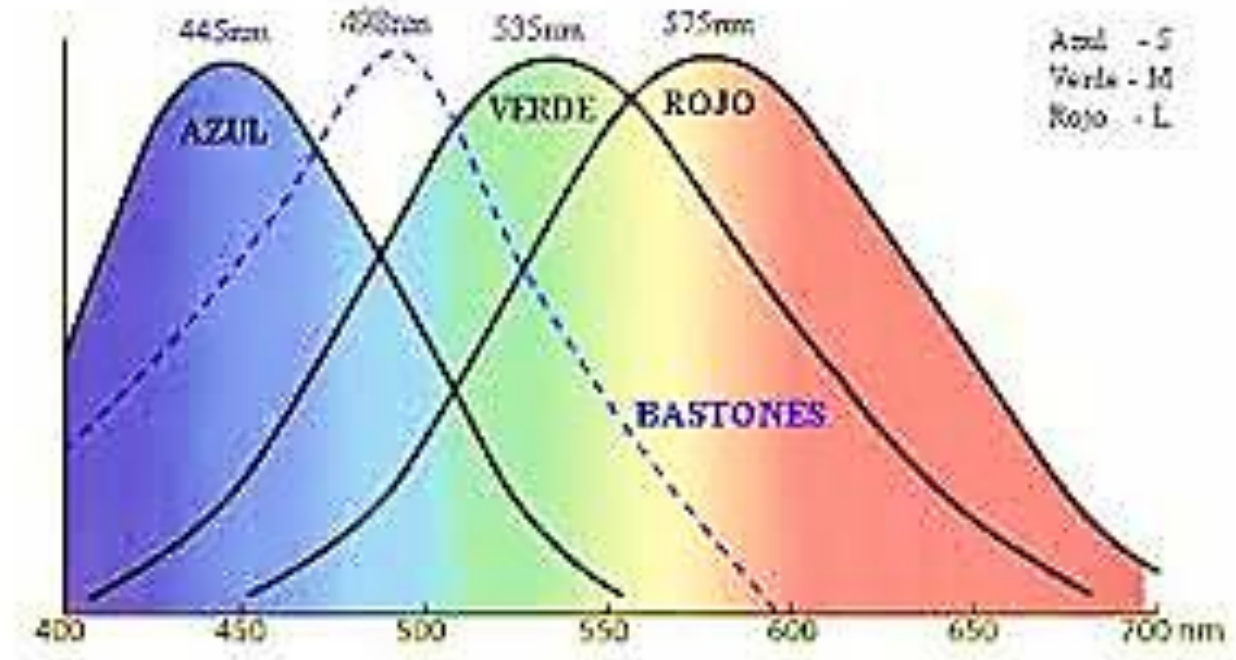
La figura muestra las curvas de sensibilidad normalizada de la visión fotópica (normal, basada en los conos, cromática) y la visión escotópica.

La sensibilidad fotópica depende de la acción combinada de los tres tipos de conos.



EL COLOR: La retina humana

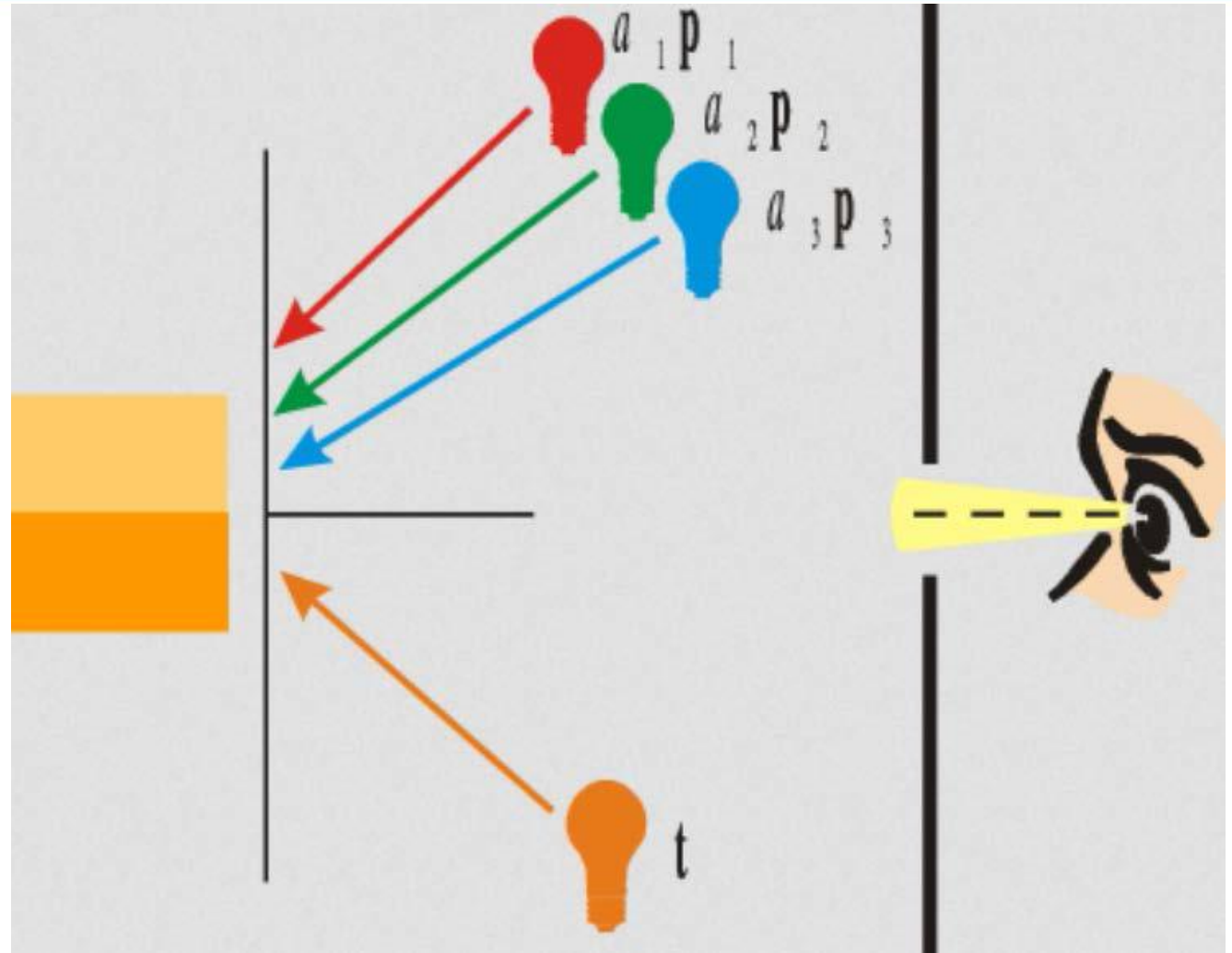
La figura muestra en forma muy idealizada las curvas de sensibilidad de cada tipo de cono (visión fotópica, ubicados mayormente en la fovea), así como la de los bastones (visión escotópica, ubicados en forma uniforme en toda la retina).



https://es.wikipedia.org/wiki/Percepci3n_del_color

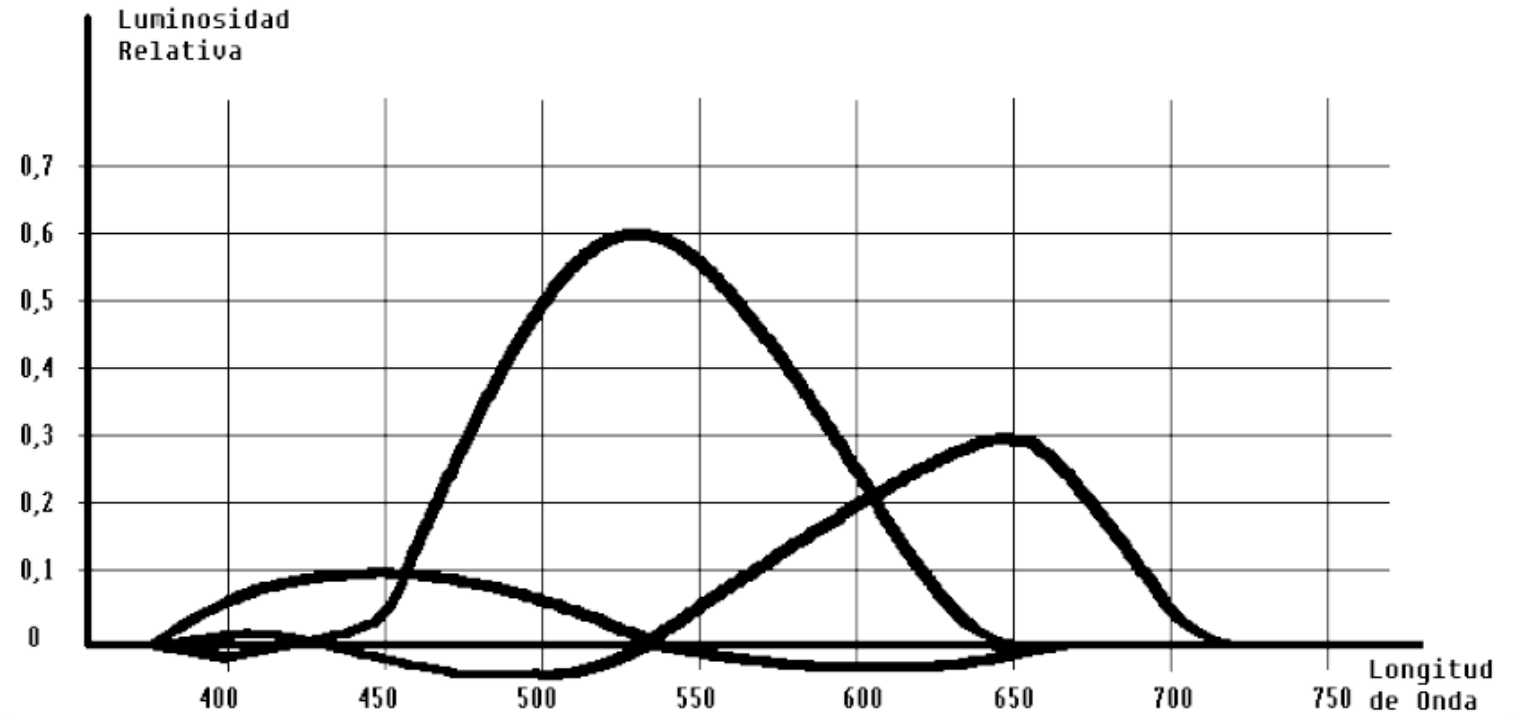
EL COLOR: La retina humana

Sin embargo, cuando se intentó utilizar la sensibilidad de cada receptor para la síntesis aditiva (o “ecualización”) de colores, el resultado fue insatisfactorio.



EL COLOR: La retina humana

Un análisis más detallado del comportamiento de los receptores muestra que éstos tienen “respuesta negativa” (inhibidora) en algunas partes del espectro visible, y que sus sensibilidades relativas son diferentes.



EL COLOR: La retina humana

Mirar 10 segundos al punto negro en la imagen antes de pasar a la próxima.



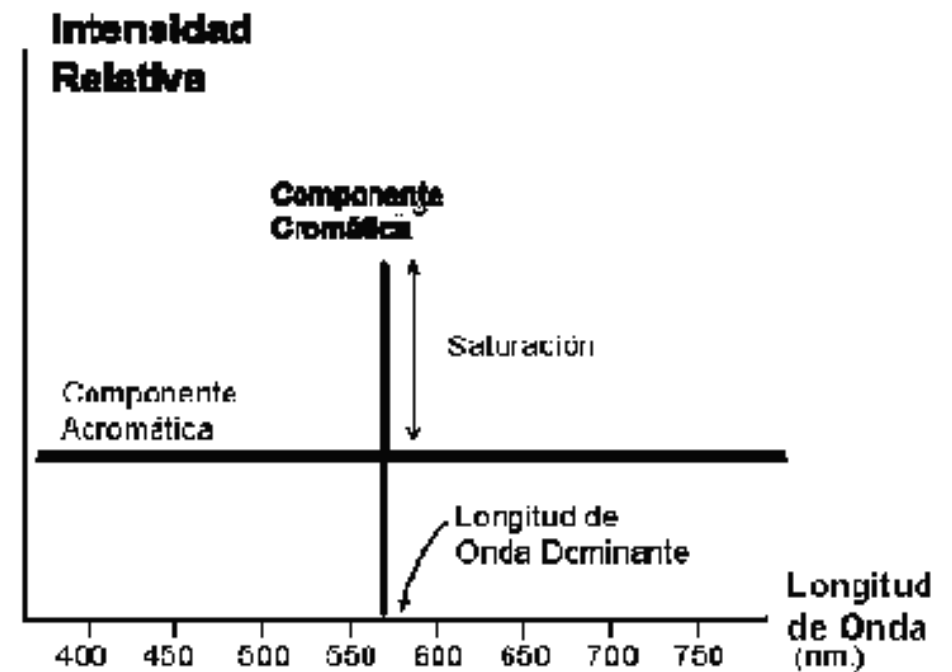
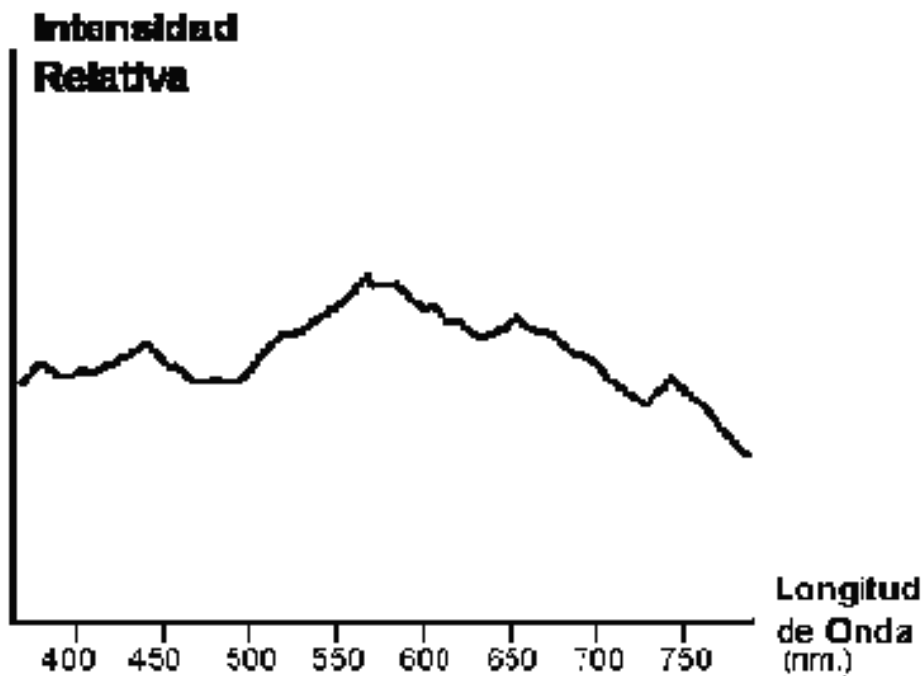
EL COLOR: La retina humana

La imagen ahora parece de color, hasta que pestañamos.



EL COLOR: Metamerismo

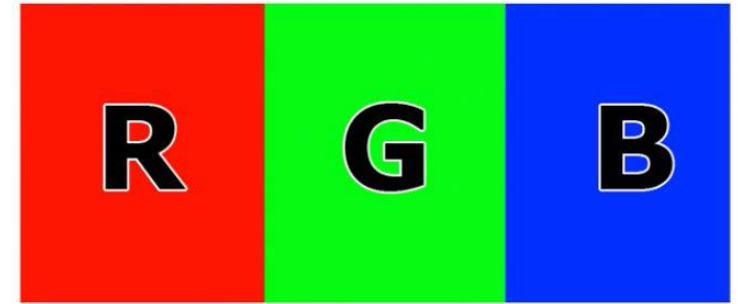
Cada estímulo se caracteriza por su **espectro** o radiancia espectral, pero es percibido solo con tres parámetros. Este fenómeno se denomina **metamerismo**.



EL COLOR: Metamerismo

El metamerismo explica por qué es posible un espacio cromático como el RGB, en el cual colores como el amarillo o el cyan no existen, pero el ojo humano los percibe igualmente.

Sin embargo, el espacio RGB no permite reproducir a la perfección TODOS los colores visibles por el ser humano. Esto se debe a que en algunas longitudes de onda los receptores producen estímulos inhibidores, lo cual no puede ser físicamente reproducido.



EL COLOR: Metamerismo

Todo espectro es percibido con un equivalente, que consta de dos funciones, una constante (componente acromática) y otra impulsiva (componente cromática).

Las magnitudes perceptuales se derivan inmediatamente de estas dos funciones:

Luminancia (intensidad): la energía de ambas componentes sumadas.

Saturación (pureza): la relación entre la energía cromática y energía total.

Crominancia (“color”): la longitud de onda dominante.

Este último caso es correcto solo con los colores espectrales (los no espectrales requieren la ficción de longitudes de onda negativas).

ESPACIOS CROMÁTICOS

Una vez que la sensación cromática quedó determinada como magnitud de tres dimensiones, surgió la idea de organizarla en un **espacio cromático**.

Uno de los enfoques, basado en la fisiología, es utilizar la sensibilidad de cada receptor como eje. Los colores “imaginarios” X, Y, Z son definidos indirectamente a partir de las curvas vistas arriba.

Son “imaginarios” porque ninguna distribución espectral real puede afectar a uno solo de los receptores solamente (para ello haría falta “energía negativa”).

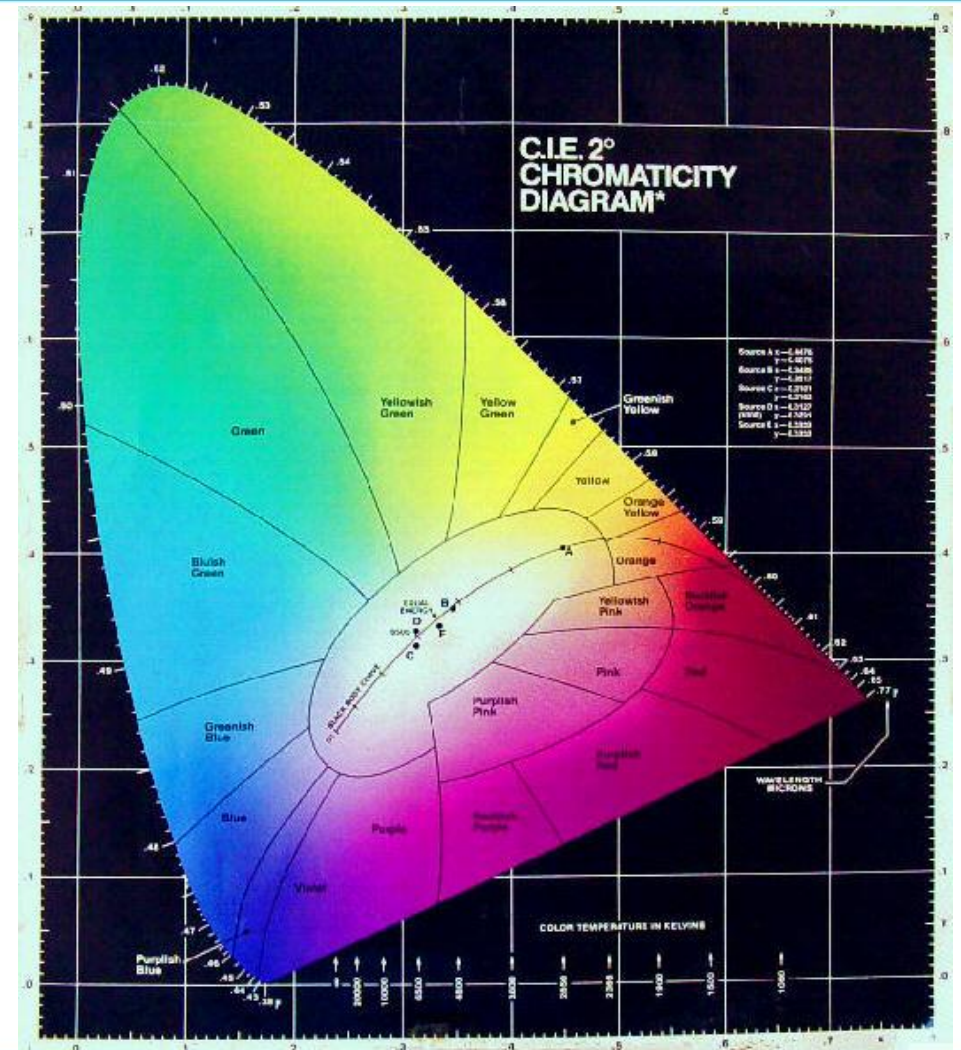
ESPACIOS CROMÁTICOS: Diagrama CIE de cromaticidades

El espacio XYZ aprovecha la respuesta (casi) lineal del ojo, y es por lo tanto un espacio vectorial.

El diagrama de la derecha representa un corte de dicho espacio a misma norma (energía), p.ej. $X+Y+Z=1$.

Cualquier corte similar contiene todas las **cromaticidades** (combinaciones de crominancia y saturación) posibles.

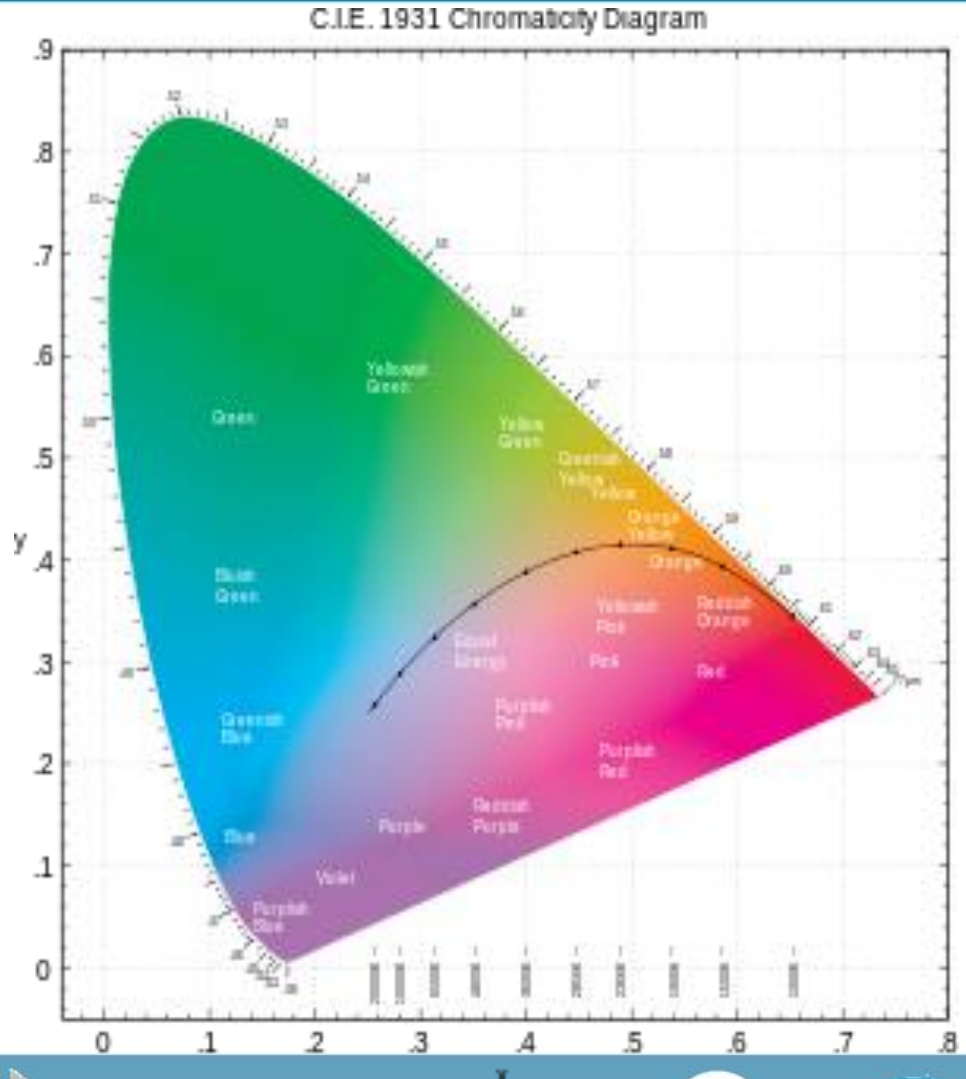
https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_de_color_CIE_1931



ESPACIOS CROMÁTICOS: Diagrama CIE de cromaticidades

El diagrama de cromaticidades posee varias propiedades:

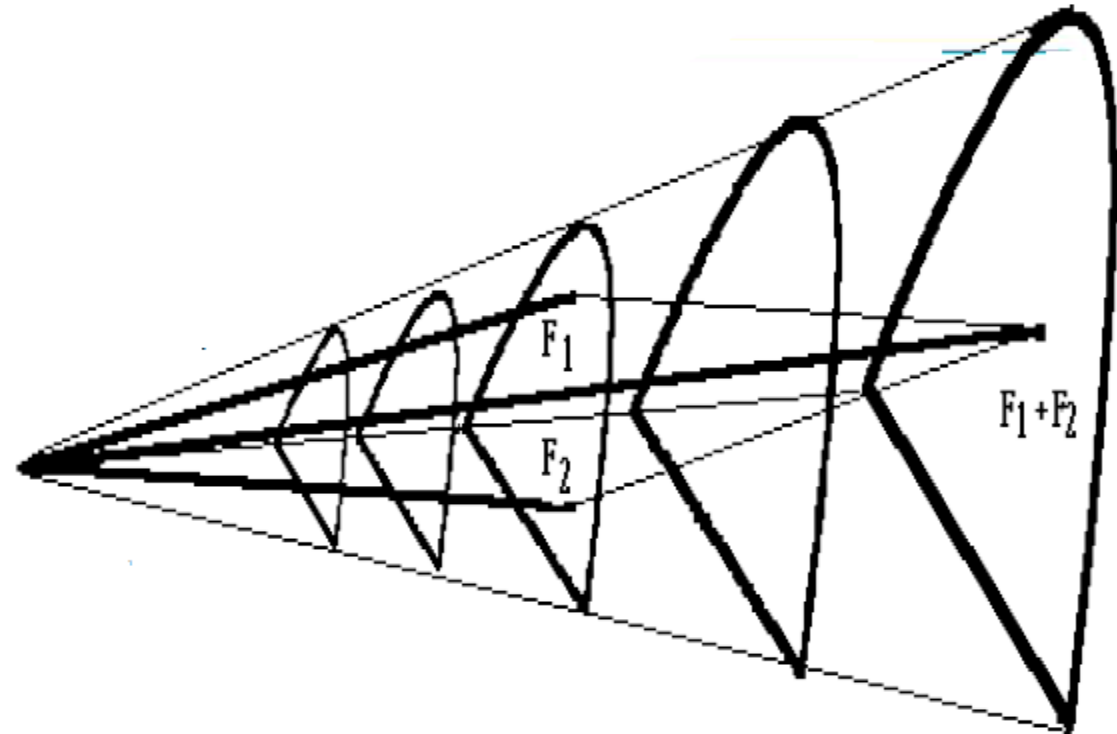
- Colores físicamente realizables
- Colores espectrales
- Radiación del cuerpo negro
- Combinaciones convexas
- Balance del «blanco»
- “Gama” (gamut)
- La cromaticidad es “circular”!!



ESPACIOS CROMÁTICOS: Diagrama CIE de cromaticidades

En realidad el diagrama anterior es una *proyección* del espacio XYZ 3D a un plano arbitrario, denominado *plano de cromaticidades*. El espacio 3D completo se intenta graficar con el diagrama al lado.

Un aspecto fundamental del espacio XYZ es que permite separar la cromaticidad de la intensidad luminosa o *luminancia*, lo cual explica por qué cuando subimos o bajamos el *brillo* de monitor o TV, la apariencia de los colores no cambia.

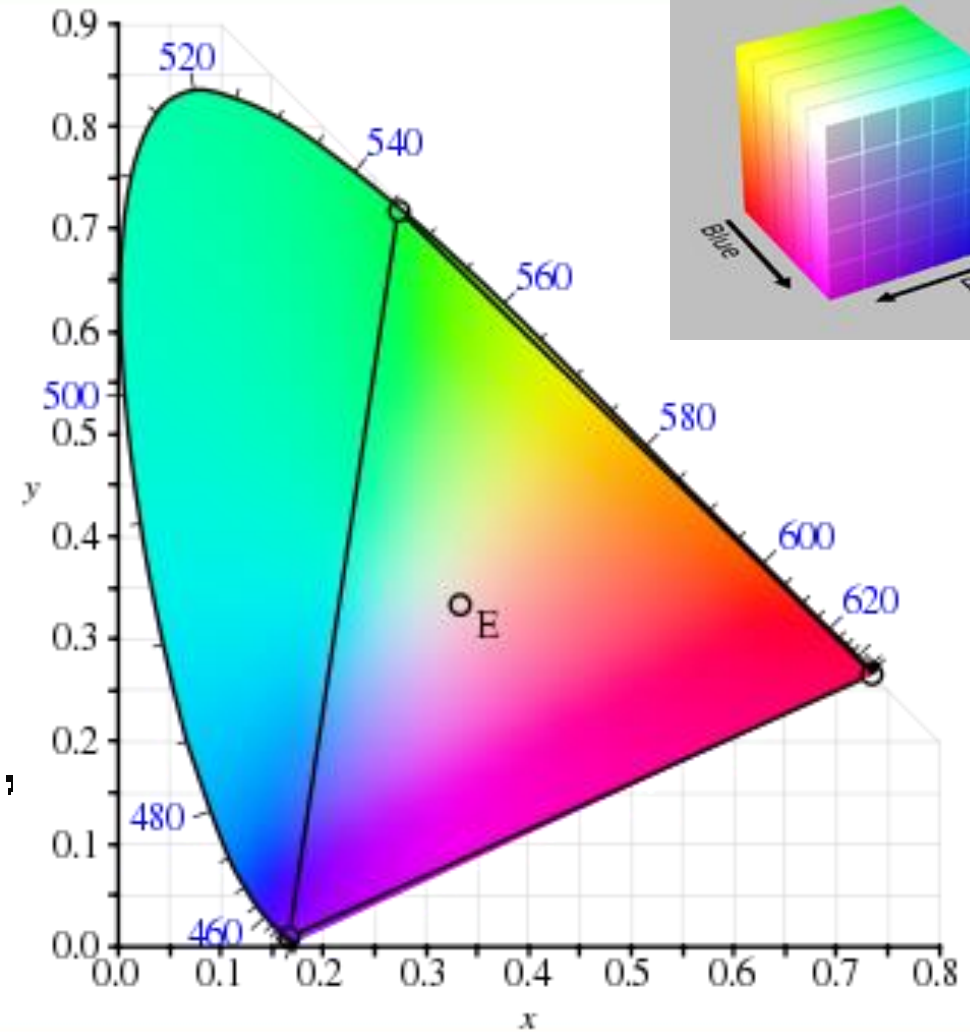


ESPACIOS CROMÁTICOS: Diagrama CIE de cromaticidades

El espacio RGB se obtiene generando tres puntos en XYZ que correspondan a las cromaticidades de los primarios en los monitores.

Se trata de una transformación lineal:

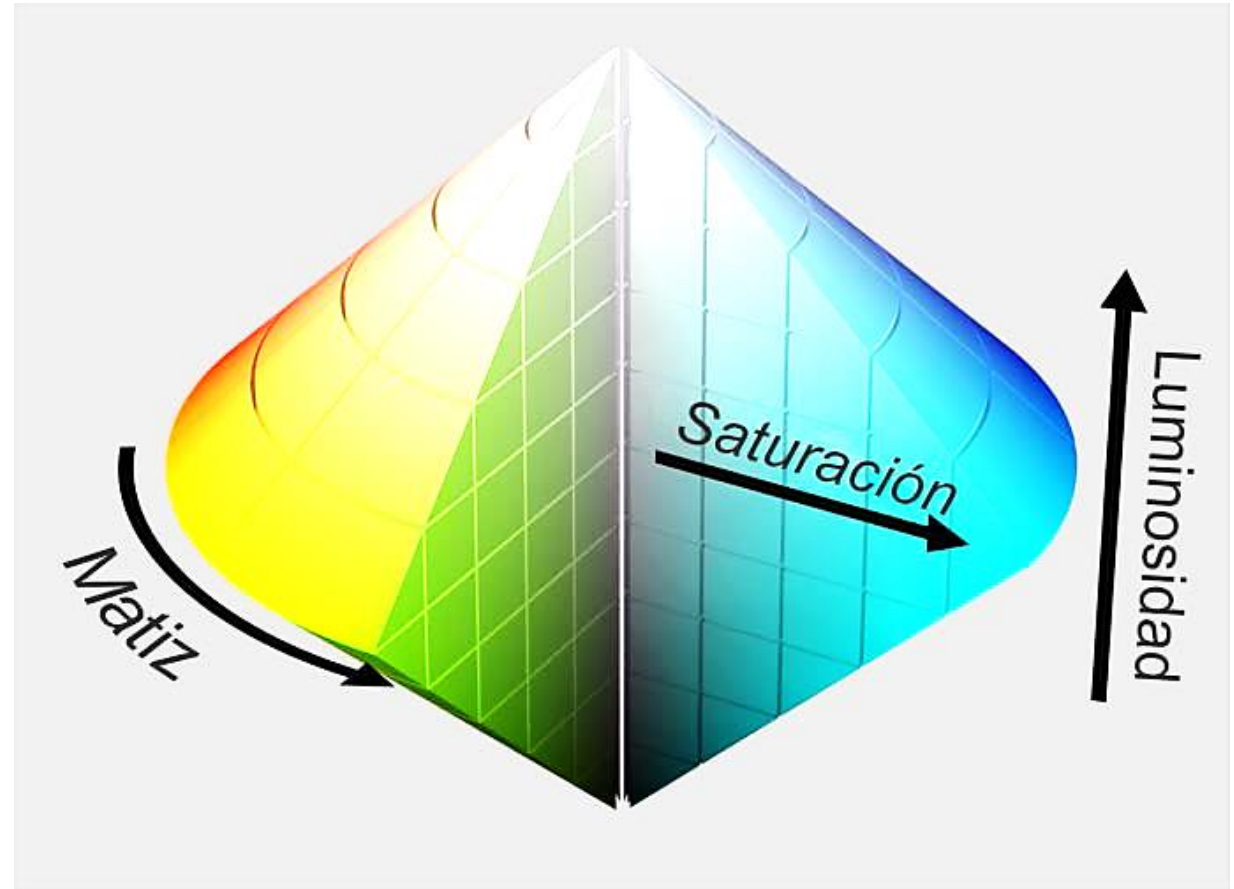
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41847 & -0.15866 & -0.082835 \\ -0.091169 & 0.25243 & 0.015708 \\ 0.00092090 & -0.0025498 & 0.17860 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix},$$



ESPACIOS CROMÁTICOS: Espacios perceptuales

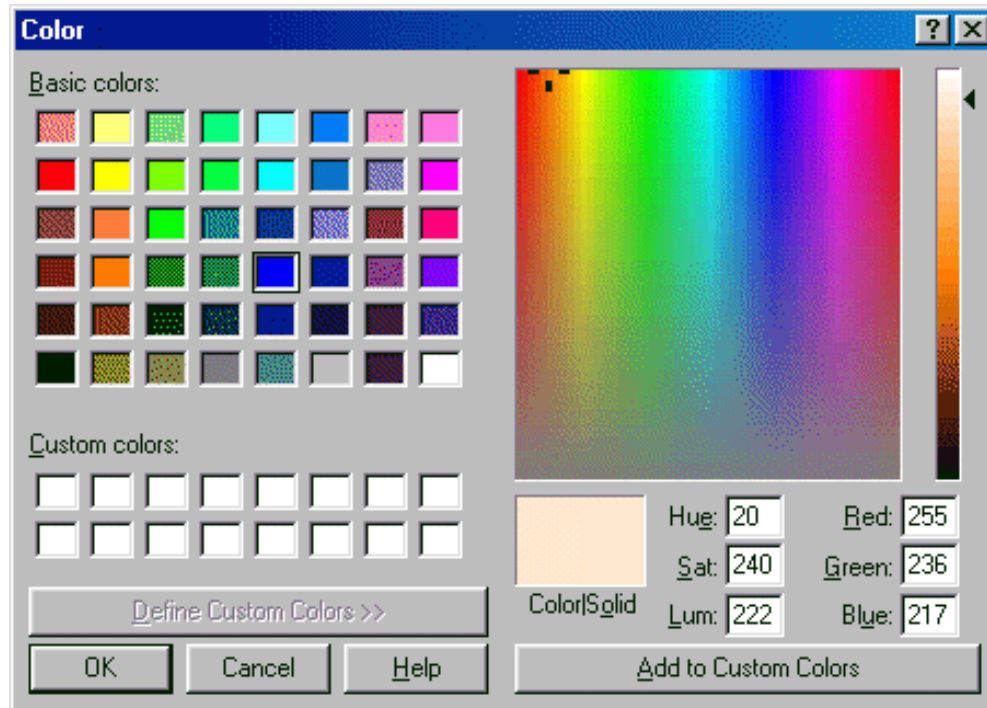
En diseño gráfico se requieren espacios menos “nerd”. Uno de ellos es el HSL (por Hue, Saturation, Luminance). La conversión de y a RGB es directa.

https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_color_HSL



ESPACIOS CROMÁTICOS: Más espacios

En artes visuales se utilizan otras formas de organizar los espacios cromáticos. Ver cuántos grados tiene el círculo en Microsoft!!

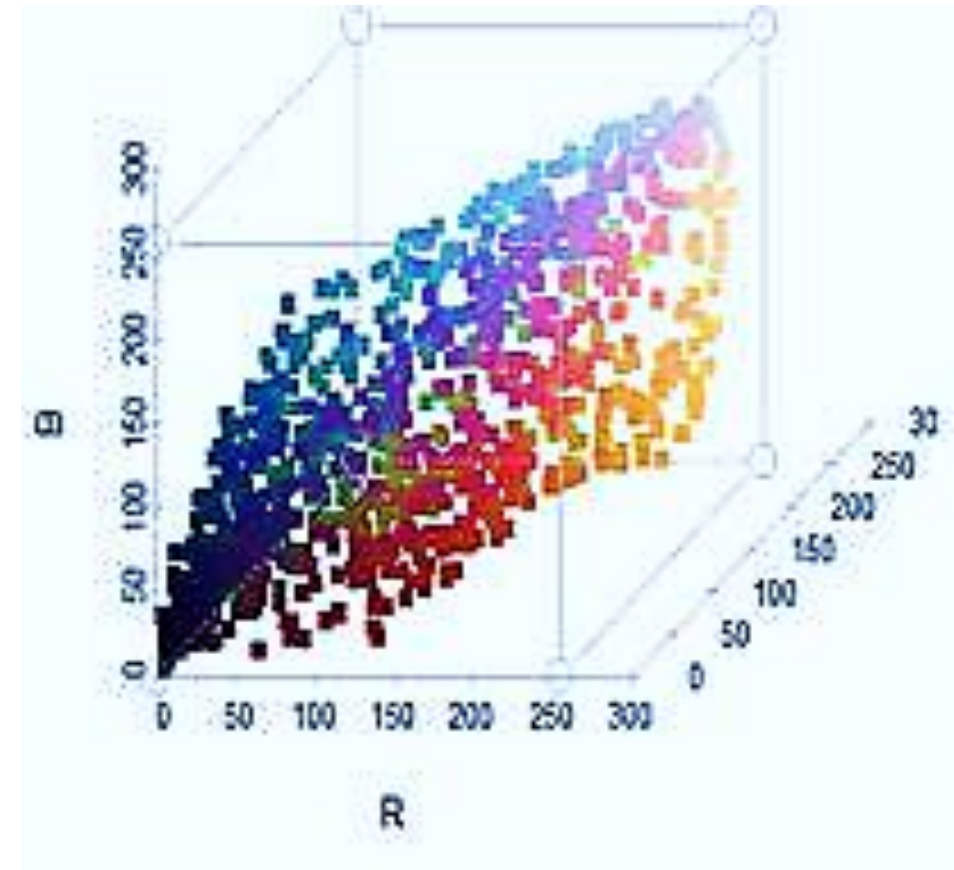


Círculo cromático “Bauhaus” (R. Arnheim)

ESPACIOS CROMÁTICOS: El espacio YIQ

Cómo se distribuye la frecuencia de ocurrencia de los diferentes estímulos cromáticos usuales en medios digitales?

Se observa que R, G y B tienen una correlación muy alta, por lo que es posible separar estos primarios en componentes principales.

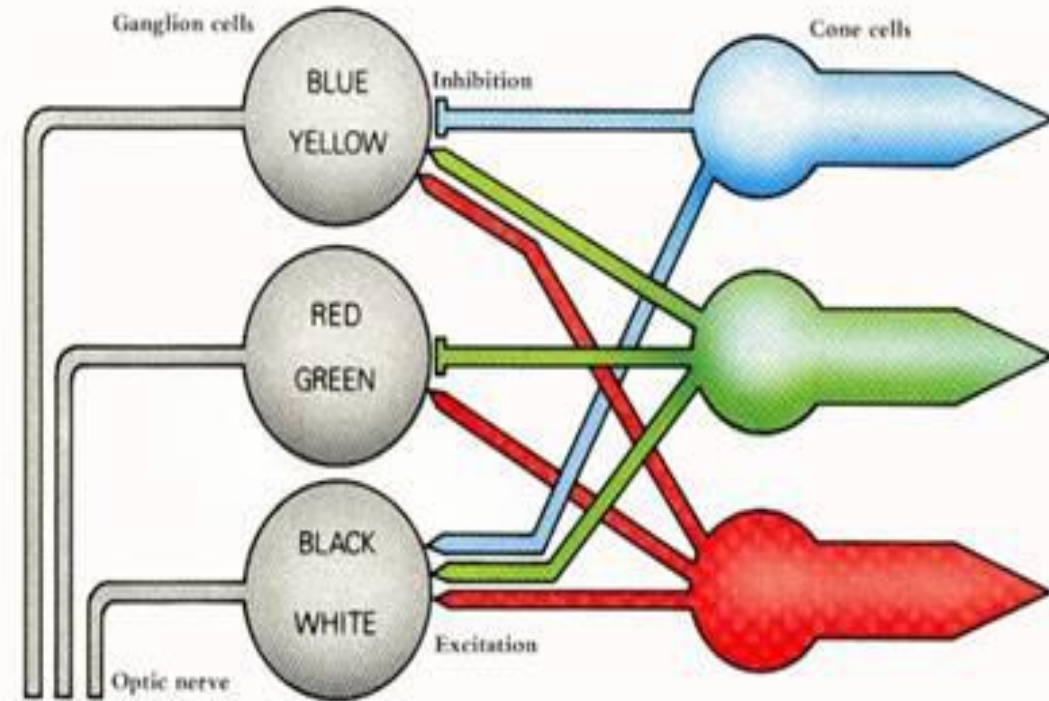


ESPACIOS CROMÁTICOS: El espacio YIQ

Esta separación coincide muy bien con los denominados “canales oponentes”:

En la misma retina se produce un procesamiento que combina los receptores en los canales oponentes **Luminancia, rojo-verde, y amarillo-azul.**

https://en.wikipedia.org/wiki/Opponent_process

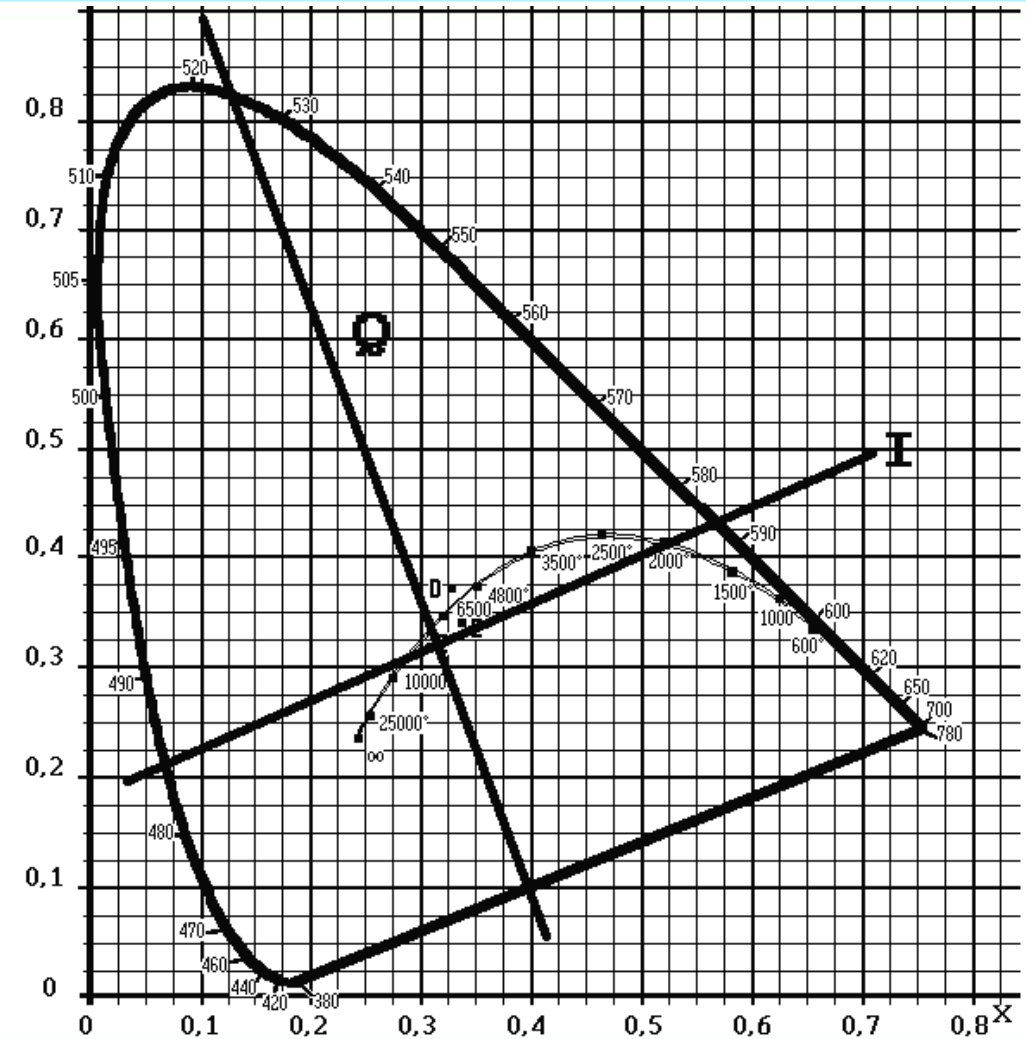


ESPACIOS CROMÁTICOS: El espacio YIQ

Los ejes fueron definidos por PCA respecto de la información que recibe el ojo, y aproximadamente coinciden con los canales oponentes.

También es un espacio lineal.

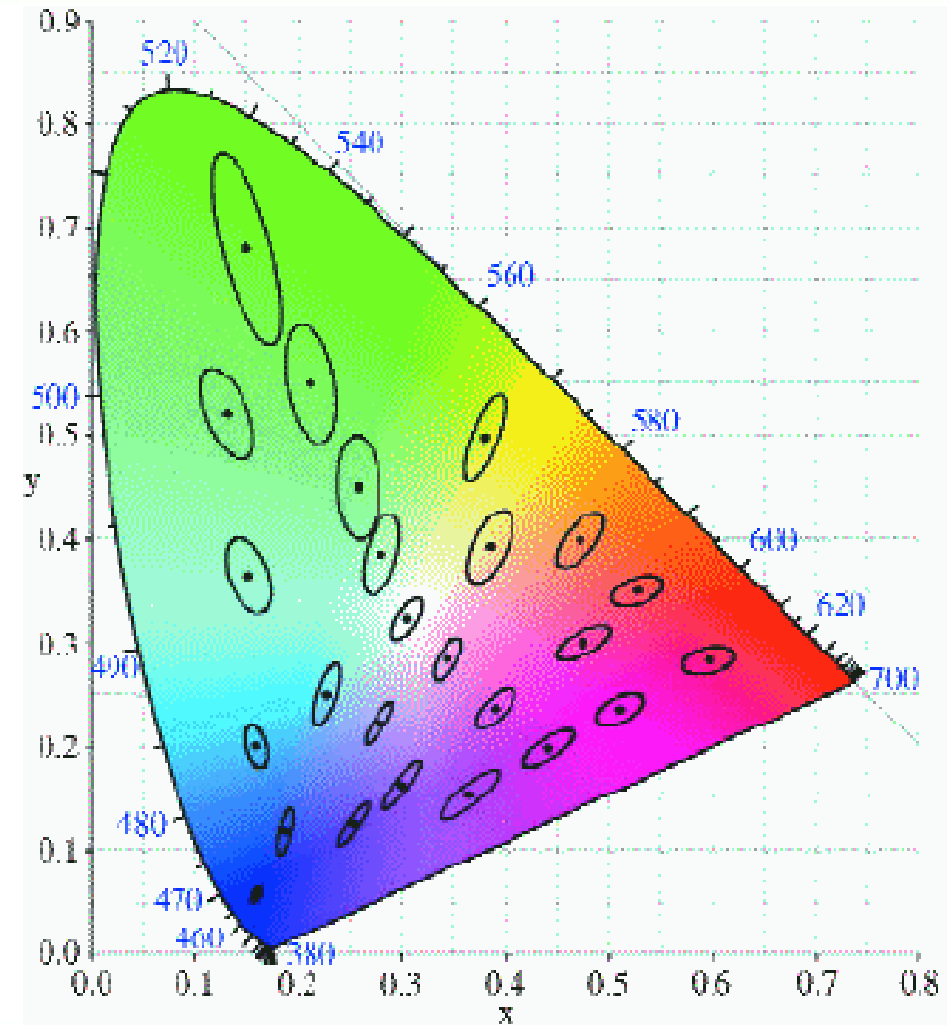
$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



ESPACIOS CROMÁTICOS: Espacios uniformes

Si bien el espacio YIQ separa la luminancia de la cromaticidad en ejes ortogonales, la distancia métrica entre dos estímulos distintos puede ser muy diferente a la distancia perceptual.

El diagrama a la derecha ilustra las “elipses de McAdams” que contienen los estímulos cromáticos a iguales distancias perceptuales de sus centros.

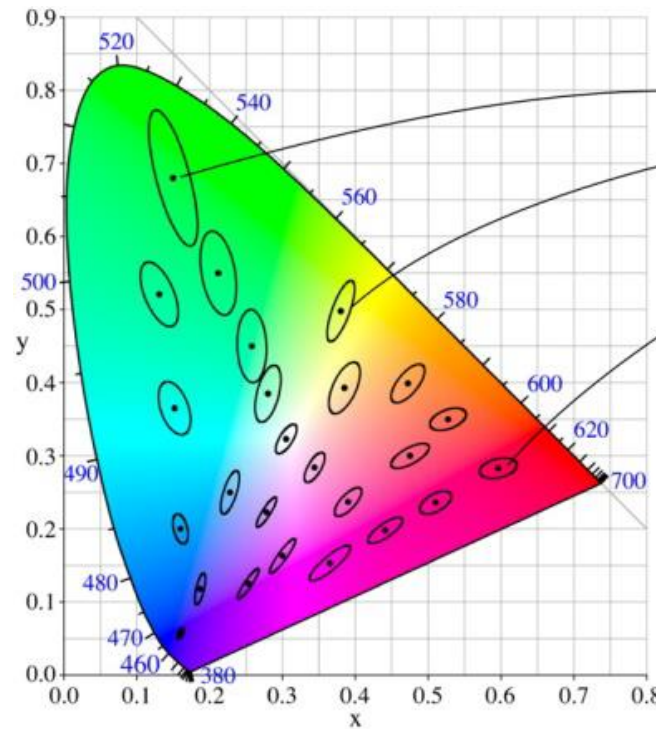


ESPACIOS CROMÁTICOS: Espacios uniformes

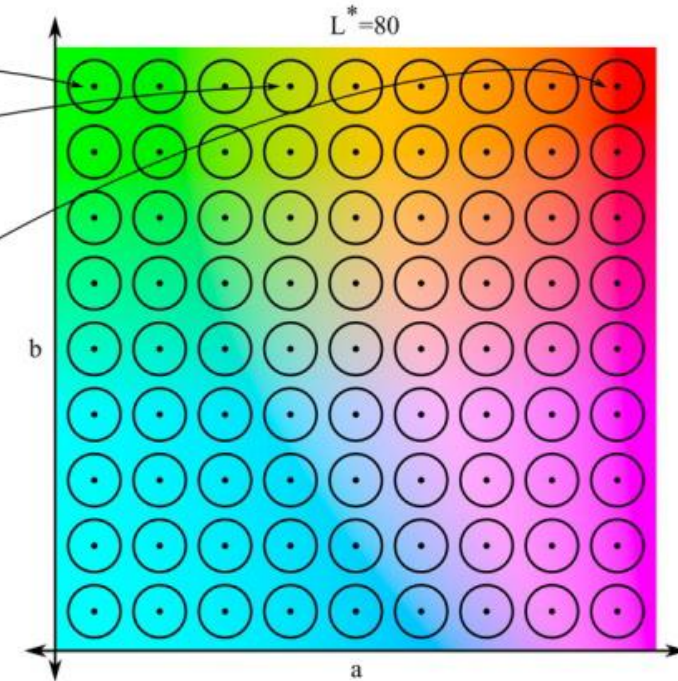
Para mitigar esta dificultad se han propuesto espacios cromáticos que intentan uniformar la distancia métrica con la perceptual.

Entre ellos el más utilizado es el $L^*a^*b^*$ (CIE 1976).

Otros “primos” de este espacio son: Lab, Luv, $L^*u^*v^*$.



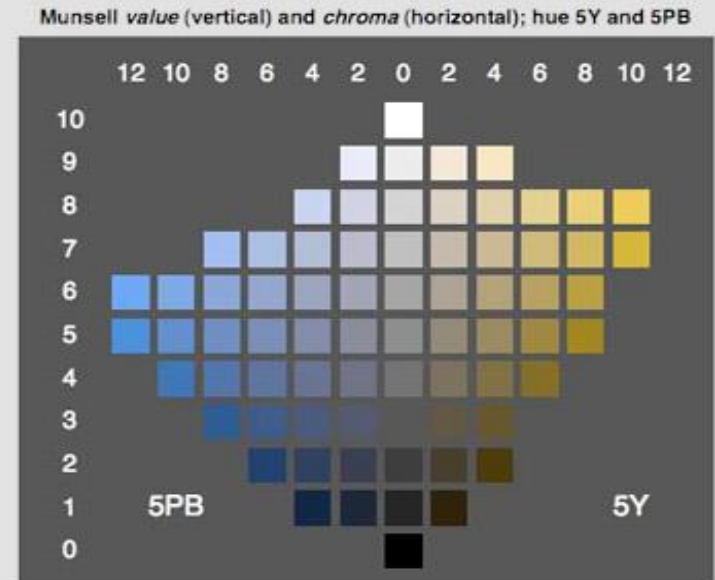
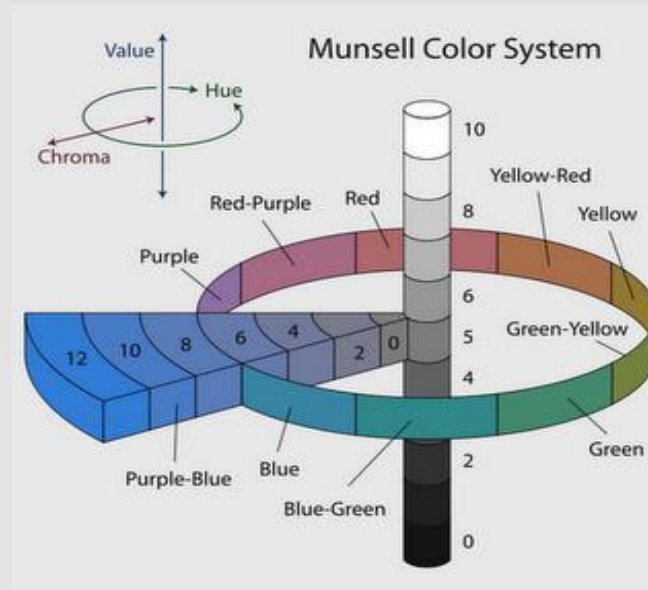
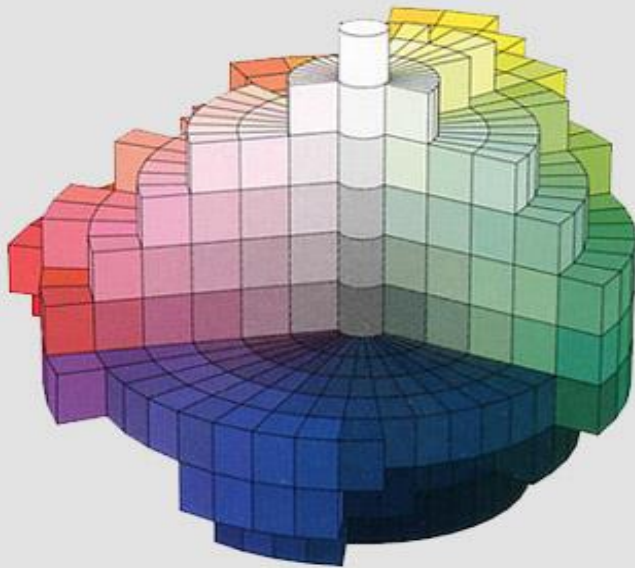
CIE 1931



CIELAB (CIE 1976 L^*,a^*,b^*)

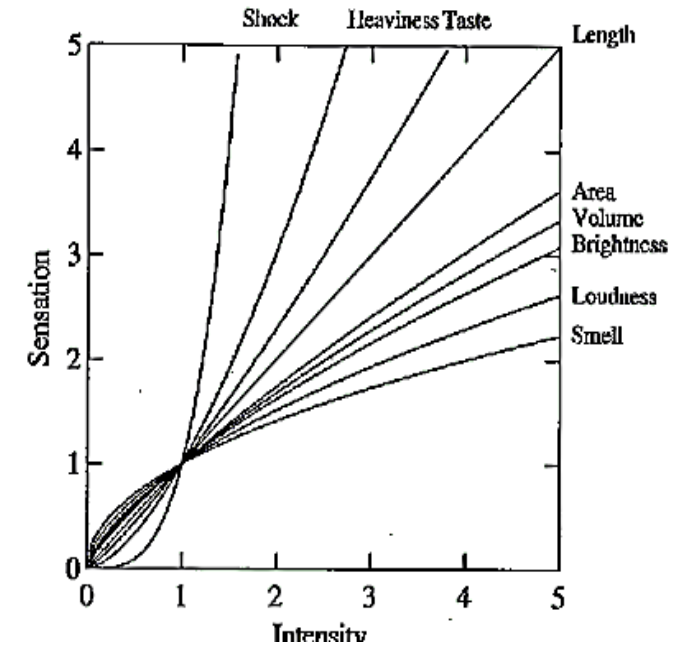
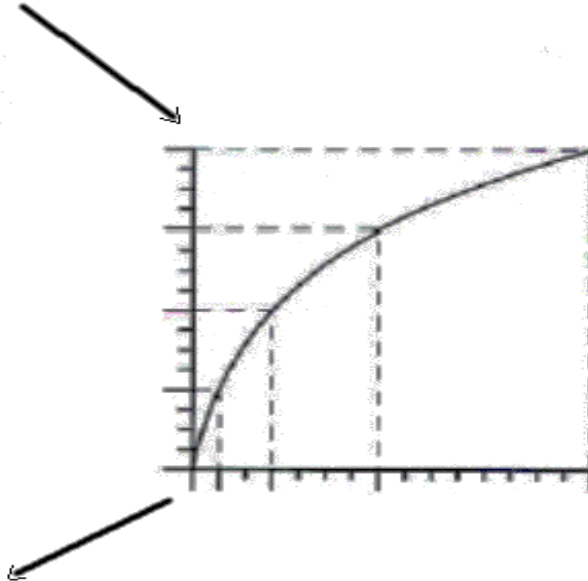
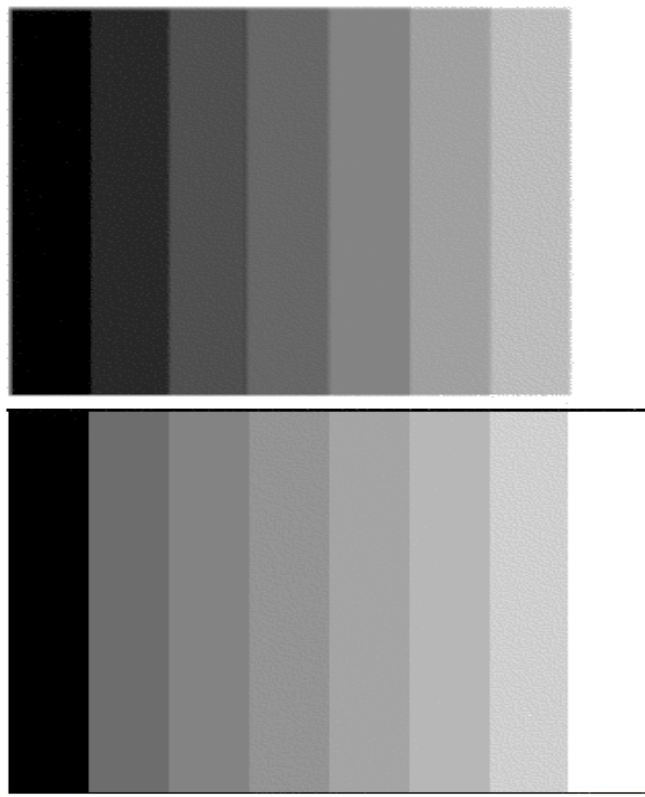
ESPACIOS CROMÁTICOS: Espacios de uso industrial

Es importante la especificación de colores en un contexto industrial. Para ello se definieron muchos espacios (algunos de ellos patentados), como por ejemplo el de Munsell, uno de los primeros en buscar un espacio perceptualmente uniforme.



PALETAS CROMÁTICAS: Respuesta logarítmica e inhibición lateral

La retina es capaz de acomodar estímulos visuales en rangos de luminosidad muy variados. Eso es facilitado por la respuesta logarítmica a la intensidad.

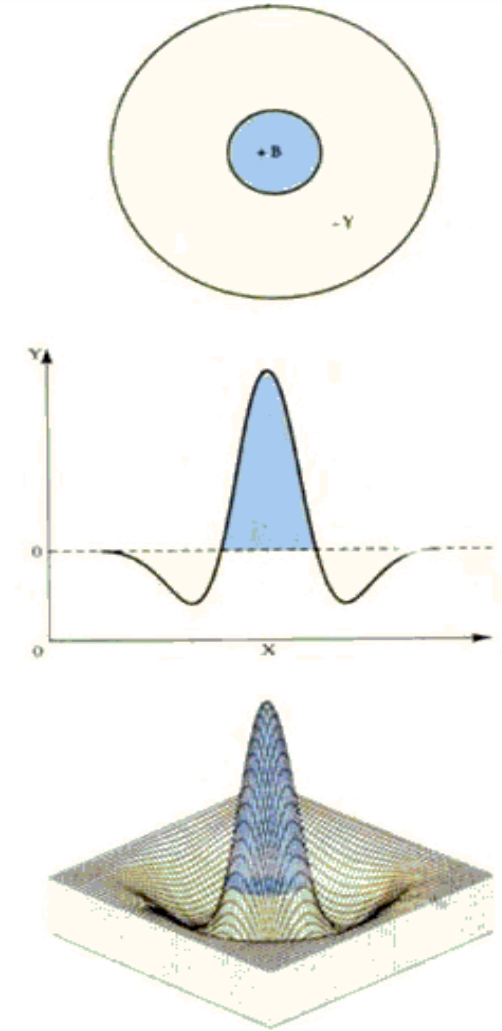


PALETAS CROMÁTICAS: Respuesta logarítmica e inhibición lateral

La transmisión de impulsos nerviosos se caracteriza por enviar una señal inhibidora (leve) a los vecinos cercanos.

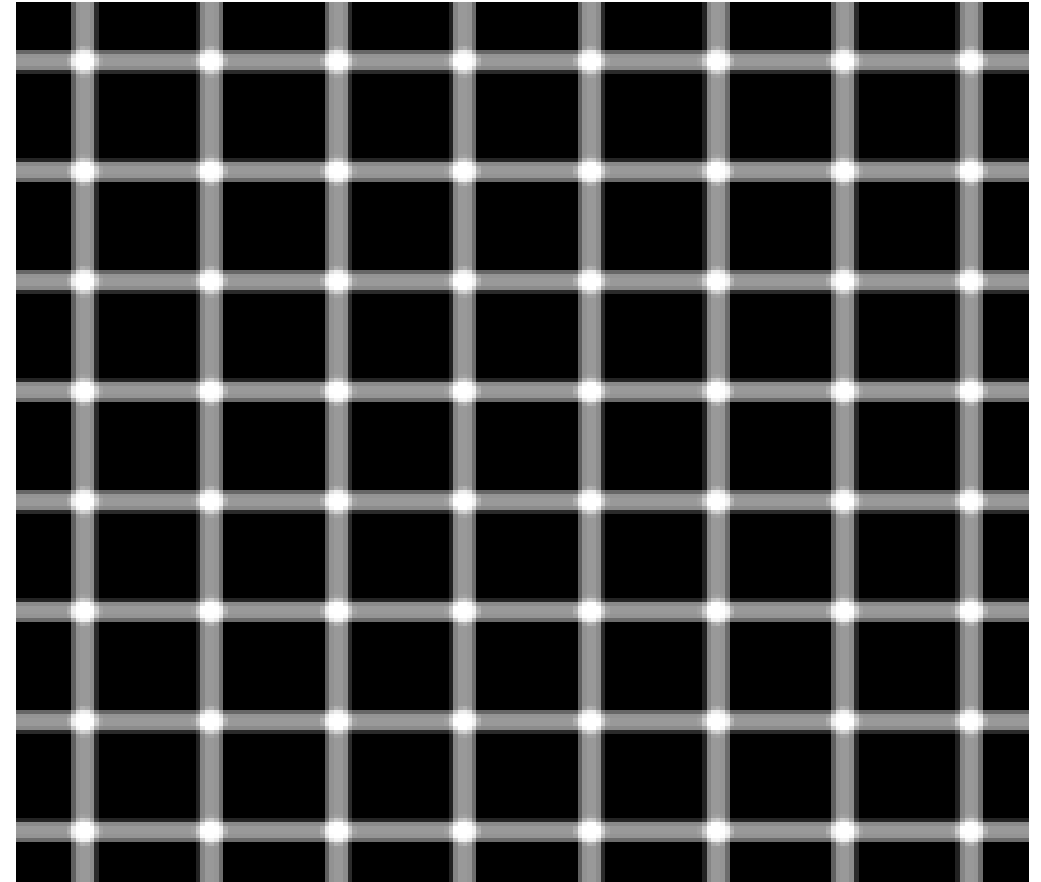
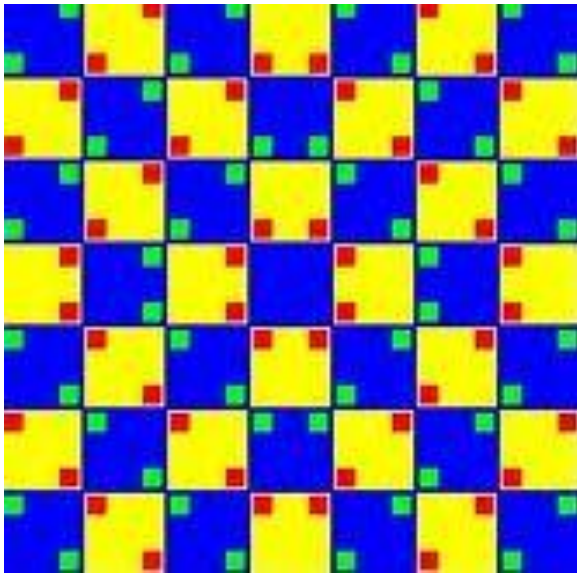
En el caso del nervio óptico, cada estímulo puntual que se transmite de puntos sensibles del ojo al cerebro, genera una inhibición lateral a la transmisión de los puntos vecinos.

Eso ocurre en los tres canales oponentes.



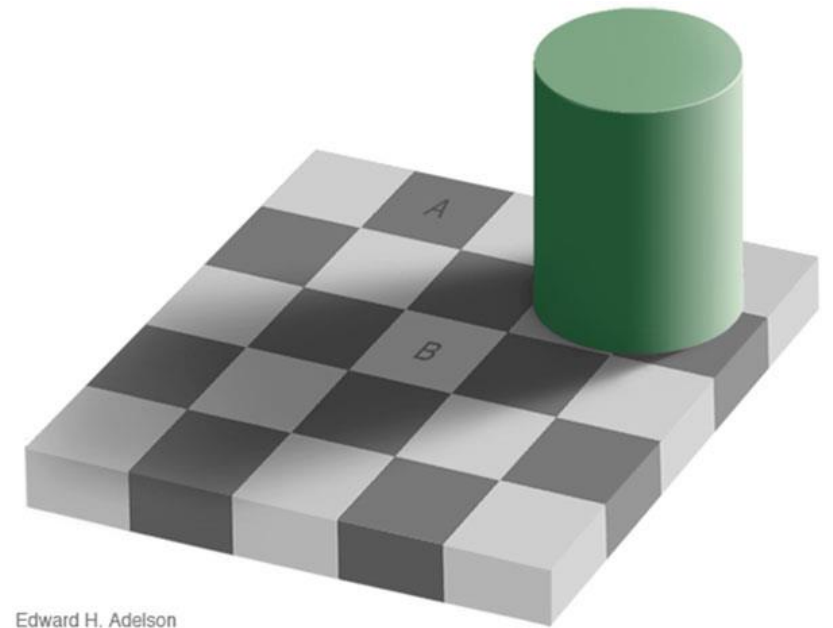
PALETAS CROMÁTICAS: Respuesta logarítmica e inhibición lateral

La inhibición lateral genera un sinnúmero de efectos “ilusiones ópticas” como la grilla de Hering (derecha) o la de Harding (abajo).



PALETAS CROMÁTICAS: Inhibición lateral y contraste simultáneo

Las paletas que mapean monótonicamente en intensidad (o en alguno de los canales oponentes) generan contraste simultáneo debido al fenómeno de la inhibición lateral. Esto además se conjuga con la influencia inconsciente de nuestra experiencia al organizar la percepción.



Edward H. Adelson

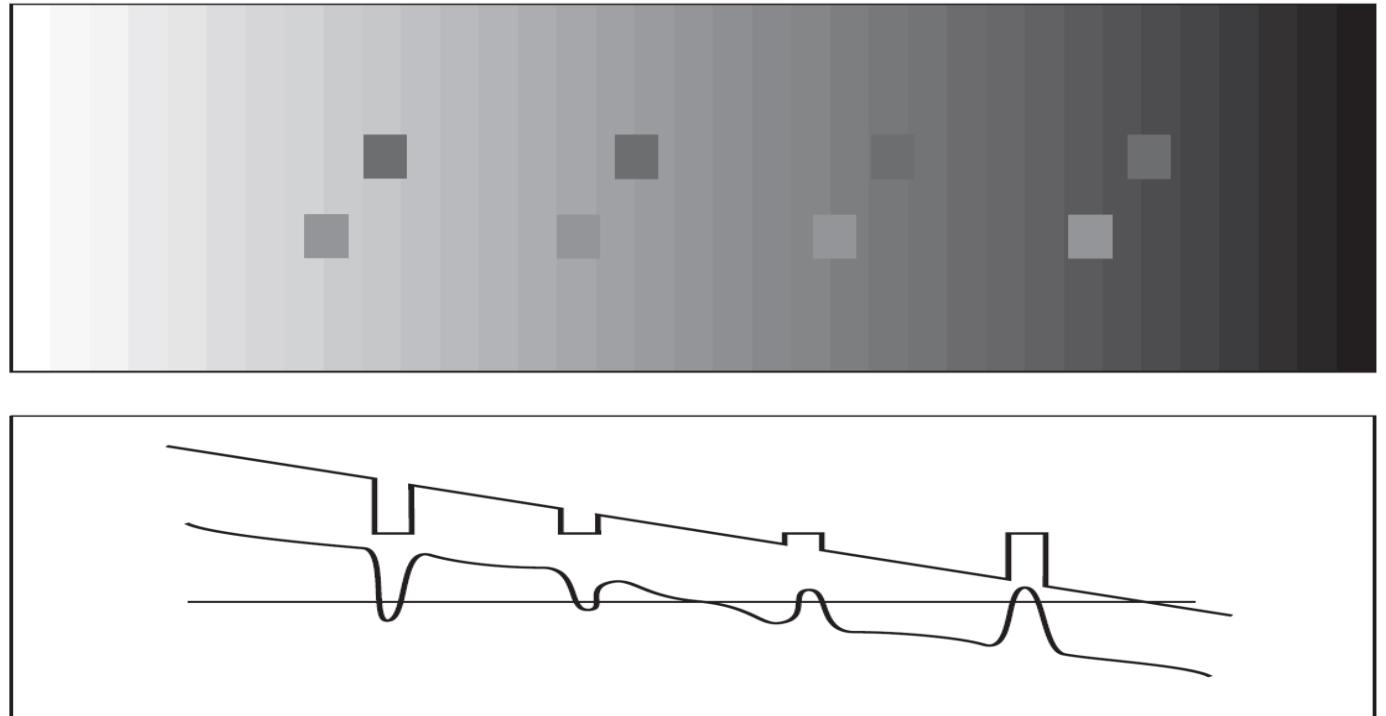
PALETAS CROMÁTICAS: Inhibición lateral y contraste simultáneo

El contraste simultáneo se debe a que la inhibición lateral altera la percepción subjetiva del nivel de intensidad:

Imagen de prueba

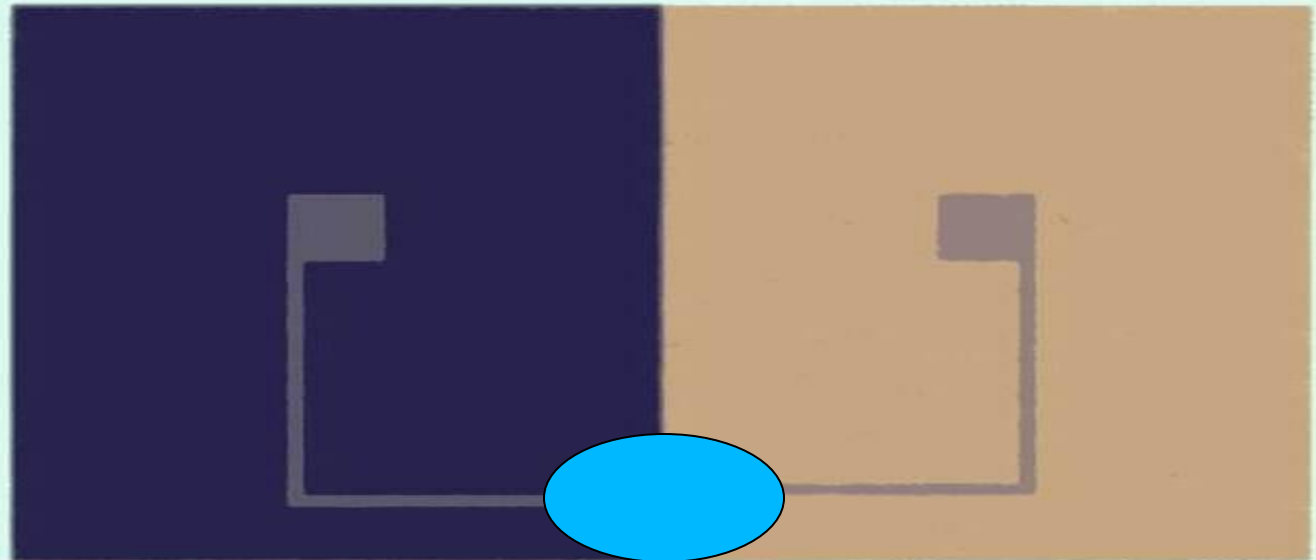
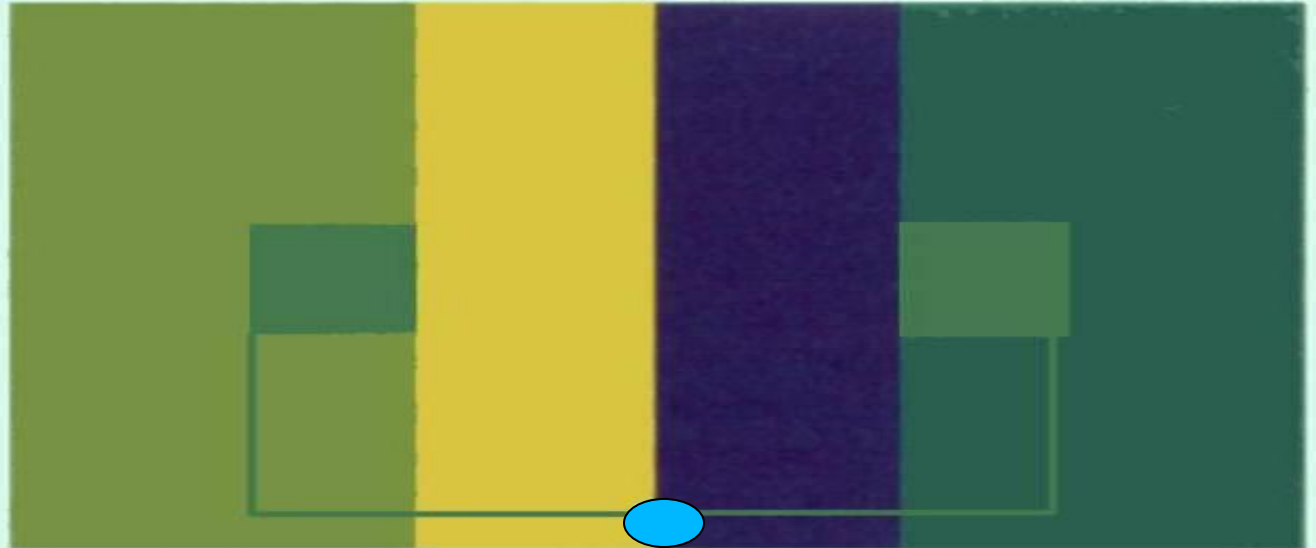
Intensidad

tensidad percibida



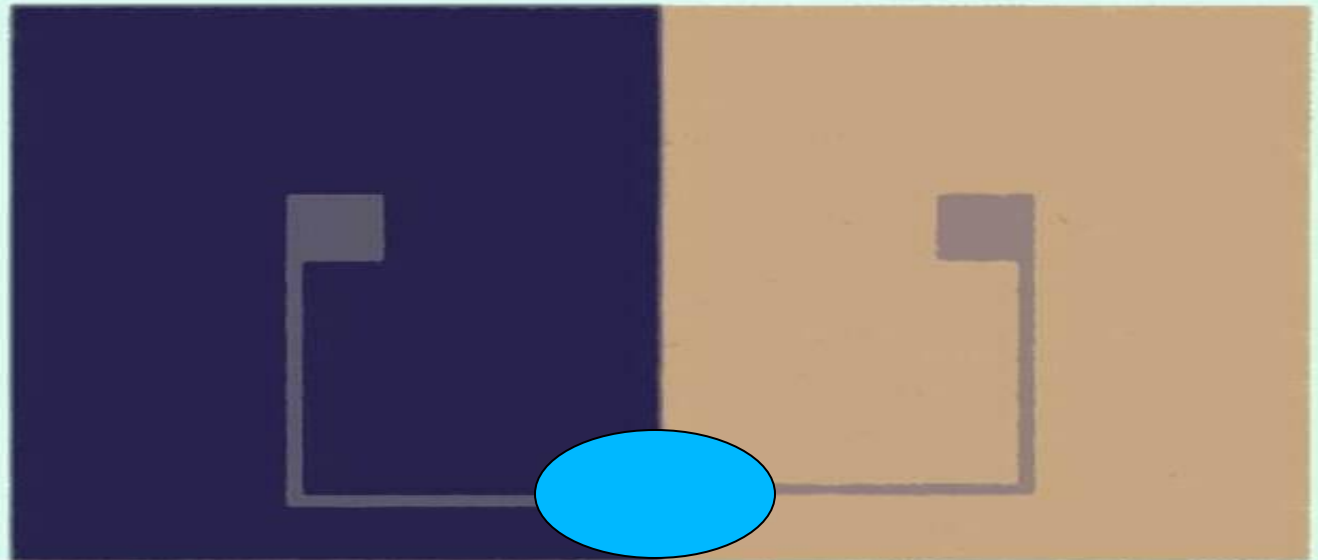
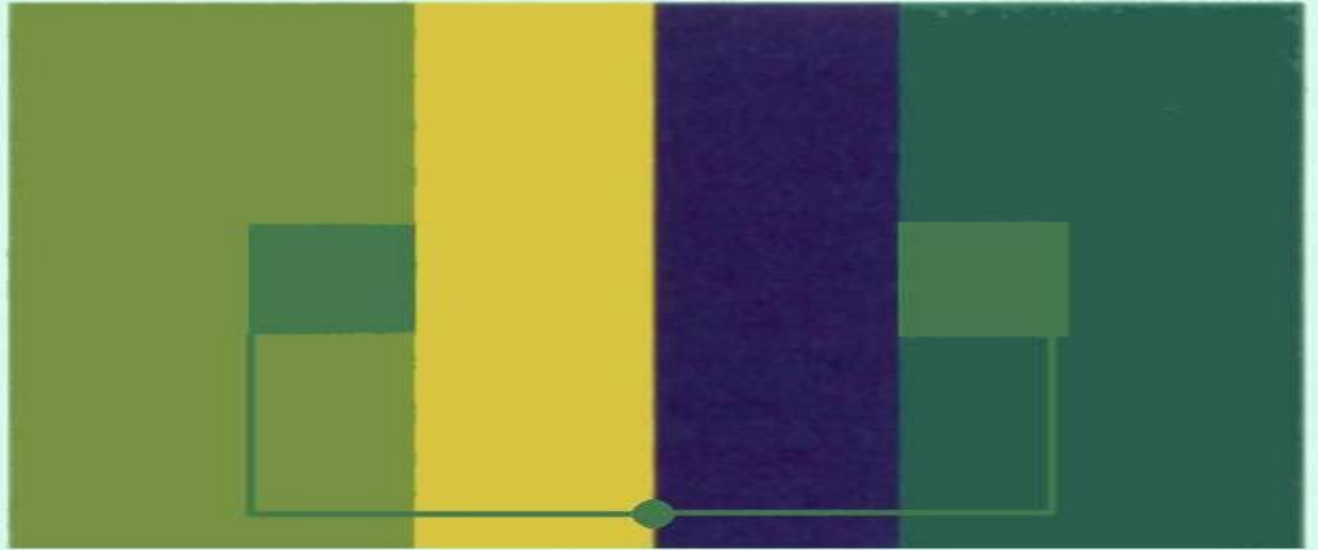
PALETAS CROMÁTICAS: Inhibición lateral y contraste simultáneo

El contraste simultáneo es más notorio en la percepción de la luminancia, pero ocurre en los tres canales oponentes por igual, y puede generar percepciones incorrectas de los “colores”.



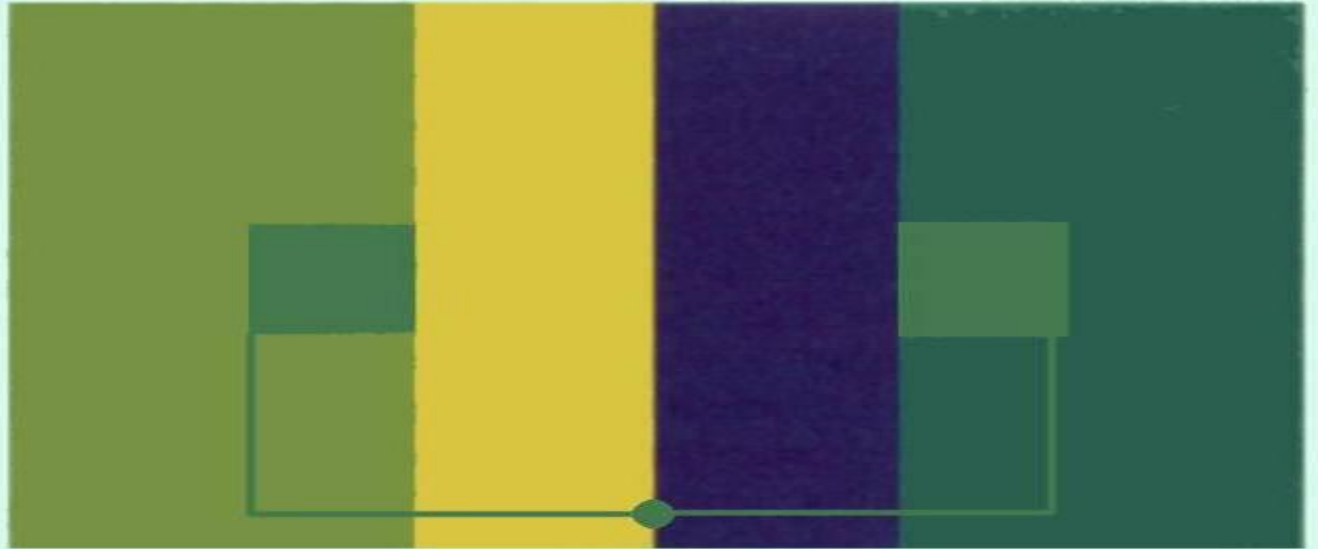
PALETAS CROMÁTICAS: Inhibición lateral y contraste simultáneo

El contraste simultáneo es más notorio en la percepción de la luminancia, pero ocurre en los tres canales oponentes por igual, y puede generar percepciones incorrectas de los “colores”.



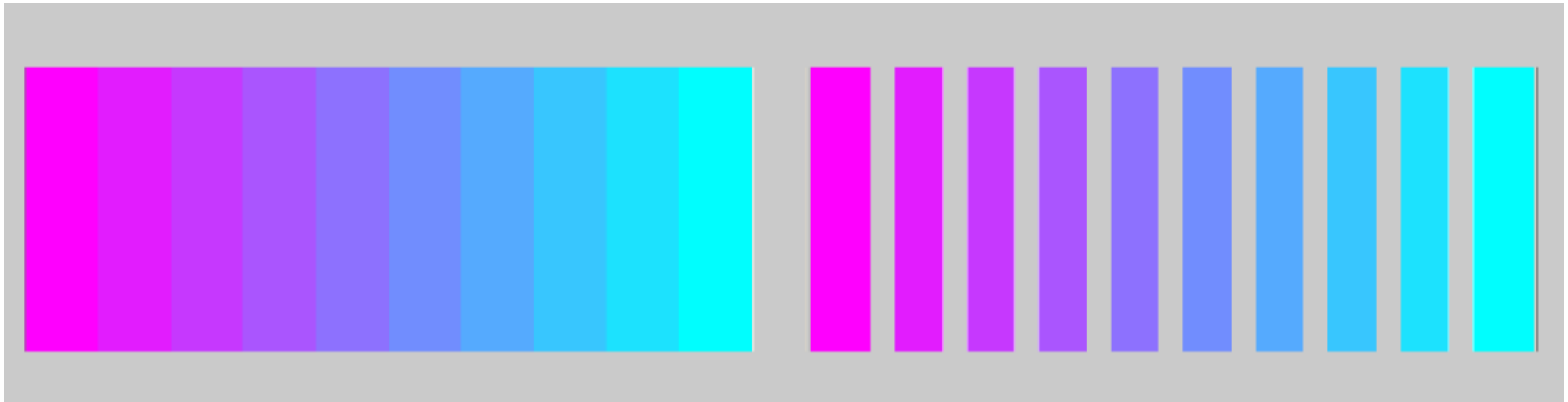
PALETAS CROMÁTICAS: Inhibición lateral y contraste simultáneo

El contraste simultáneo es más notorio en la percepción de la luminancia, pero ocurre en los tres canales oponentes por igual, y puede generar percepciones incorrectas de los “colores”.



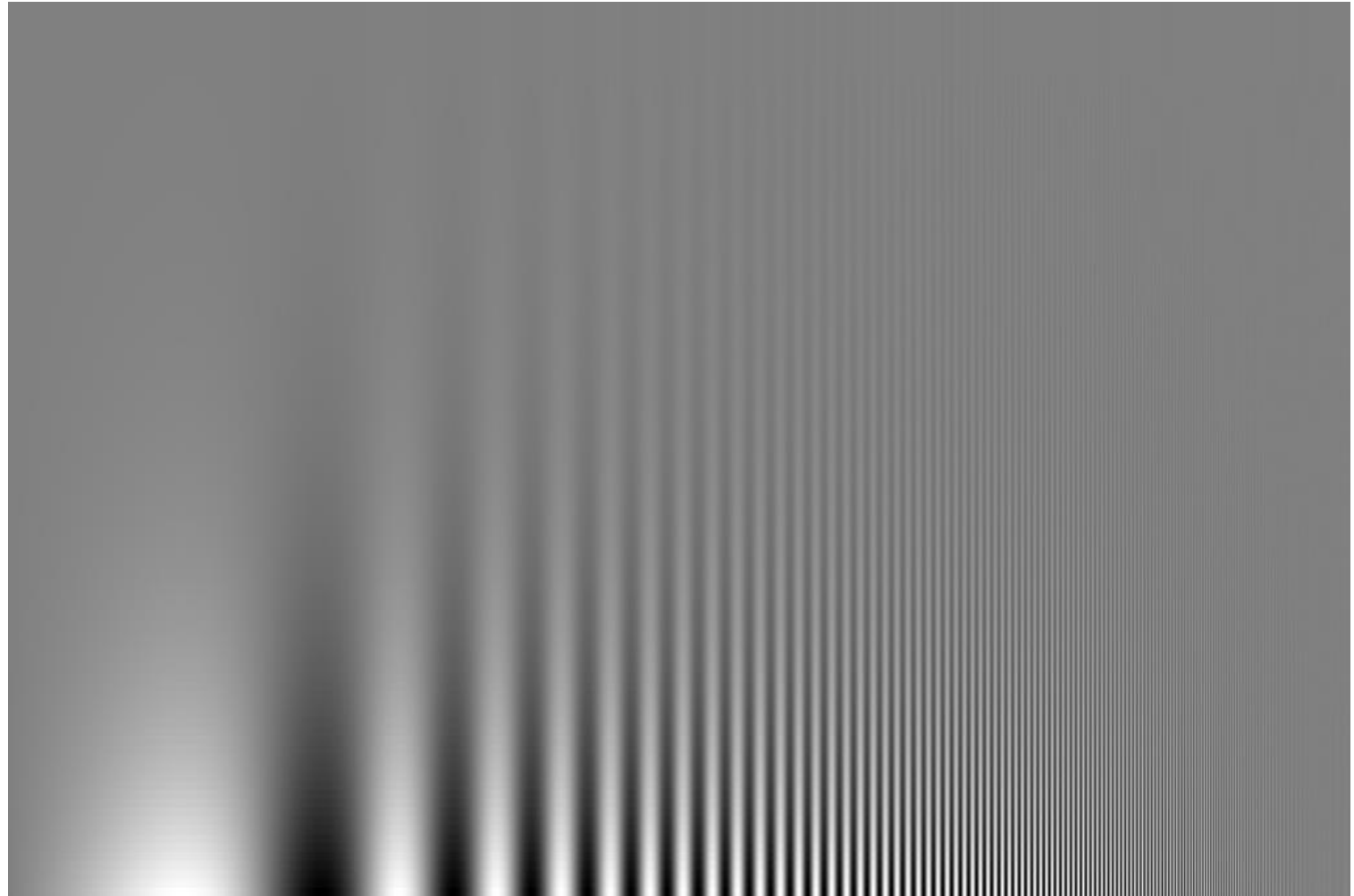
PALETAS CROMÁTICAS: Bandas de Mach

Otro efecto notorio debido a la inhibición lateral son las llamadas “bandas de Mach”, las cuales se observan como modificaciones locales del “color” de una parte de la imagen cuando ésta está próxima a otra con un color diferente. Normalmente una pequeña separación de un color neutro elimina el efecto.



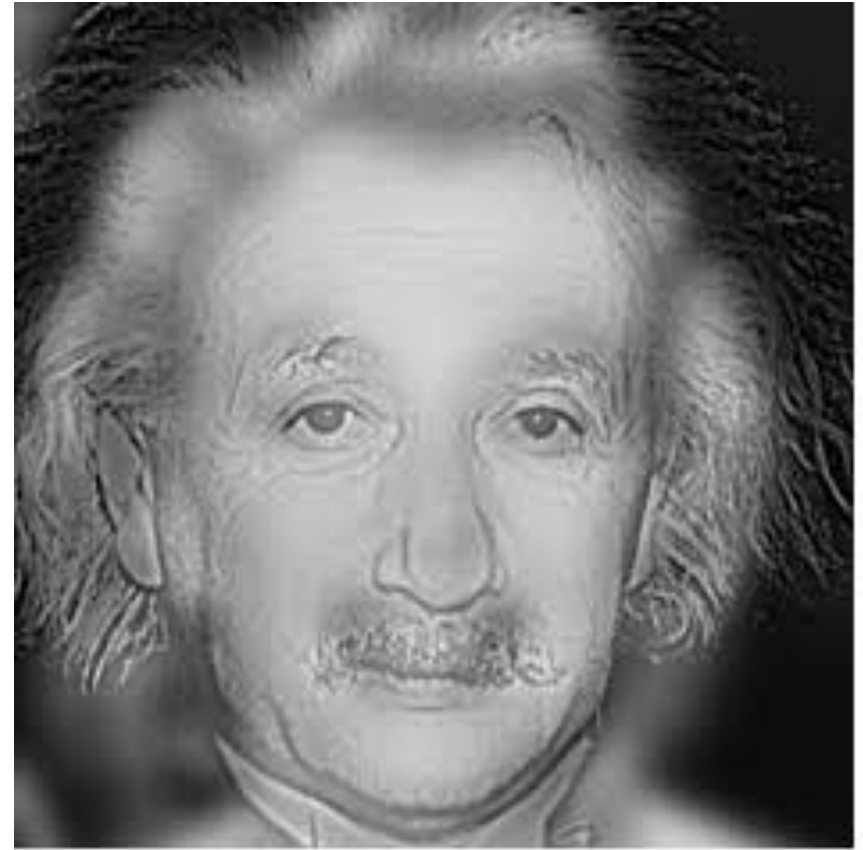
PALETAS CROMÁTICAS: El contraste y la frecuencia geométrica

Otro aspecto que influencia la percepción del contraste es la frecuencia geométrica (la cantidad de pixels entre crestas y valles de luminancia).



PALETAS CROMÁTICAS: El contraste y la frecuencia geométrica

Eso permite generar imágenes superpuestas, una con alta frecuencia (Albert) y otra con baja frecuencia (Marylin), y dependiendo del foco, tamaño y contexto el sistema visual le prestará atención a una u otra.



PALETAS CROMÁTICAS: Niveles de gris

La paleta por niveles de gris es una de las más antiguas y fáciles de implementar. Para mapear una variable x entre valores mínimo m y máximo M , normalizamos

$$i := (x - m) / (M - m)$$

y luego si nuestra escala es 0..255 aplicamos ese valor escalado al RGB del pixel

$$R := G := B := \text{round}(255 * i).$$



PALETAS CROMÁTICAS: Mapa de calor - Rainbow

Esta paleta mapea monotónicamente en crominancia, dentro de diferentes escalas (para visualizar temperatura típicamente se utiliza de 240 a 360, para variables que denotan «bien, regular, mal» se utiliza de 120 a 0).

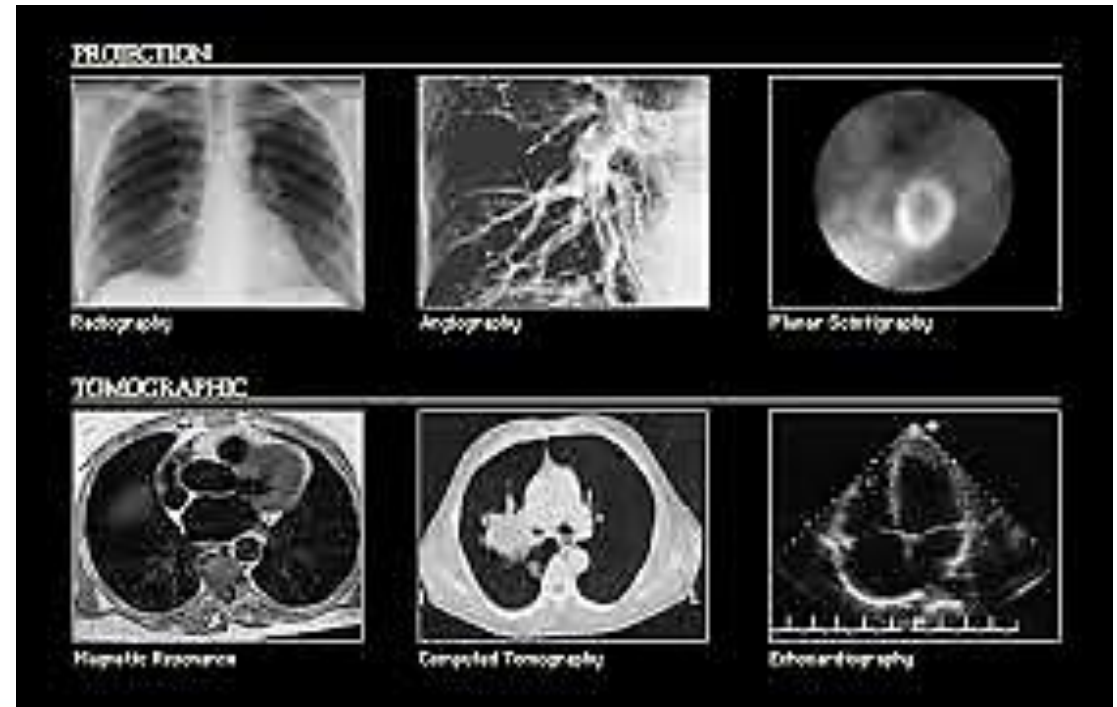
Para obtener el RGB típicamente se utiliza alguna función de biblioteca HSV2RGB, con valor de S y V constantes (en el ejemplo debajo 1) y el H en el rango elegido.



PALETAS CROMÁTICAS: Niveles de gris

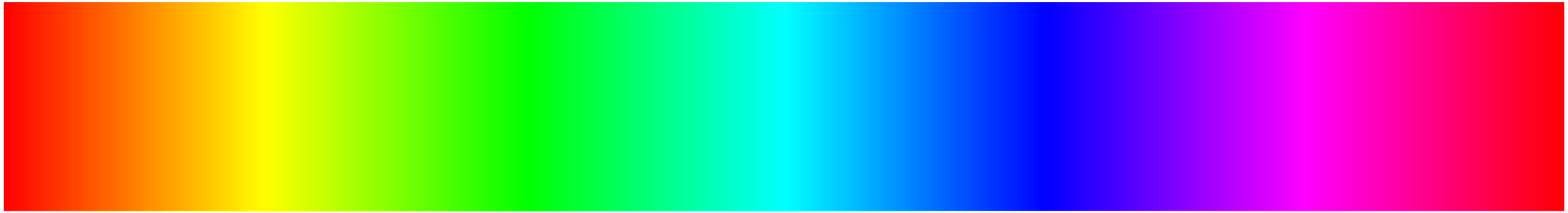
La paleta por niveles de gris no es adecuada para la lectura de valores puntuales aislados (el contraste simultáneo distorsiona la percepción), pero permite una buena captación “global” de la **forma** y propiedades geométricas de lo que se representa.

Por dicha razón se la utiliza aún en muchos contextos donde la percepción es clave, por ejemplo en radiología.



PALETAS CROMÁTICAS: Mapa de calor - Rainbow

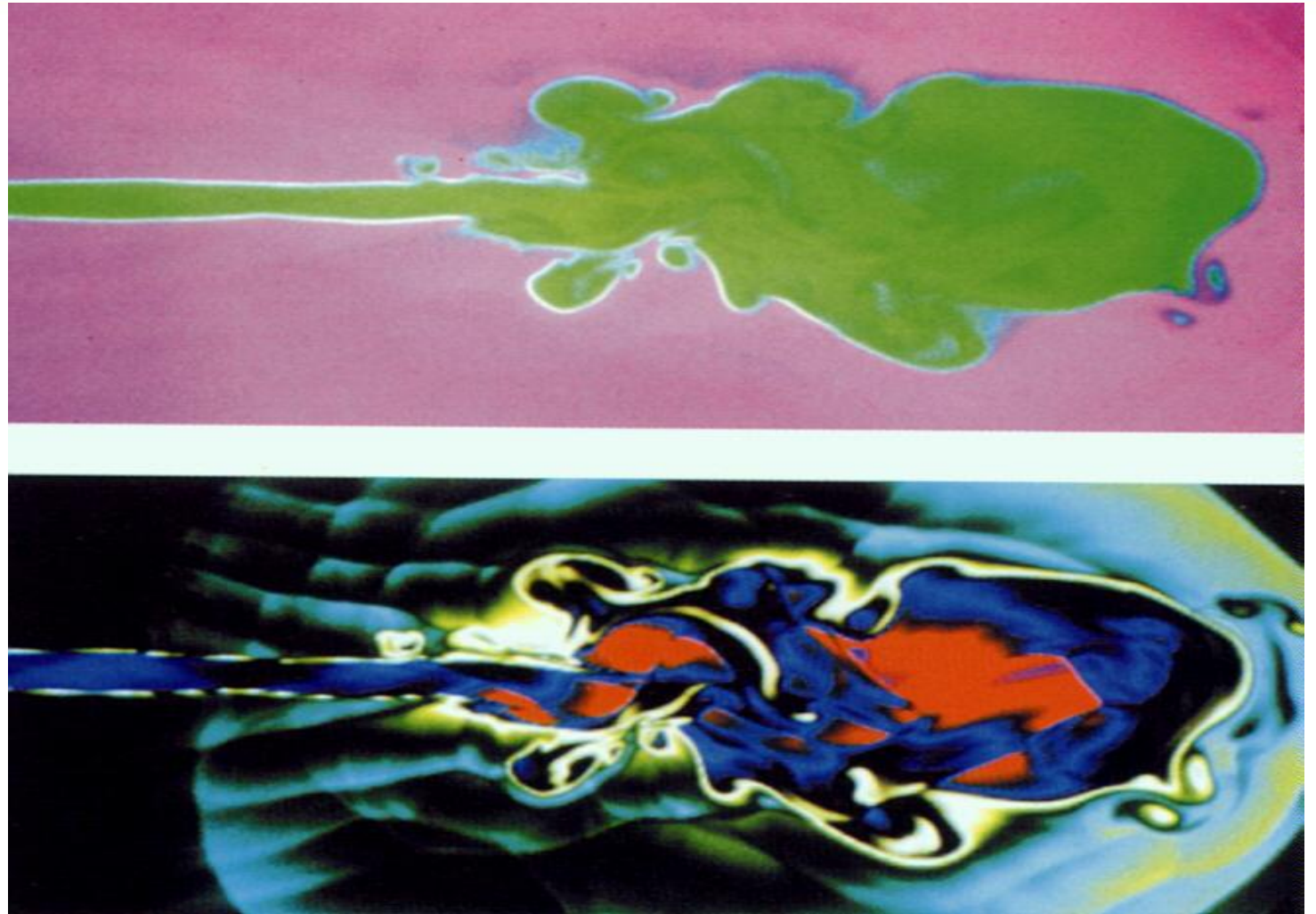
Las paletas que mapean monotónicamente en crominancia permiten discriminar bien **valores**, pero distorsionan la forma que pueden tener, debido a la no linealidad en la percepción de la diferencia de colores (muy acentuada en la zona del naranja, y mucho menor en la zona verde).



PALETAS CROMÁTICAS:Cuál es la adecuada?

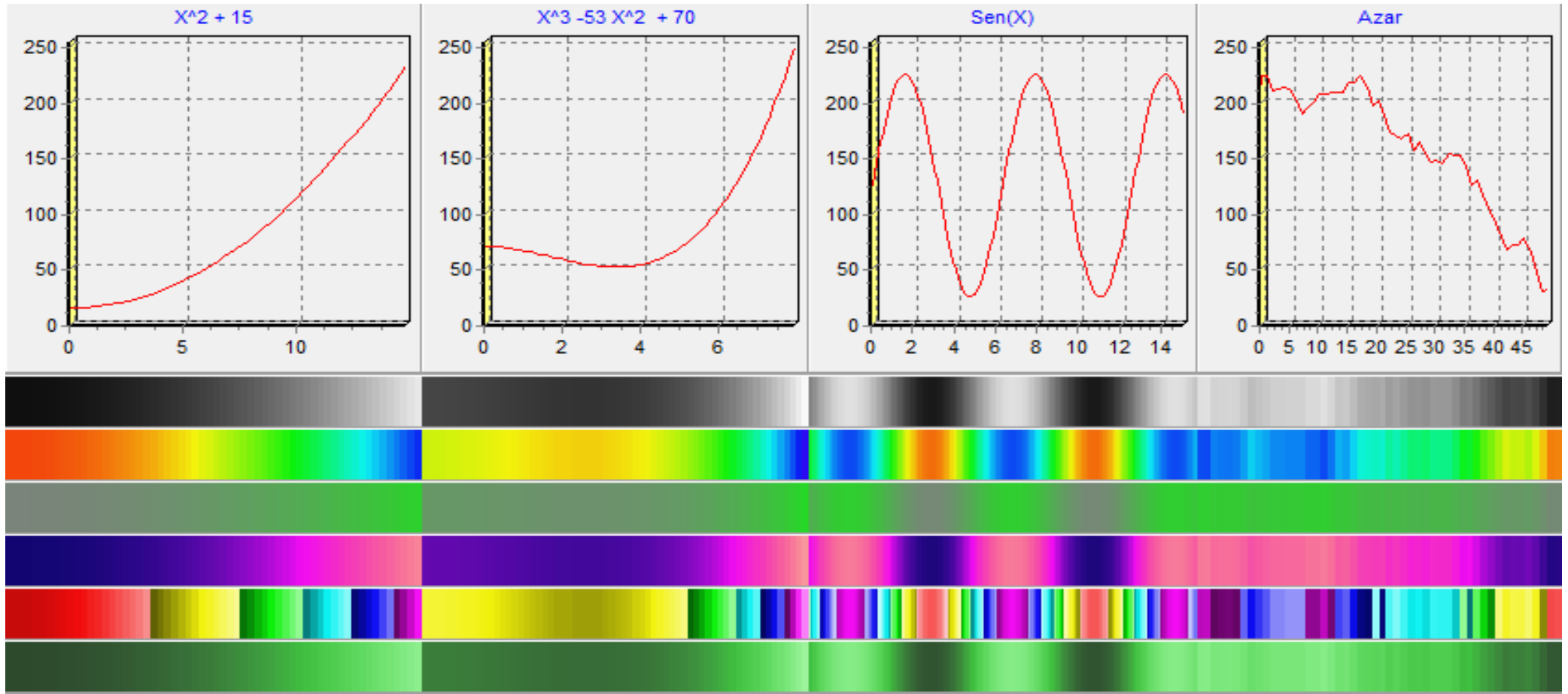
Un mismo dataset
con dos paletas
diferentes.

La estructura que
se ve en el
segundo ejemplo,
es relevante o
distraye?

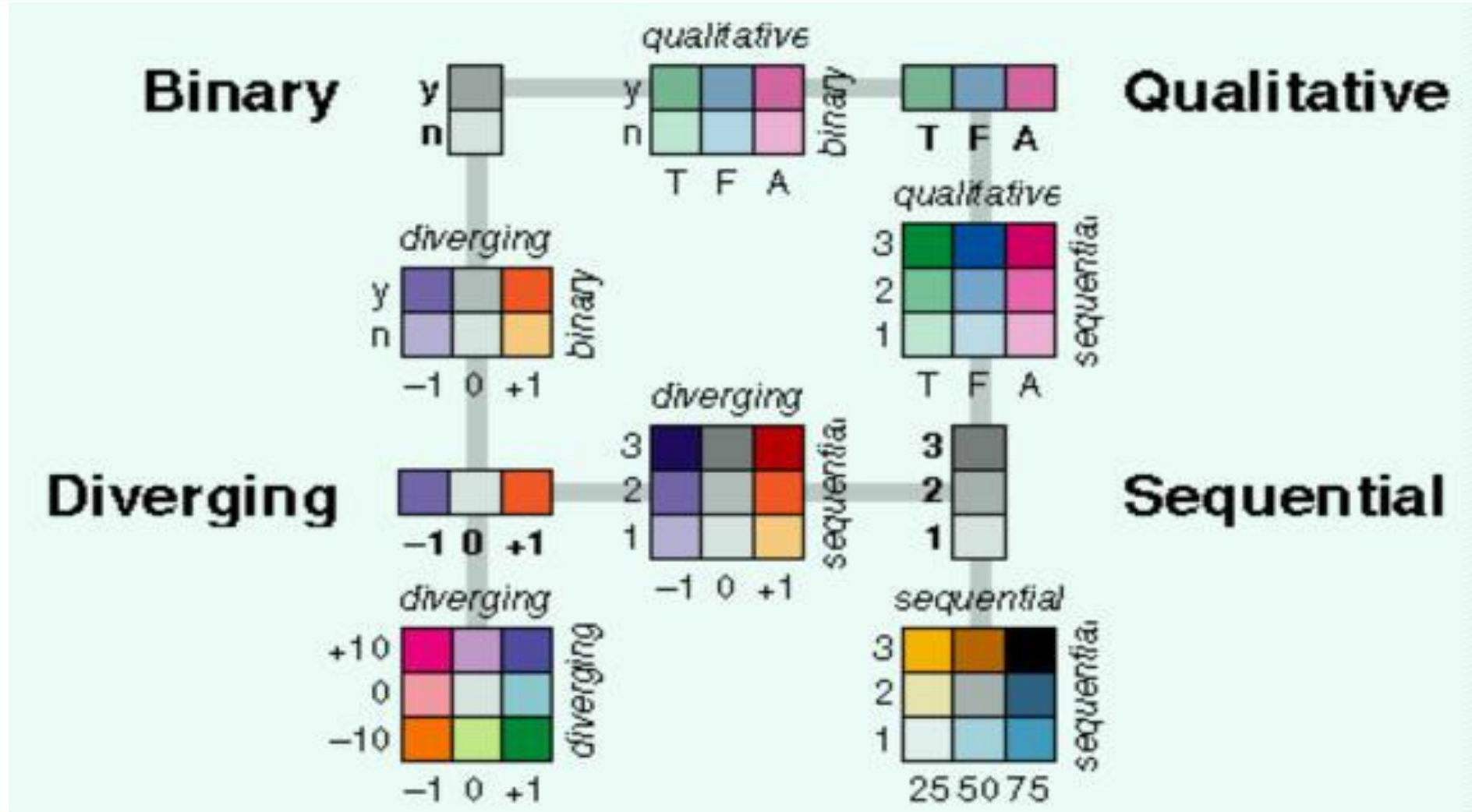


PALETAS CROMÁTICAS:Cuál es la adecuada?

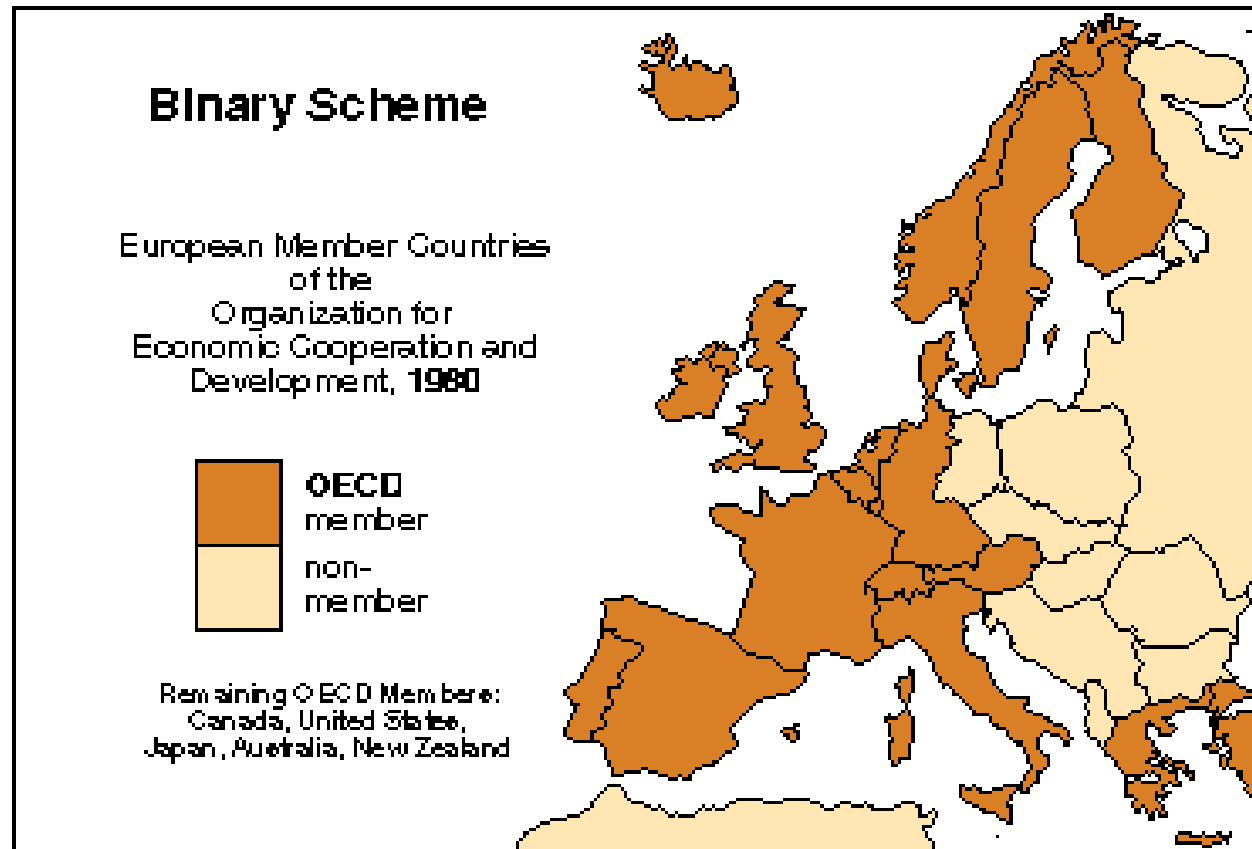
Algunas funciones mostradas con diferentes paletas.



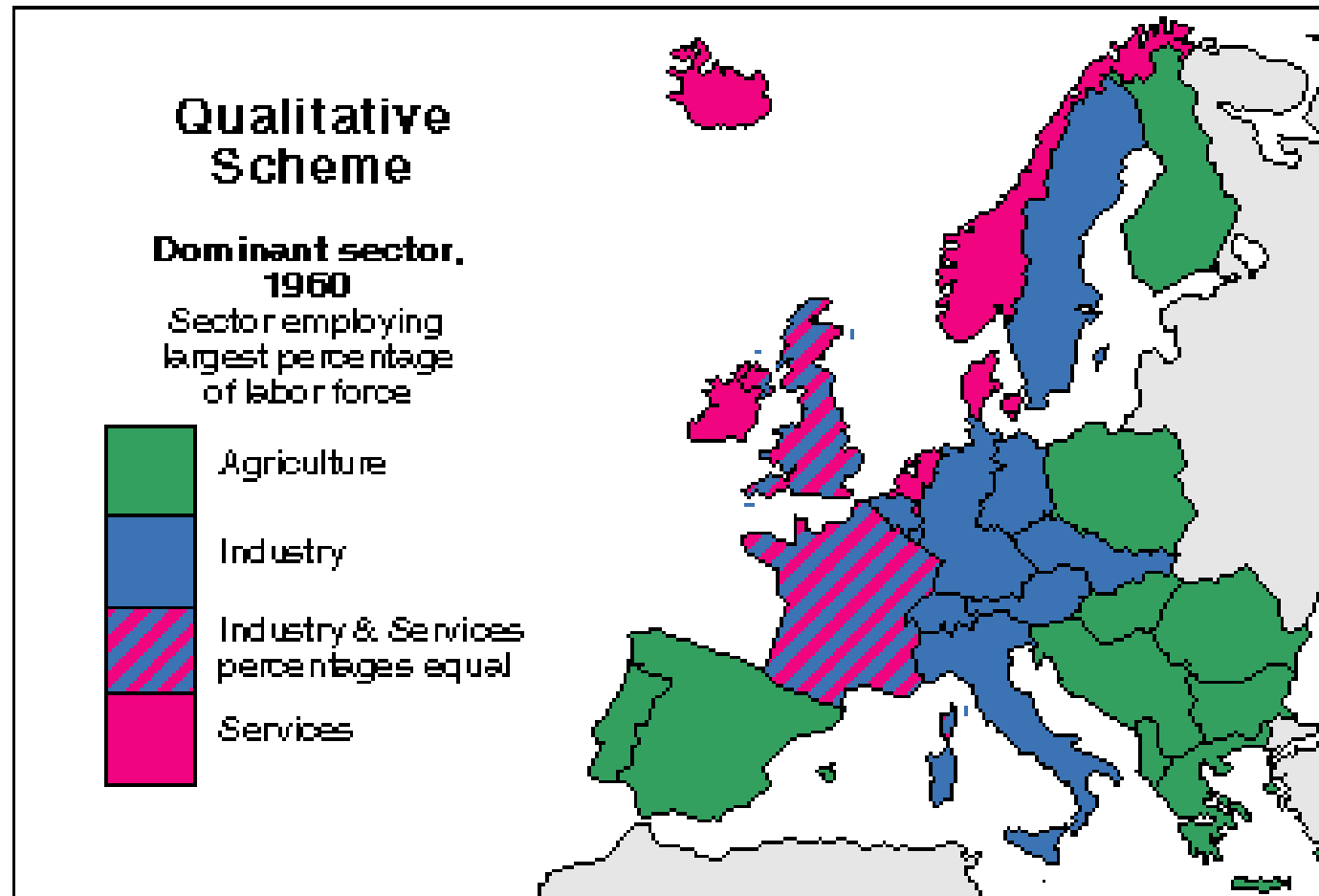
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



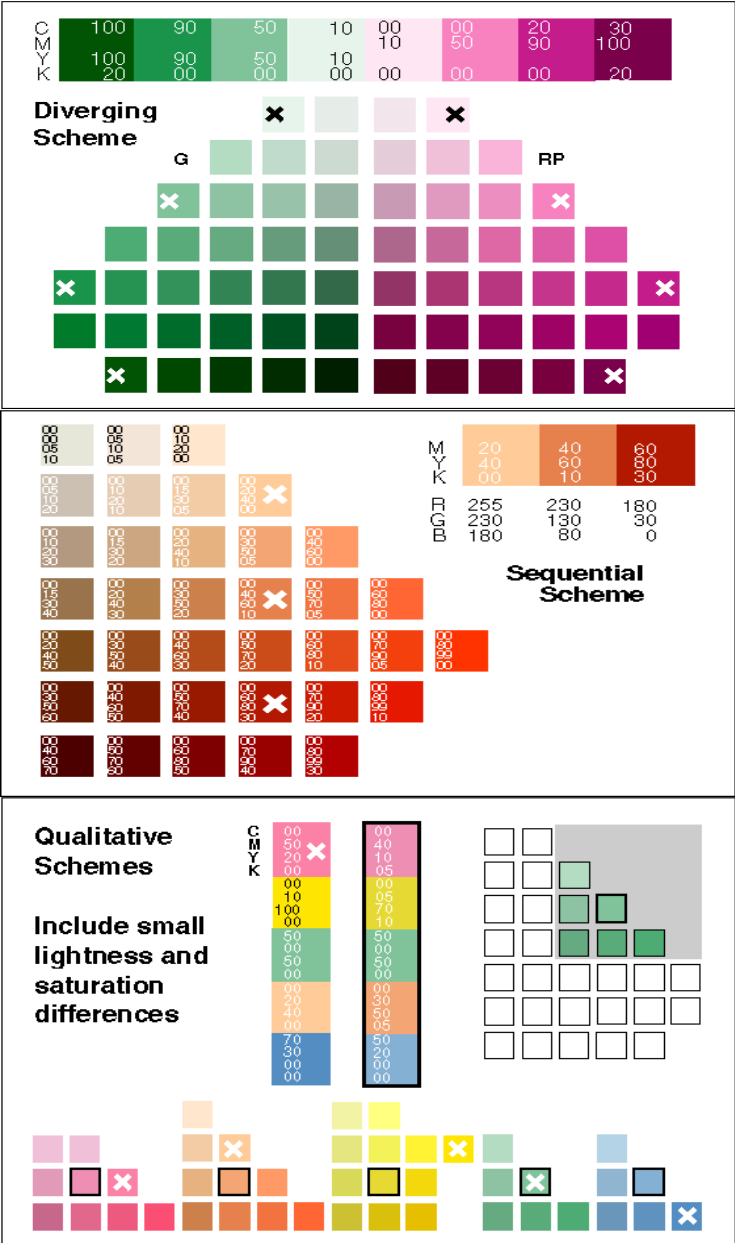
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



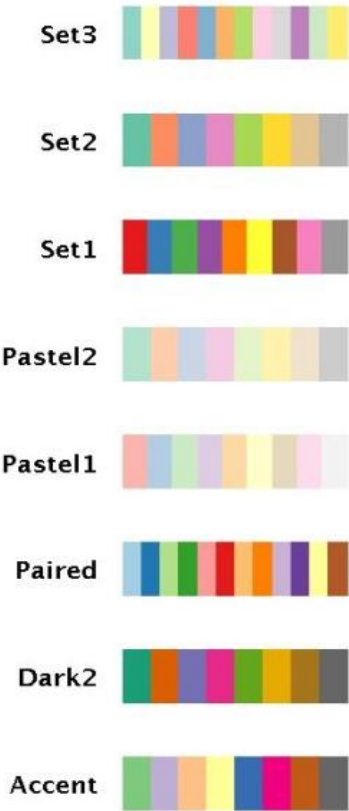
Diverging



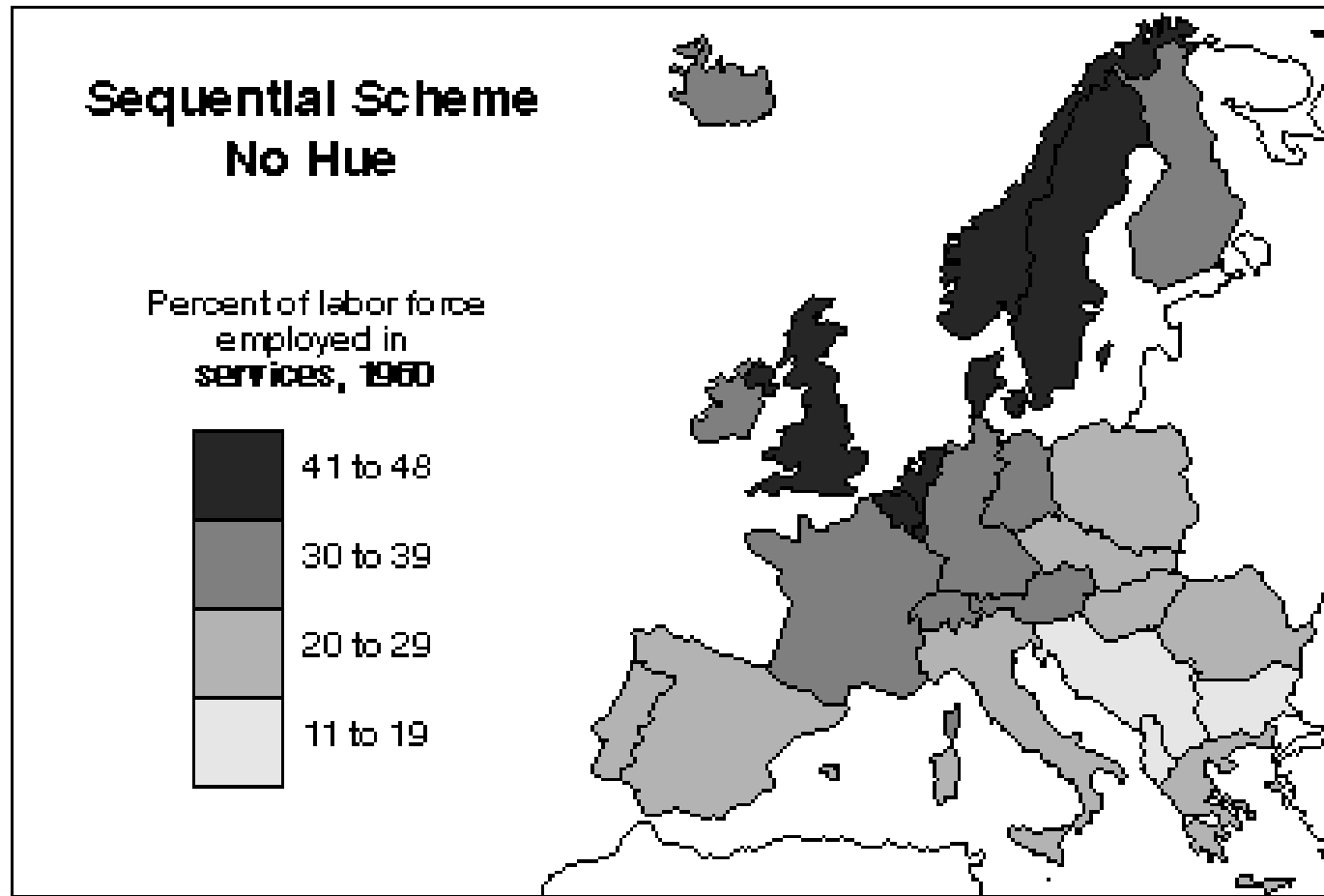
Sequential



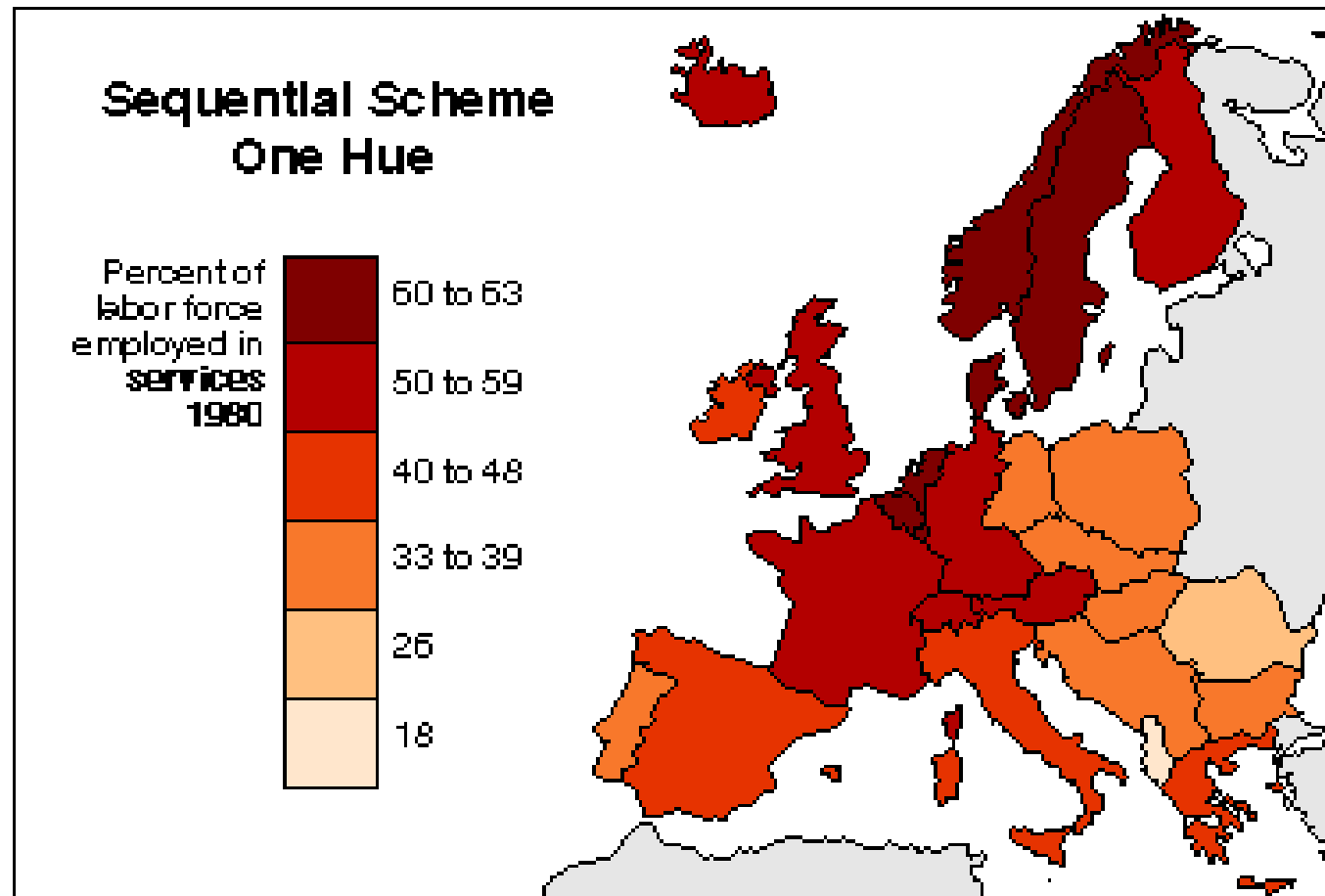
Qualitative



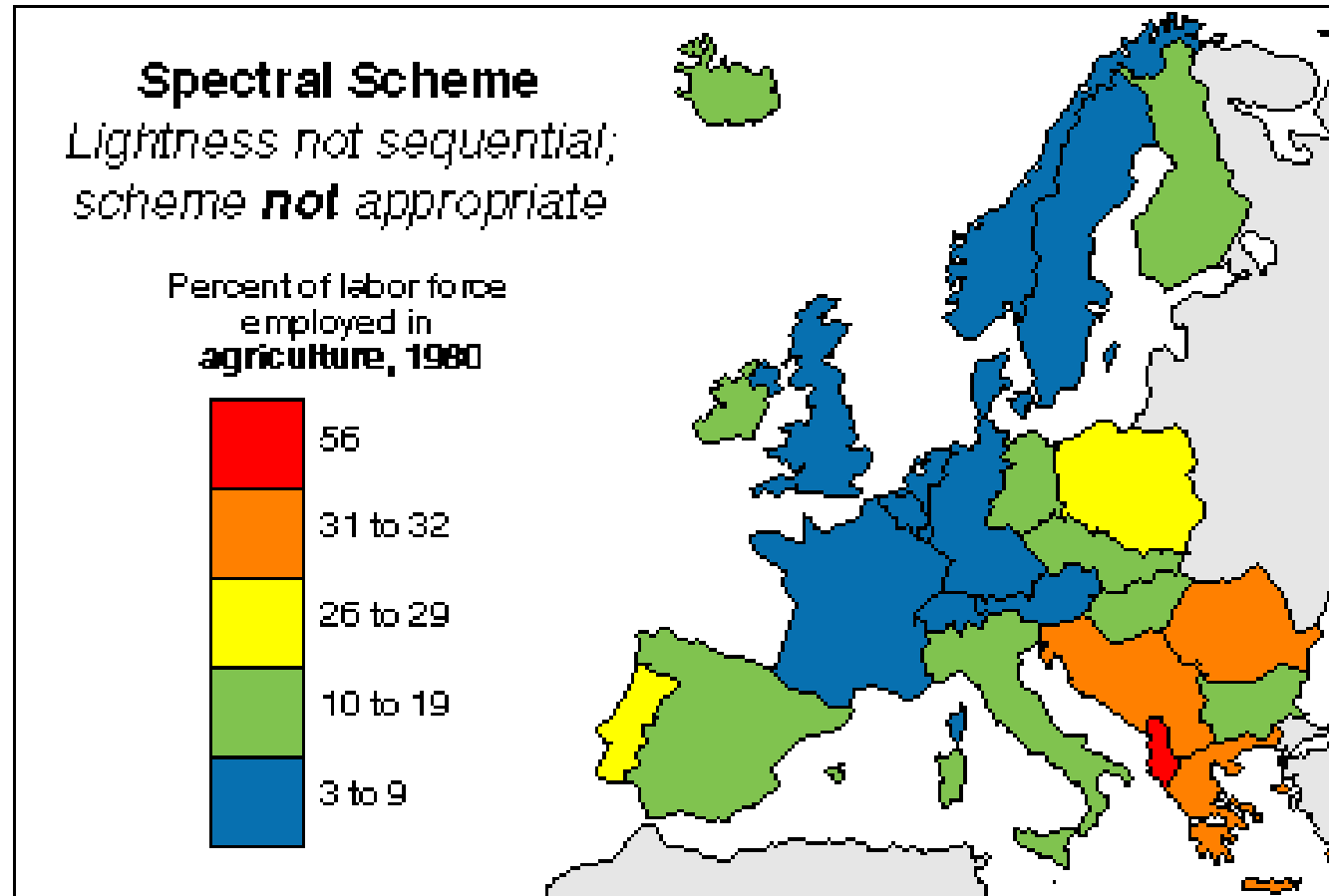
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



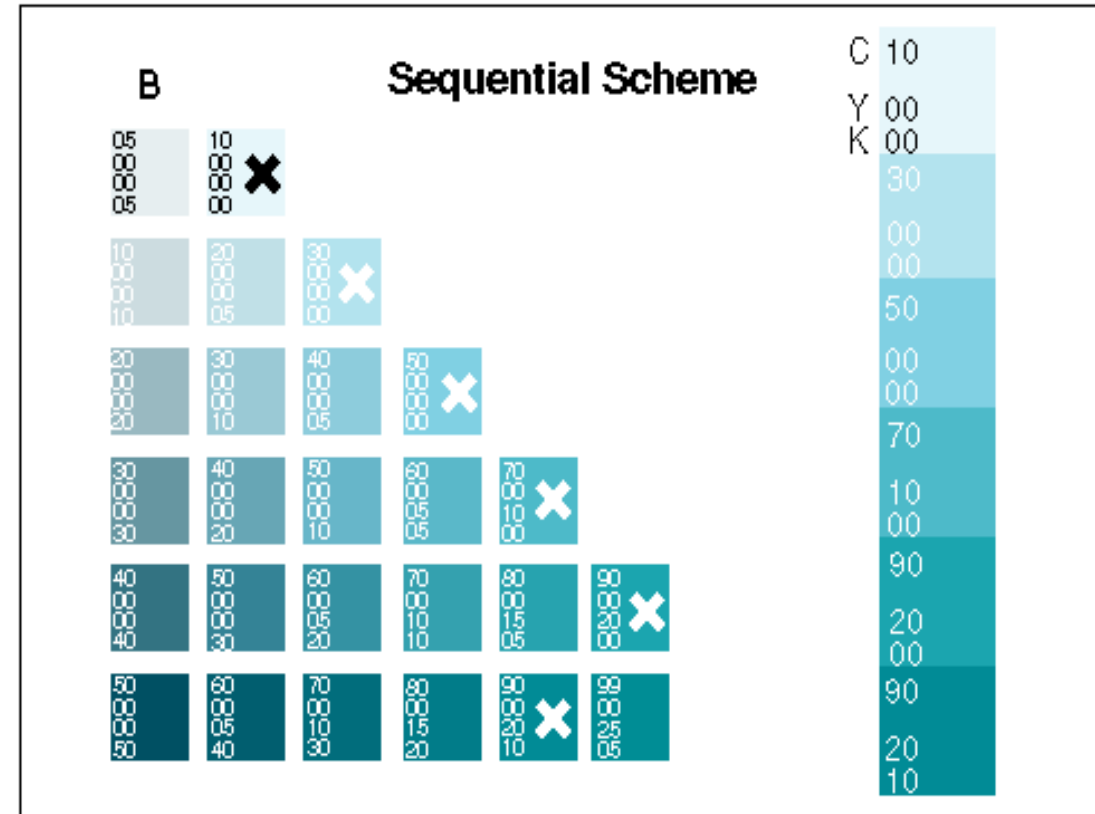
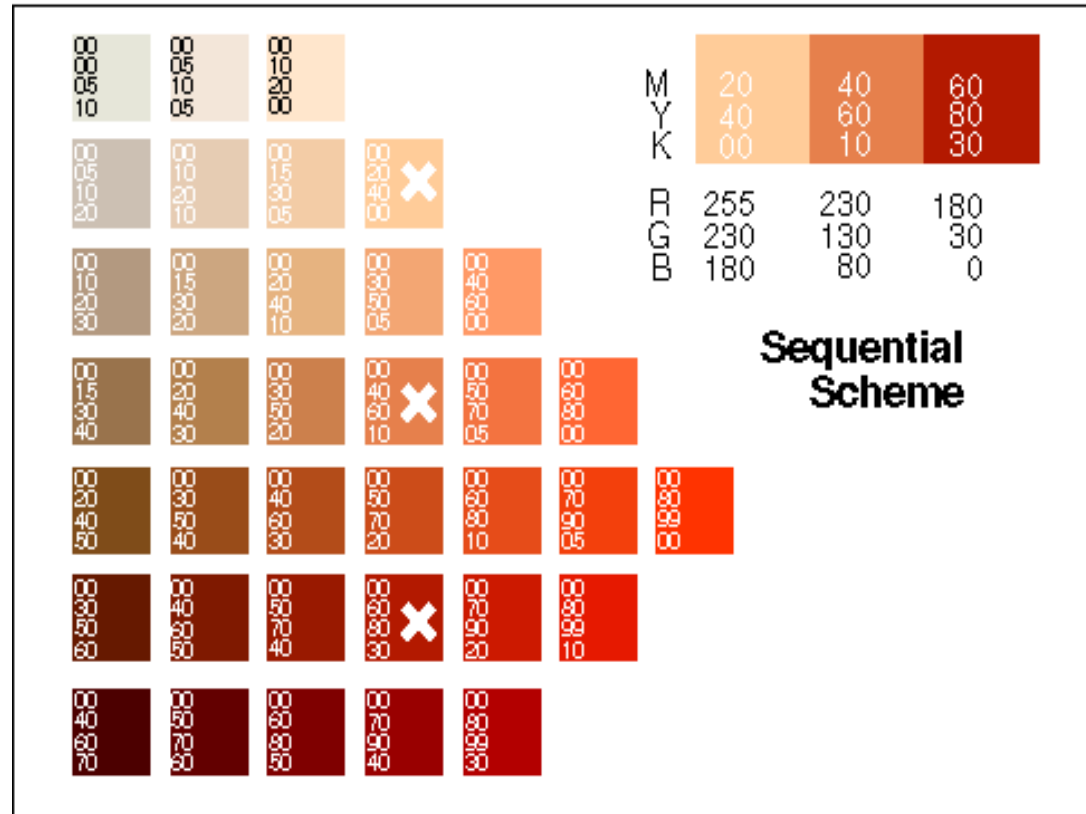
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



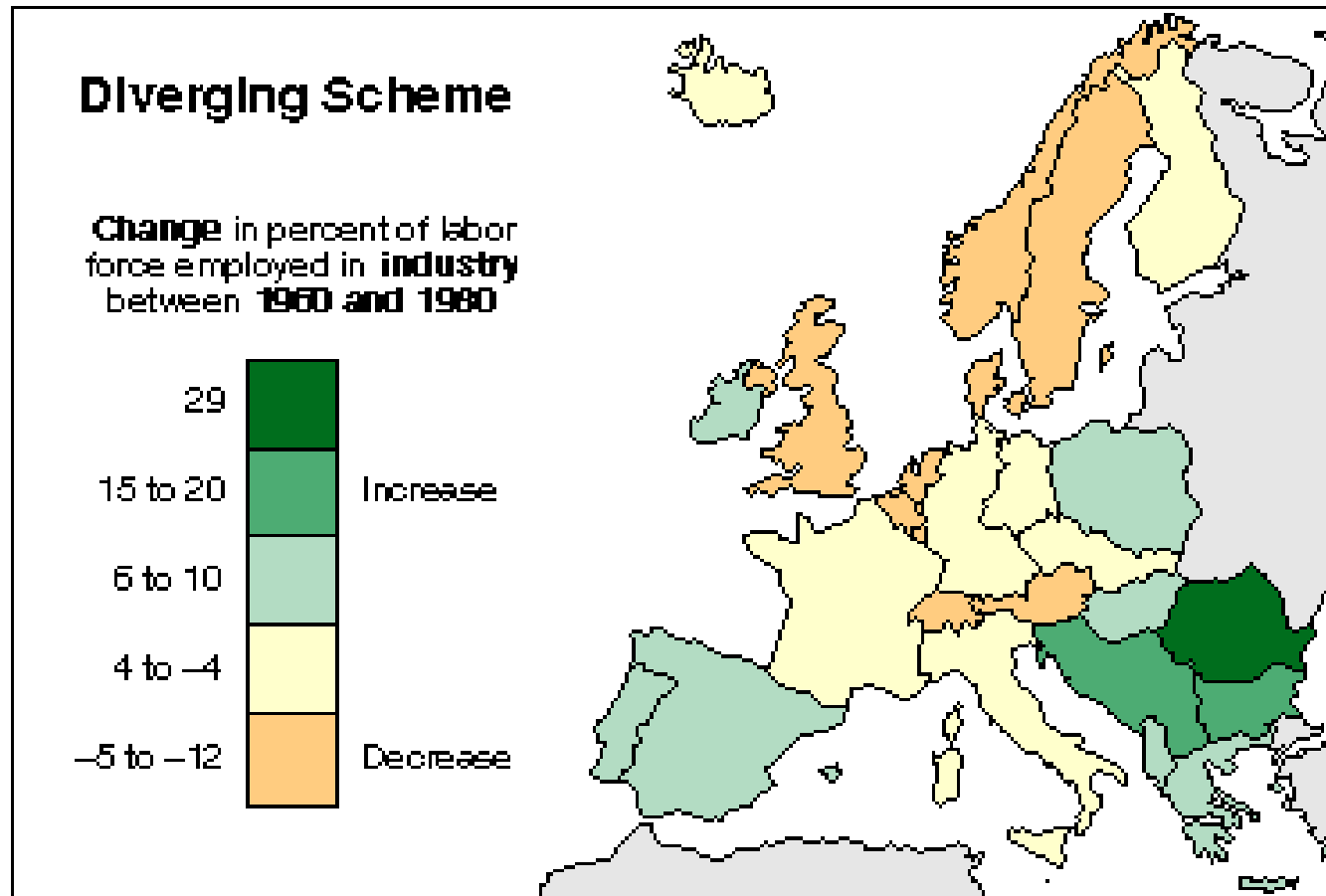
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



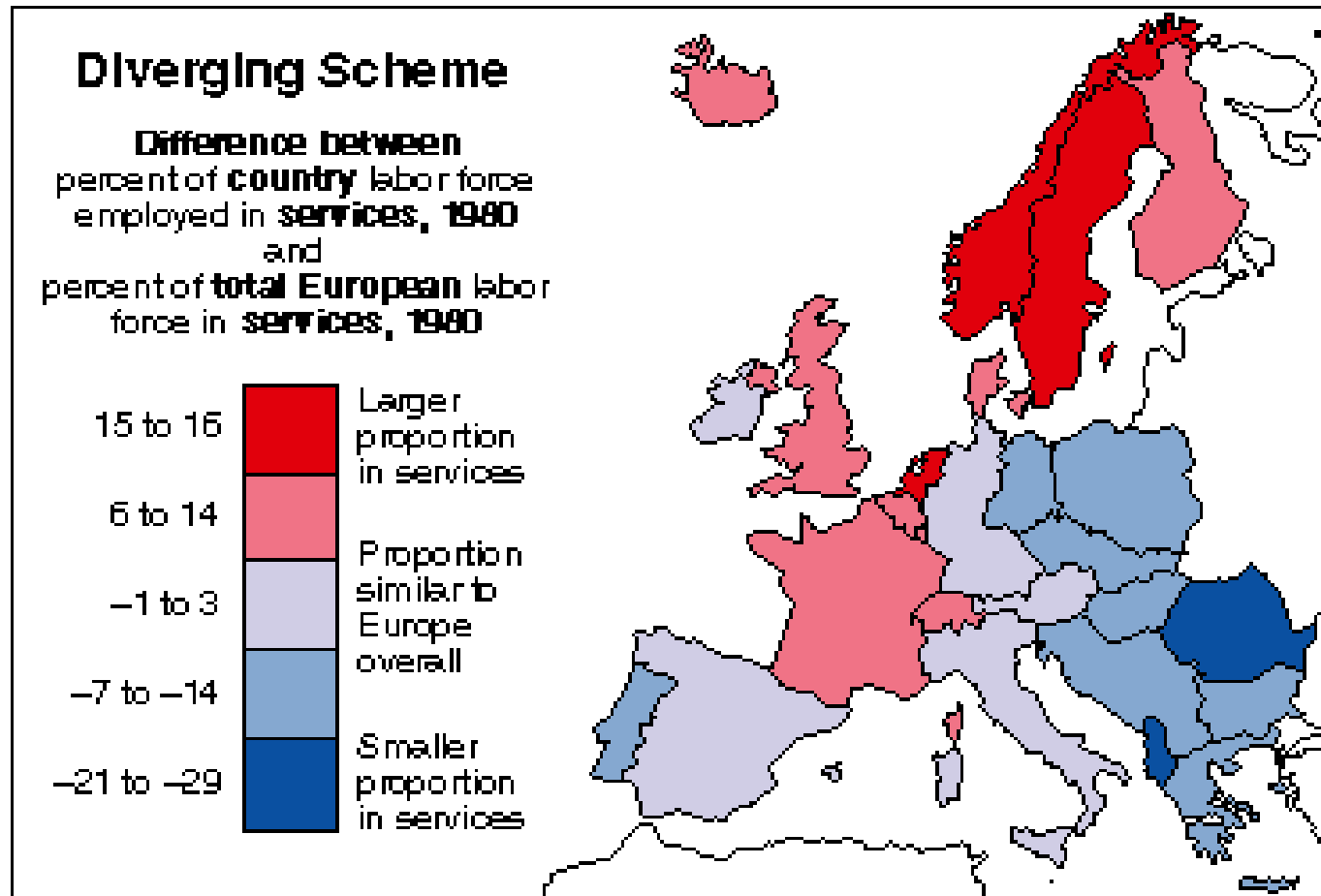
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



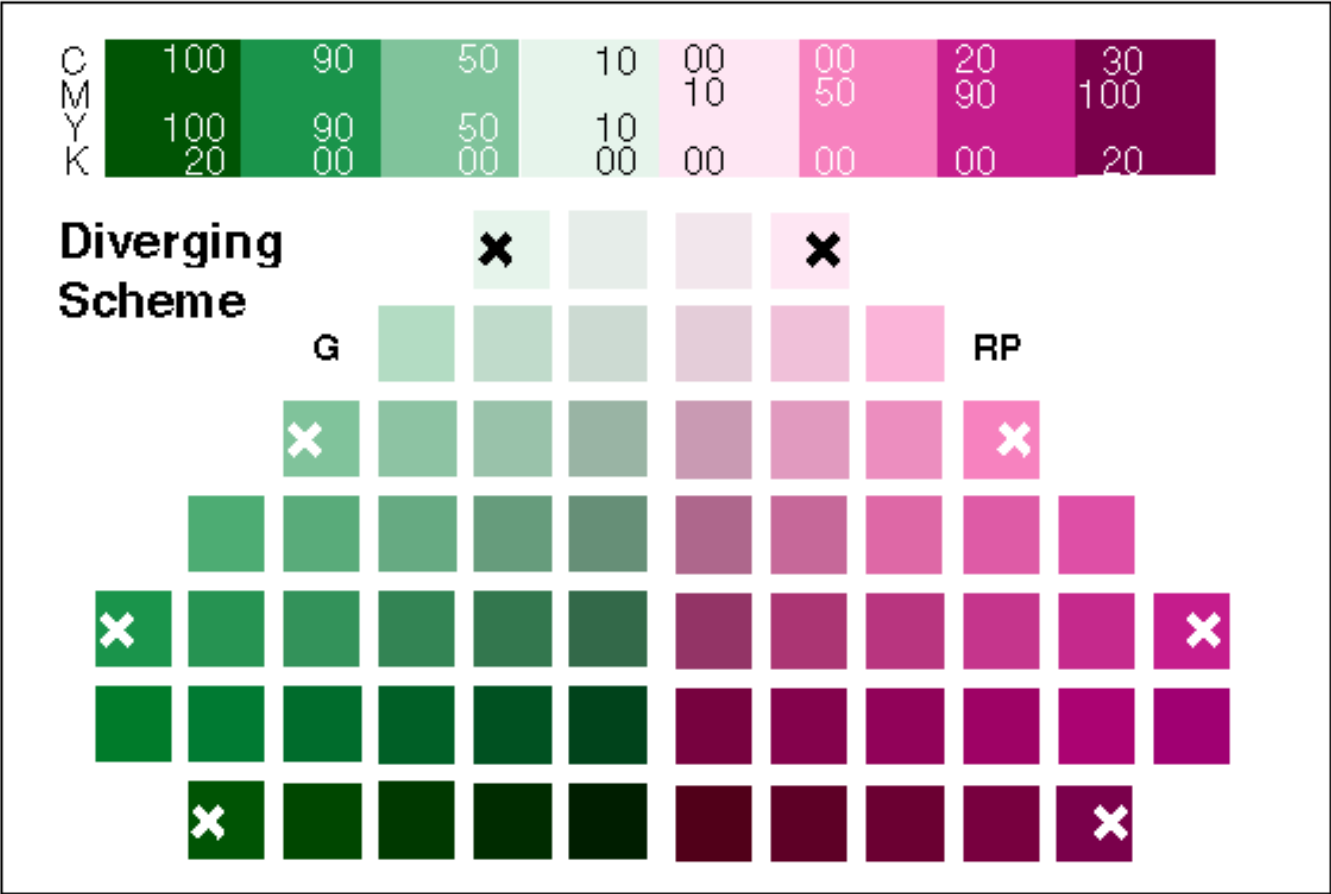
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



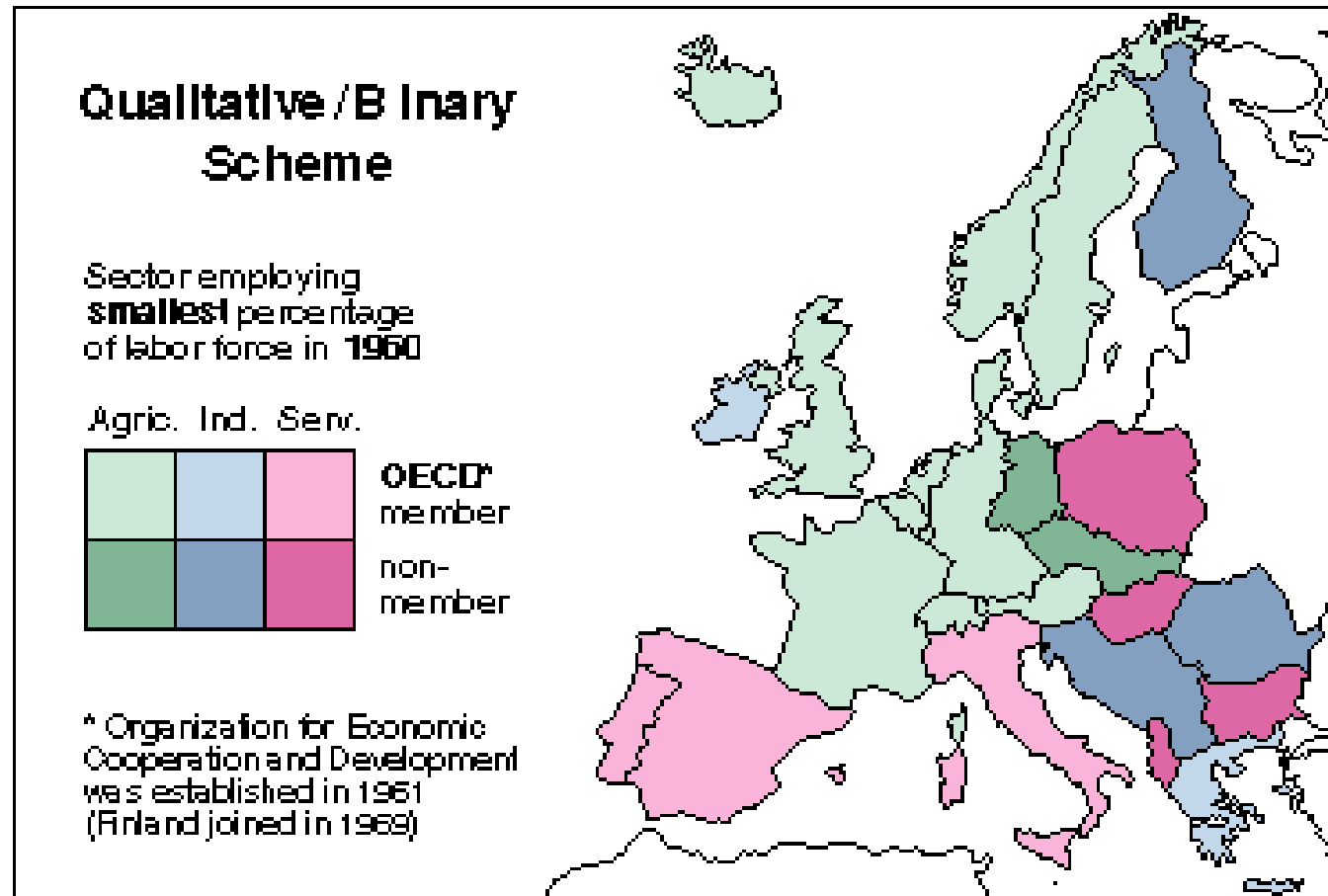
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



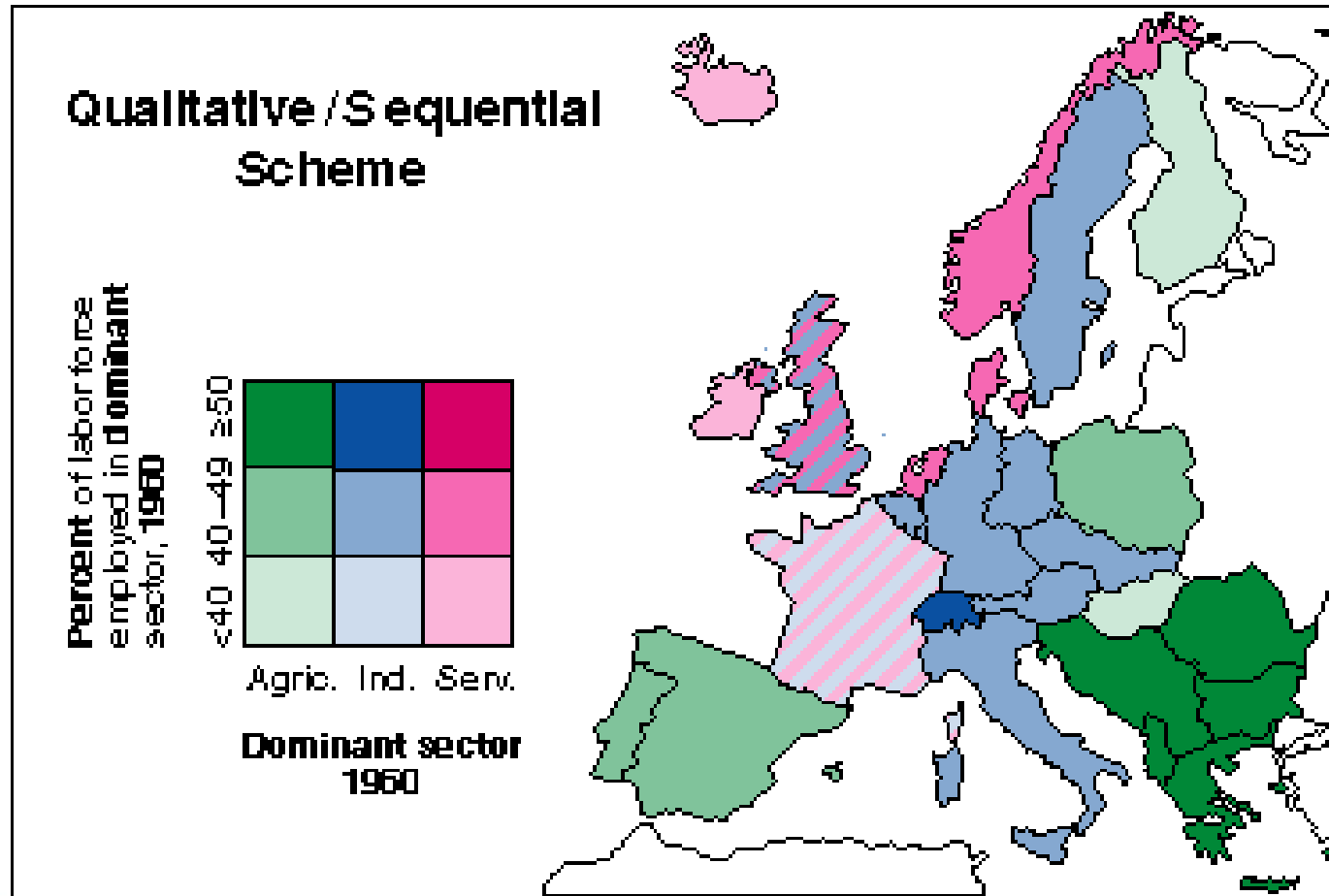
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



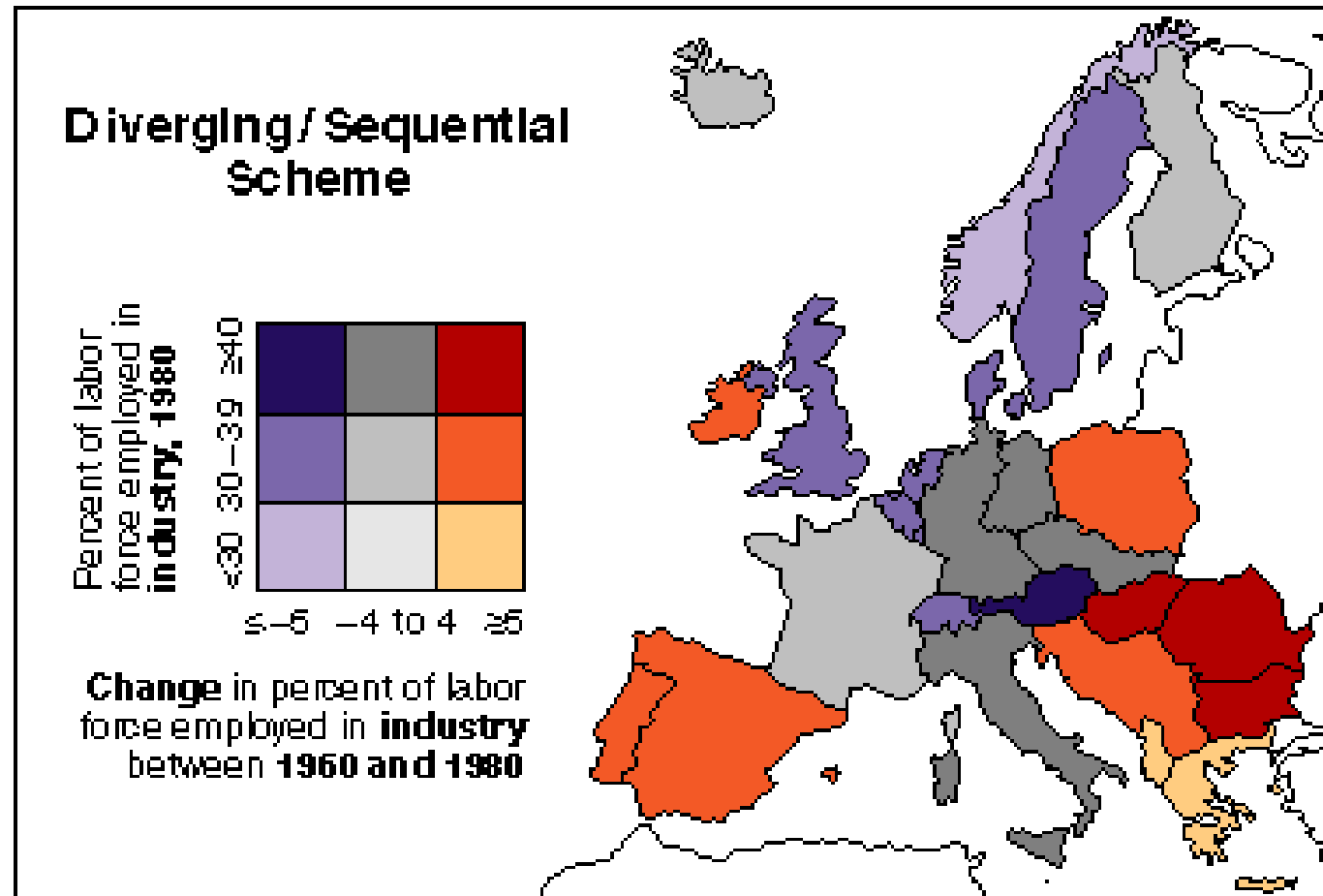
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



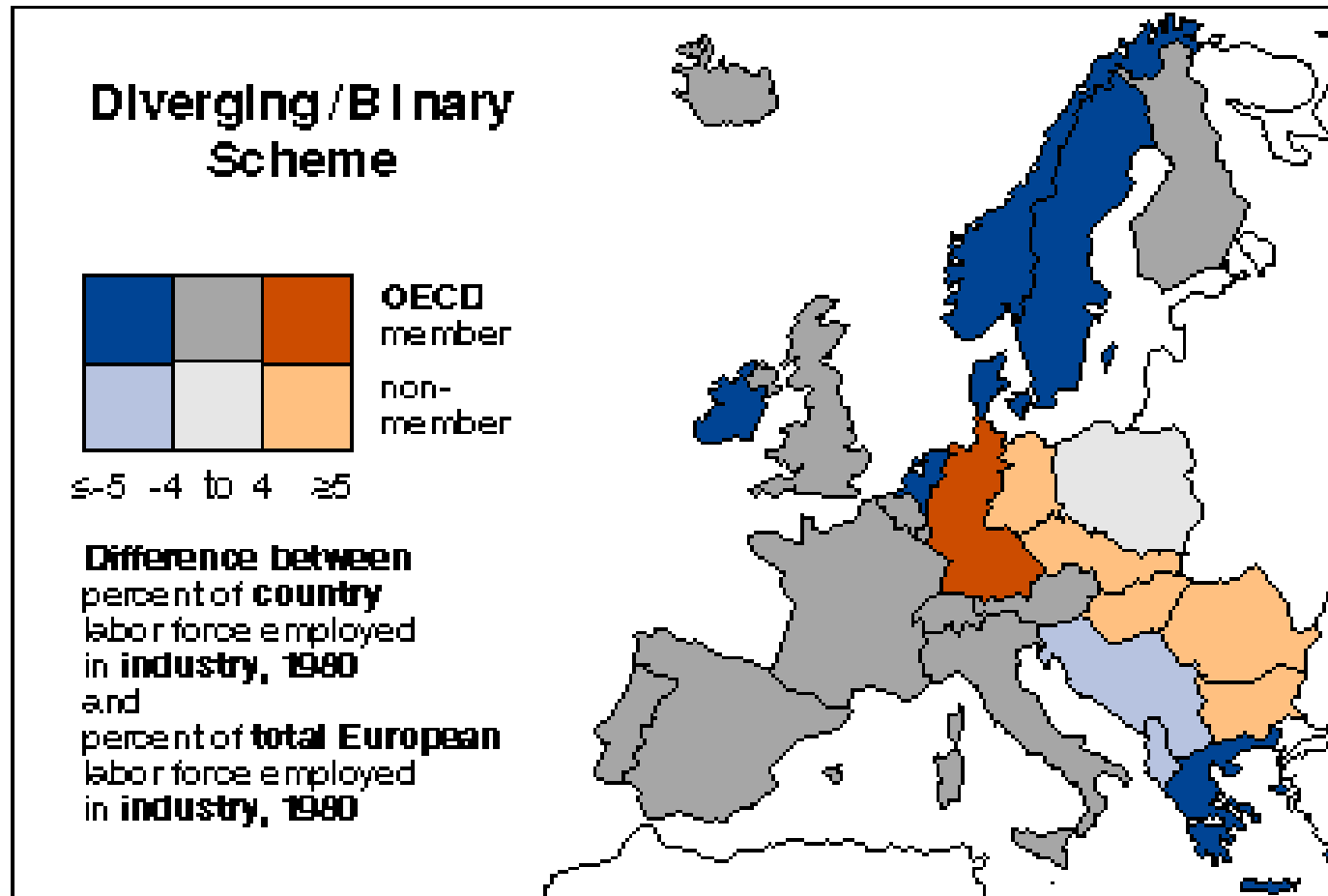
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



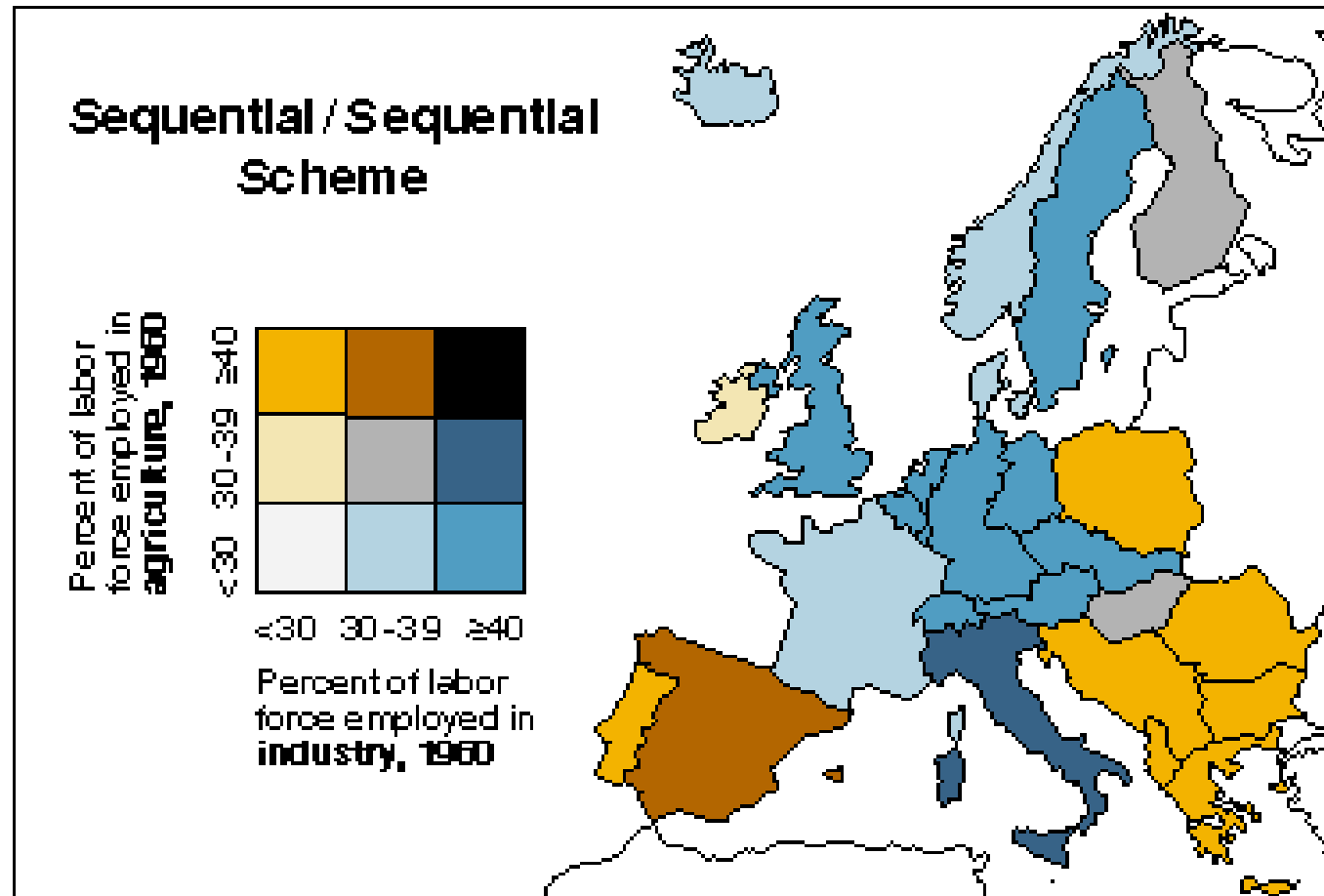
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



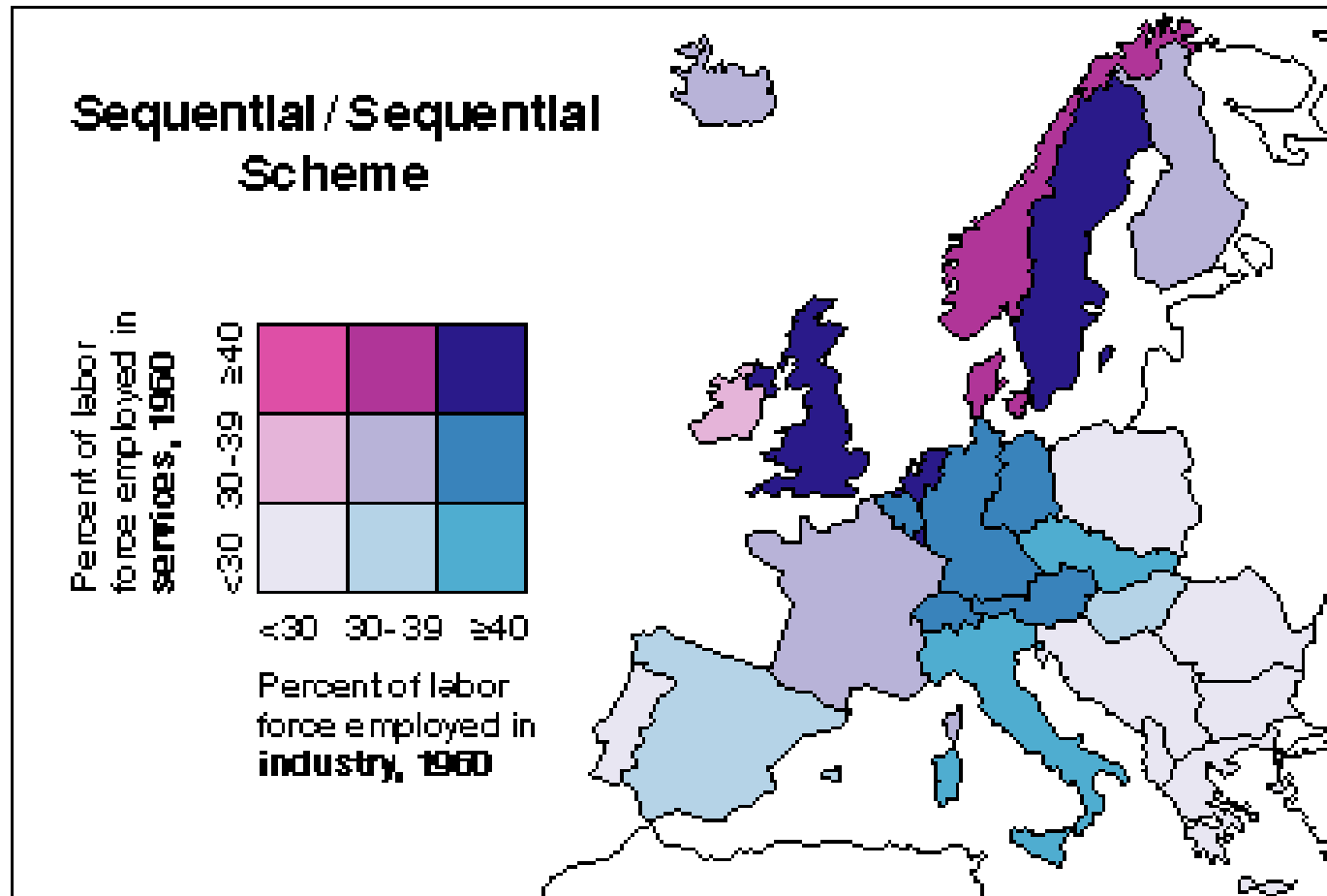
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



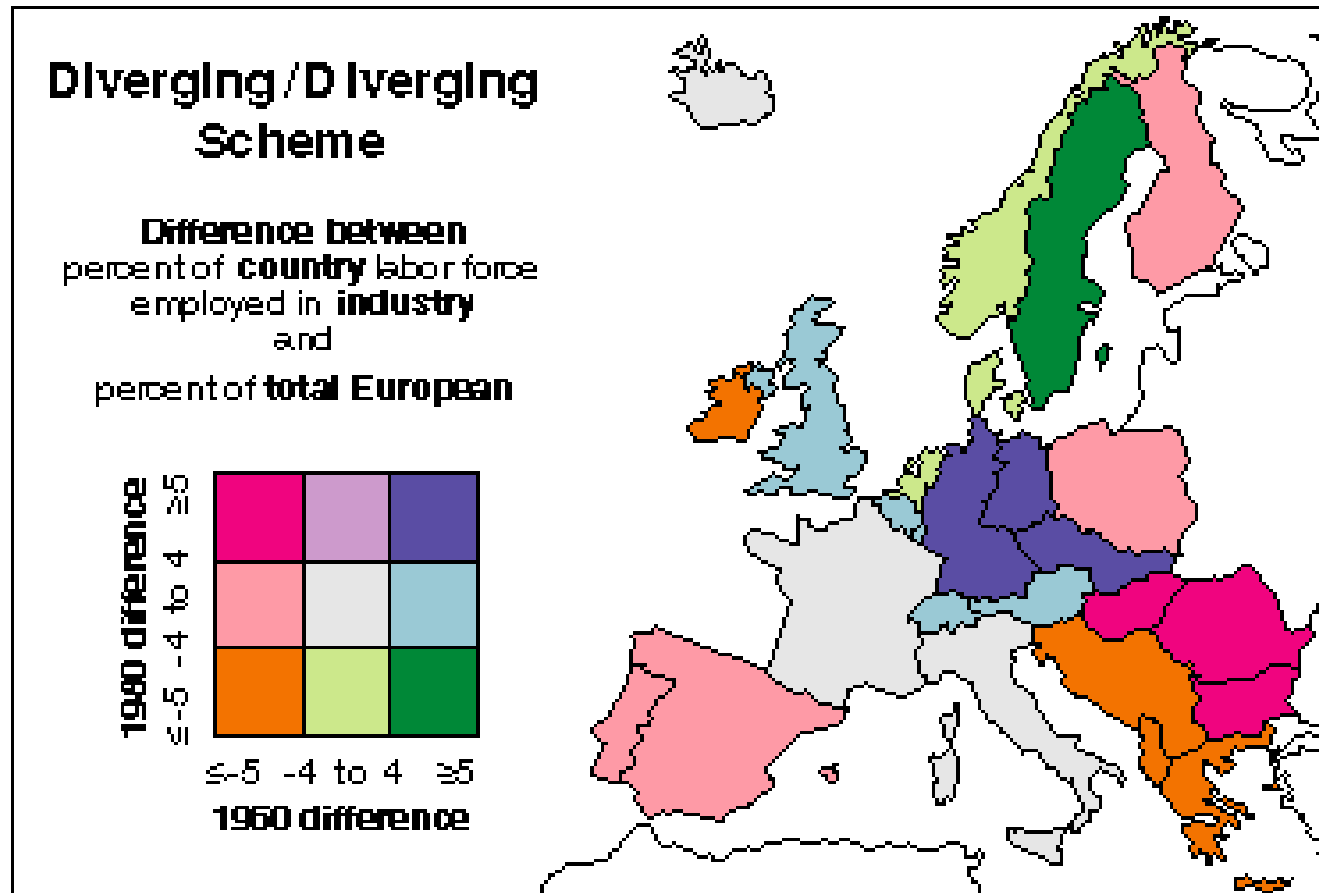
PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



PALETAS CROMÁTICAS: El sistema de Cynthia Brewer



Síntesis: Comparación de los atributos

	Cuantitativos	Ordinales	Nominales
Posición	+	0	-
Tamaño (absoluto)	+	0	-
Orientación (relativo)	-	0	+
Escala de grises (diferencias)	+	0	-
Escala de grises (absoluto)	-	+	-
Paleta arco iris (diferencias)	0	+	+
Paleta arco iris (absoluto)	-	-	+
Forma (diferencias o absoluto)	-	-	+
Textura (diferencias o absoluto)	0	0	+

Algunas Recomendaciones

El contexto, iluminación ambiente, tamaño de la aplicación, etc. modifican la apariencia de los colores.

Cuando sea necesario percibir un color con exactitud, entonces mostrarlo rodeado de un gris neutral.

Diseñar lo más posible en blanco y negro, y luego agregar el color en forma cuidadosa.

Utilizar no más de siete colores diferentes para variables nominales.

Algunas Recomendaciones

Color de fondo: gris o azul medio.

Separar colores inarmónicos por medio de gris.

Diferenciar detalles en luminancia.

Detalles no más pequeños que 3x3 pixels.

Recordar la luminosidad relativa de los colores.

Evitar grandes áreas con color muy saturado.

Evitar rojos y azules muy próximos.

Nunca utilizar la diferencia en azul para presentar detalles.

Bibliografía

- Bauer, B., Jolicoeur, P., and Cowan, W. B. The linearly separability effect in color visual search: Ruling out the additive color hypothesis. *Perception & Psychophysics* 60, 6 (1998), 1083–1093.
- Brewer, Cynthia A. (2005), *Designing Better Maps: A Guide for GIS Users*, Esri.
- D'Zmura, M. Color in visual search. *Vision Research* 31, 6 (1991), 951–966.
- Healey, C. G. Choosing effective colours for data visualization. *Proceedings Visualization '96* (San Francisco, California, 1996), pp. 263–270.
- Roy Hall. *Illumination and Color in Computer Generated Imaginery*. Springer-Verlag, New York, 1988.
- G. Murch. Physiological Principles for the Effective Use of Color. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 4(11):49{54, 1984.
- P. K. Robertson. Visualizing Color Gamuts: a User Interface for the Effective Use of Perceptual Color Spaces in Data Displays. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(5):50{64, 1988.

Bibliografía

- P. K. Robertson y J. O'Callaghan. The Generation of Color Sequences for Univariate and Bivariate Mapping. IEEE Computer Graphics and Applications, 6(2), 1986
- Michael W. Schwarz, William B. Cowan, y John C. Beatty. An Experimental Comparison of RGB, YIQ, LAB, HSV and Opponent Color Models. ACM Transactions on Graphics, 6(2):123{158, 1987.
- M. Stone. Color Printing for Computer Graphics. Technical Report EDL-88-5, XEROX Palo Alto Research Center, 1988.
- M. Stone, W. Cowan, y J. Beatty. Color Gamut Mapping and the Printing of Digital Color Images. Technical Report EDL-88-1, XEROX Palo Alto Research Center, 1988.