
Procesamiento Digital de Imágenes

Color y espacios cromáticos

Manipulación de luminancia y saturación

Claudio Delrieux

Laboratorio de Ciencias de las Imágenes – UNS - CONICET

cad@uns.edu.ar

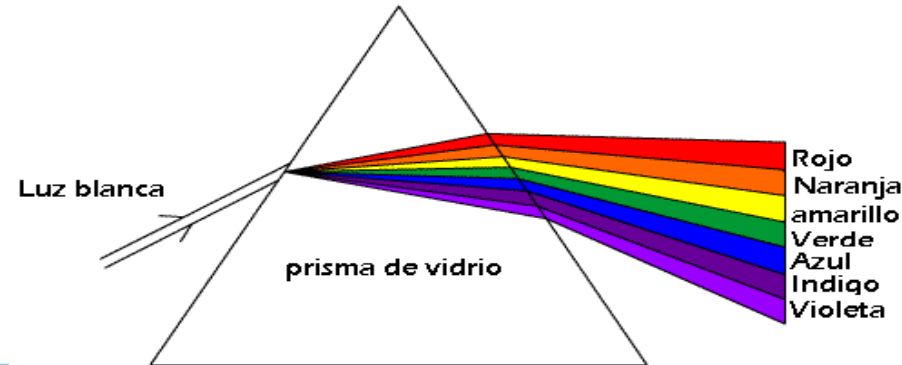
PDI – Color: introducción

Todos conocemos que los dispositivos de reproducción de imágenes (monitores, TV, etc.) utilizan el “espacio cromático” RGB.

Espacio cromático RGB significa que 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.

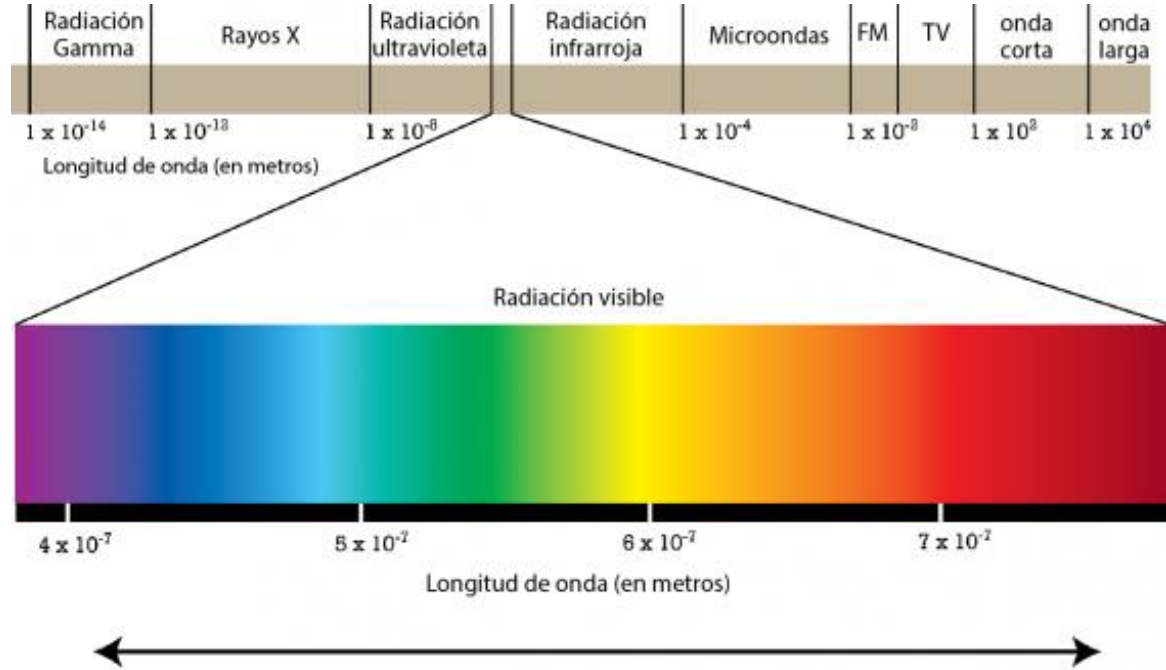
Cómo pueden ambas cosas ser posibles?



PDI – Color: electromagnetismo

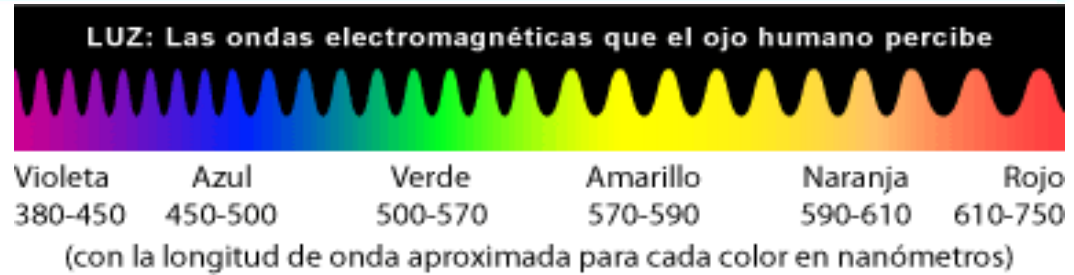
La luz visible es parte (muy pequeña!) de un fenómeno más abarcativo, conocido como *electromagnetismo*, que nos acompaña en la vida diaria en muchos aspectos.

(lectura complementaria):
https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci3n_electromagn3tica



PDI – Color: longitud de onda de la luz

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>

PDI – Color: espectros

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



PDI – Color: espectros

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?

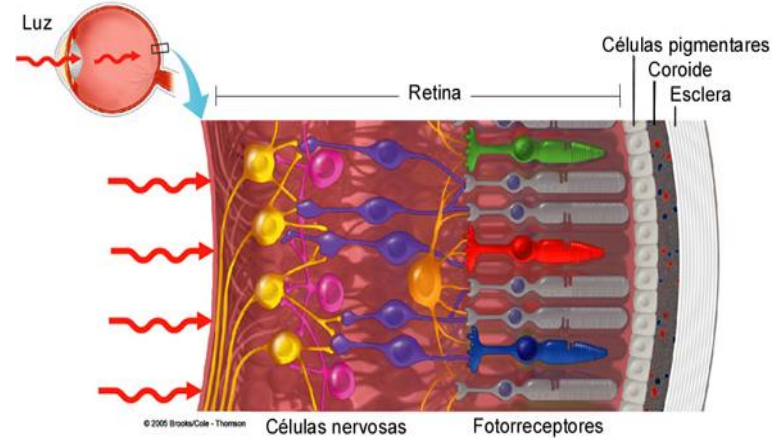
El hecho concreto que responde esta pregunta es que la retina humana contiene solamente tres tipos de receptores, cada uno sensible a una parte diferente del espectro, centrados aproximadamente en la zona del azul, el verde y el amarillo.

PDI – 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).

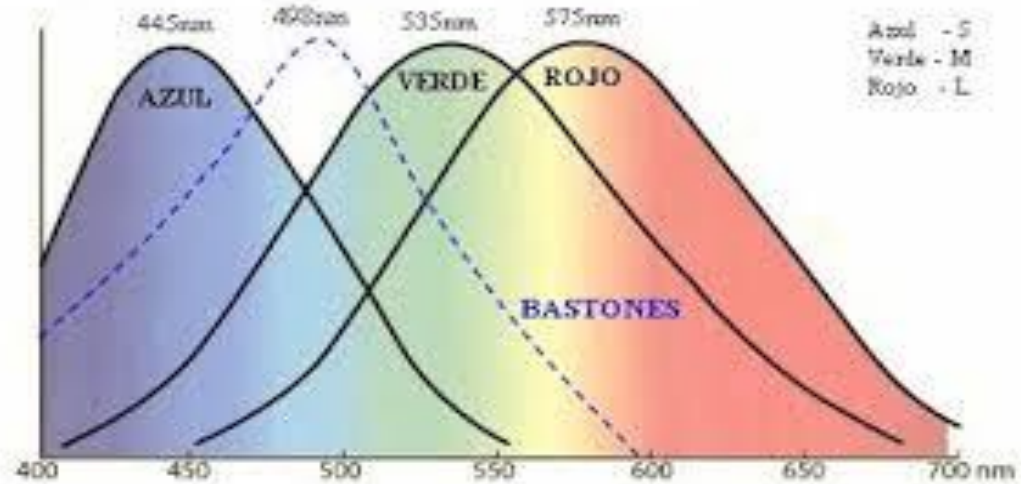
Hay además receptores acromáticos (bastones) que funcionan en condiciones de muy poca iluminación.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Retina>



PDI – Color: los receptores retinianos

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).

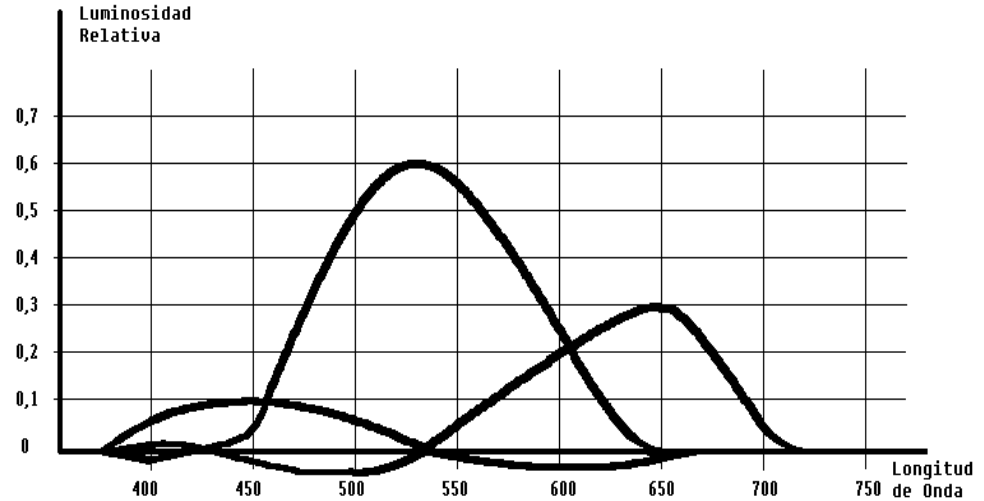


https://es.wikipedia.org/wiki/Percepci3n_del_color

PDI – Color: los receptores retinianos

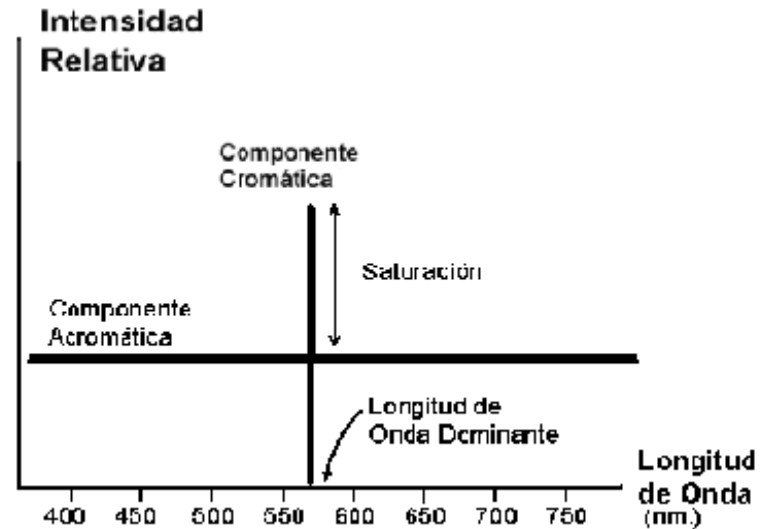
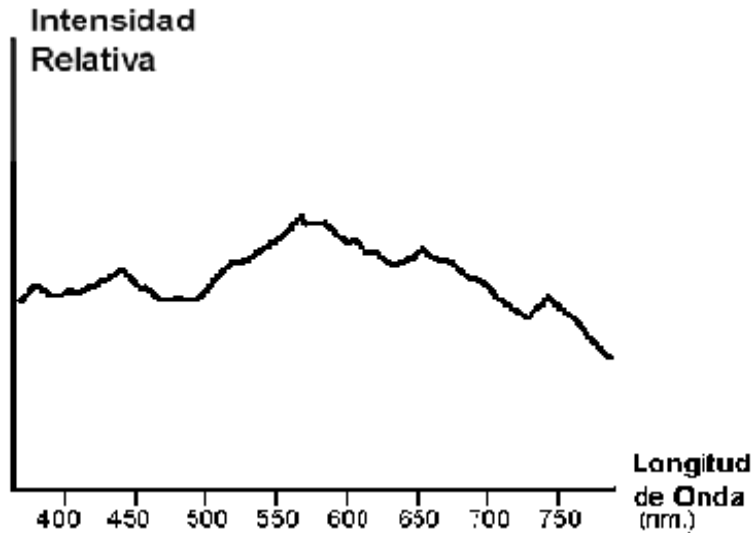
La sensibilidad absoluta es mucho mayor en el verde, mediana en el “rojo”, y muy baja en el azul.

En algunas longitudes de onda, cada uno de los receptores generan un estímulo inhibitor en vez de excitador.



PDI – Color: metamerismo

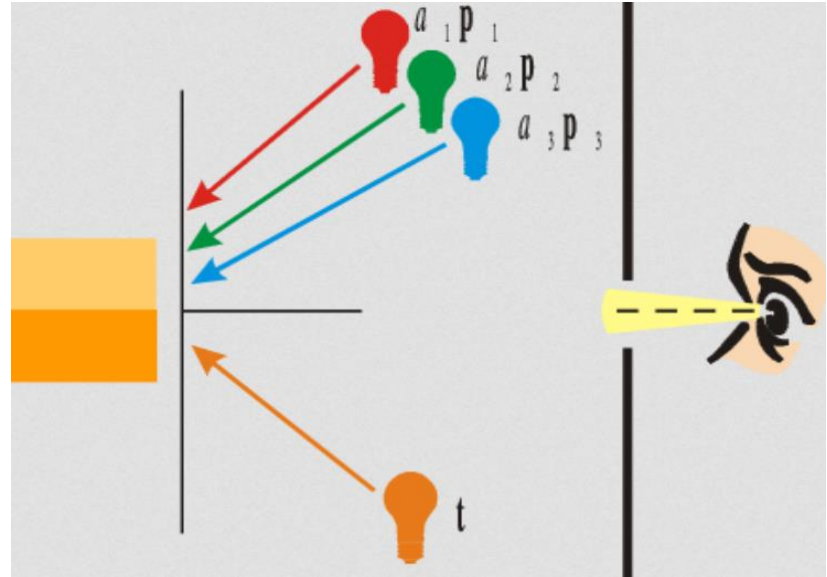
La percepción del color parece organizarse alrededor de una abstracción conocida como equivalente metamérico:



PDI – Color: metamerismo

De esa forma, es posible engañar al ojo humano, haciéndole creer que percibe un color que en realidad no existe, simplemente generando un estímulo que produzca la percepción deseada en la retina.

Como el color depende también del iluminante, una situación común es que dos objetos parezcan del mismo color bajo un iluminante (p. ej., luz fluorescente), pero diferente bajo otro iluminante.

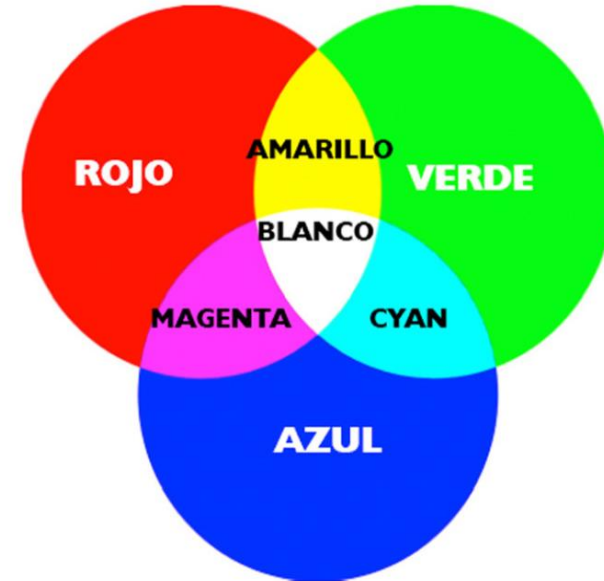
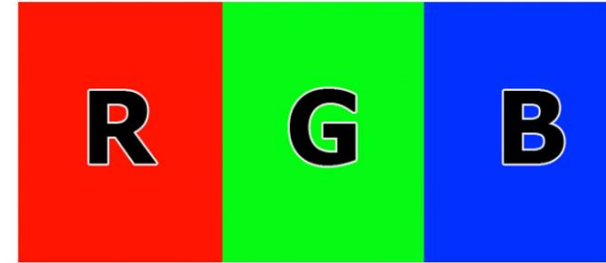


PDI – Color: metamerismo

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.

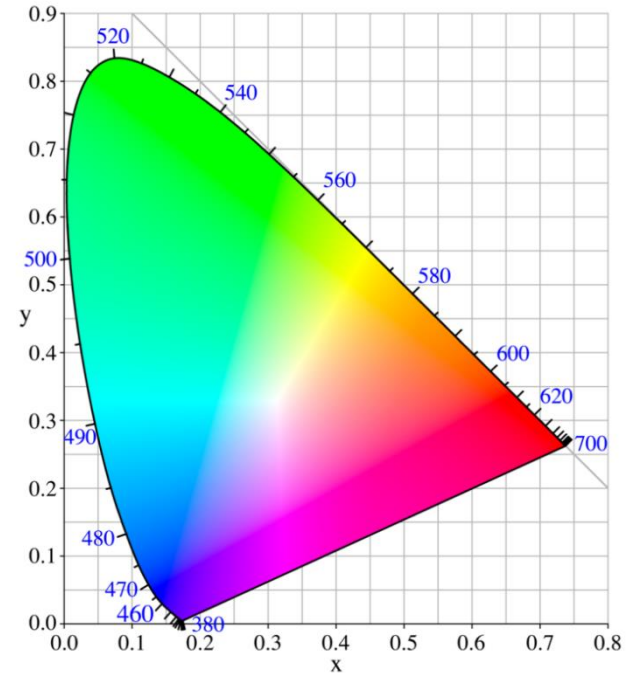


PDI – Color: el espacio XYZ

Los colores perceptibles por el ser humano se pueden representar con un espacio cromático que tiene en cuenta la sensibilidad (positiva y negativa) de los receptores retinianos.

Este espacio cromático se denomina XYZ, y da origen al diagrama de cromaticidades llamado diagrama CIE.

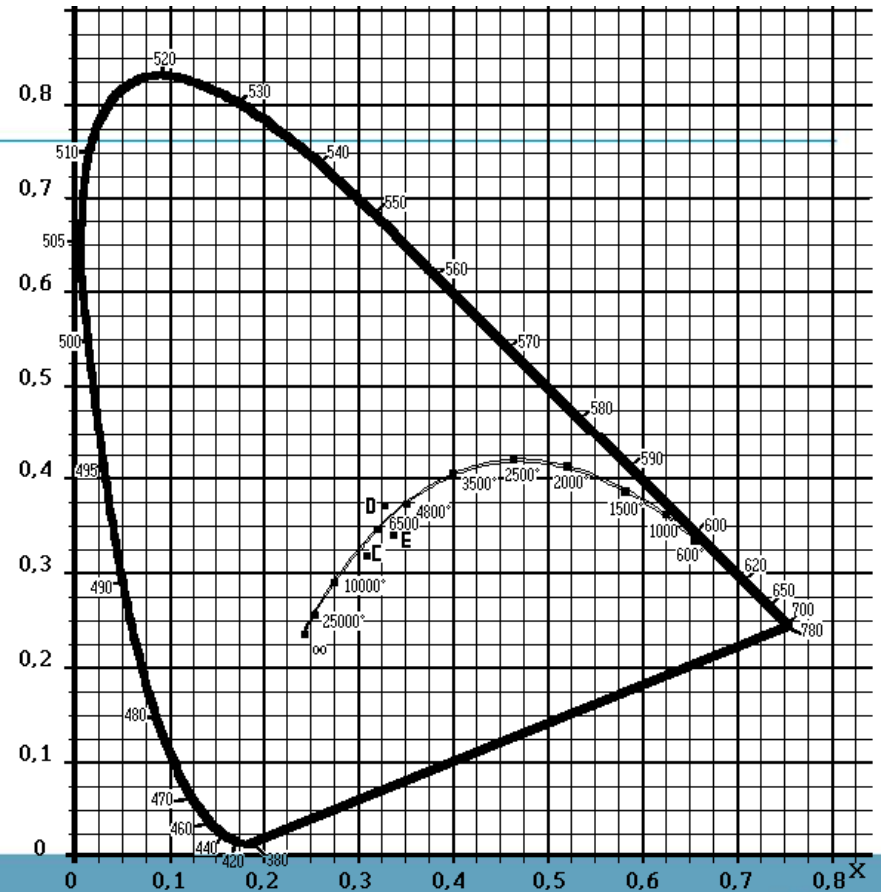
https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_de_color_CIE_1931



PDI – Color: el espacio XYZ

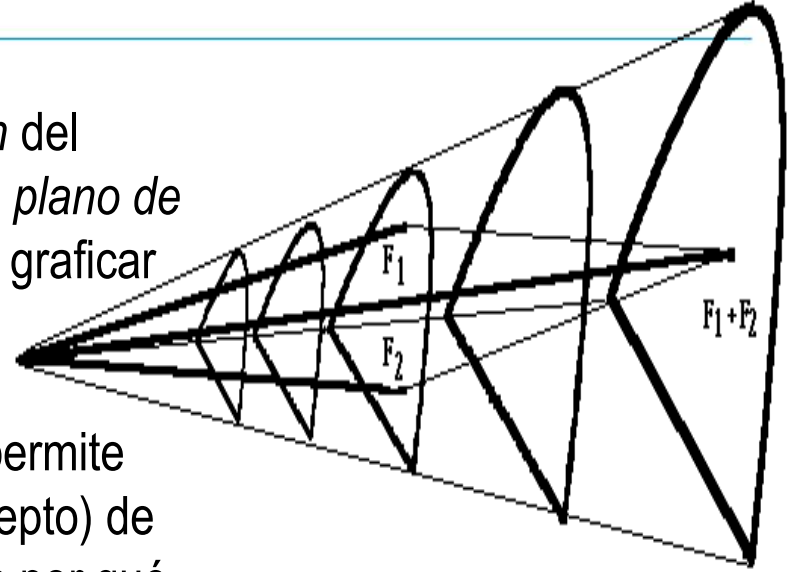
Una “cartografía” del diagrama XYZ muestra varios aspectos reveladores:

- La parte coloreada muestra todas las cromaticidades físicamente realizables.
- La parte curva de la frontera corresponde a los estímulos espectrales puros.
- La curva de la radiación del cuerpo negro.



PDI – Color: el espacio XYZ

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.



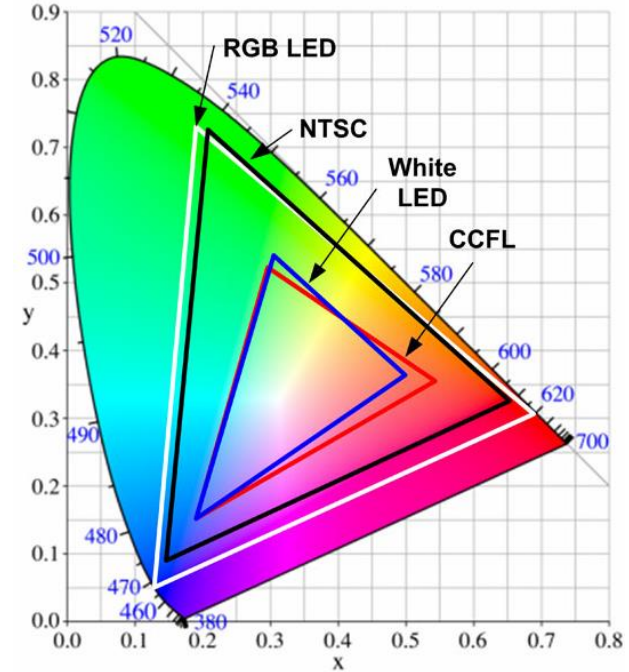
Un aspecto fundamental del espacio XYZ es que permite separar la cromaticidad (ahora explicamos el concepto) de la intensidad luminosa o *luminancia*, lo cual explica por qué cuando subimos o bajamos el *brillo* de monitor o TV, la apariencia de los colores no cambia.

PDI – Color: el espacio XYZ

En el diagrama anterior se intenta ilustrar (con dudoso éxito, que un plano a luminancia constante intersecta el paralelogramo en una línea recta.

Por lo tanto la cromaticidad de la suma de dos estímulos es una combinación convexa de las cromaticidades de cada uno de ellos.

El concepto puede extenderse a TRES puntos y sus combinaciones convexas, dando por resultado la GAMA CROMÁTICA (color gamut).

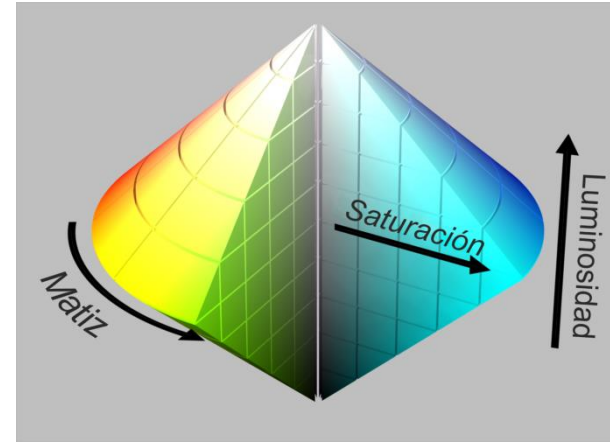


PDI – Color: espacio HLS

Lo que recién denominamos “apariencia que no cambia” de un color cuando se cambia su brillo (*luminancia*) es precisamente la cromaticidad, la cual engloba dos características de la apariencia del color: la pureza (*saturación*) y el “color propiamente dicho” (*crominancia*).

Estas tres características del color (crominancia, luminancia, saturación), da origen a OTRO! espacio cromático, el HSL. Ver que el nombre de la crominancia en este espacio es *Hue*, lo cual es traducido como “matiz” (??).

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

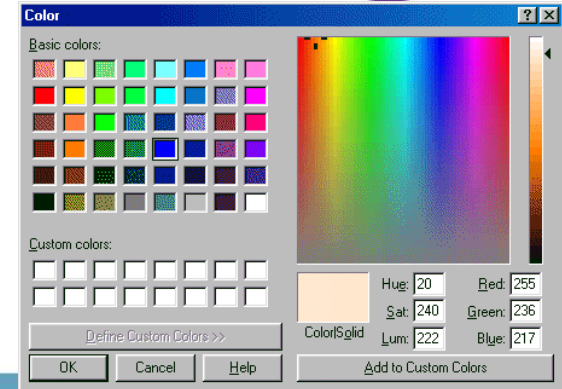


PDI – Color: espacio HLS

El espacio HLS y sus variantes son los más prácticos en el diseño gráfico y artes visuales, por lo que está “naturalizado” en muchos sistemas (vemos acá por ejemplo el de Rudolf Arnheim).

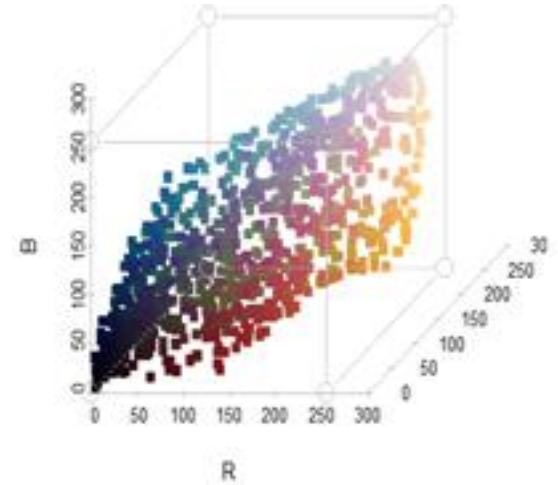
Asimismo en interfaces gráficas se utilizan representaciones al estilo del espacio HLS (es interesante saber cuántos grados tiene el círculo en Microsoft!!).

Otros programas, como el Photoshop muestran cartillas más adecuadas para los diseñadores gráficos.



PDI – Color: El espacio YIQ

Cuál espacio cromático entonces es adecuado para el procesamiento de imágenes? Un punto a tener en cuenta es que si se analiza un gran conjunto de imágenes y se observa cómo se distribuyen los colores de sus pixels en el espacio RGB, se observa una gran correlación mútua (altos R correlacionan con altos G y B, y viceversa).



Por eso se estudió la distribución de la variancia de los colores de los pixels, encontrándose una representación que elimina la correlación. Nace así el espacio cromático con el cual vamos a trabajar en la materia.

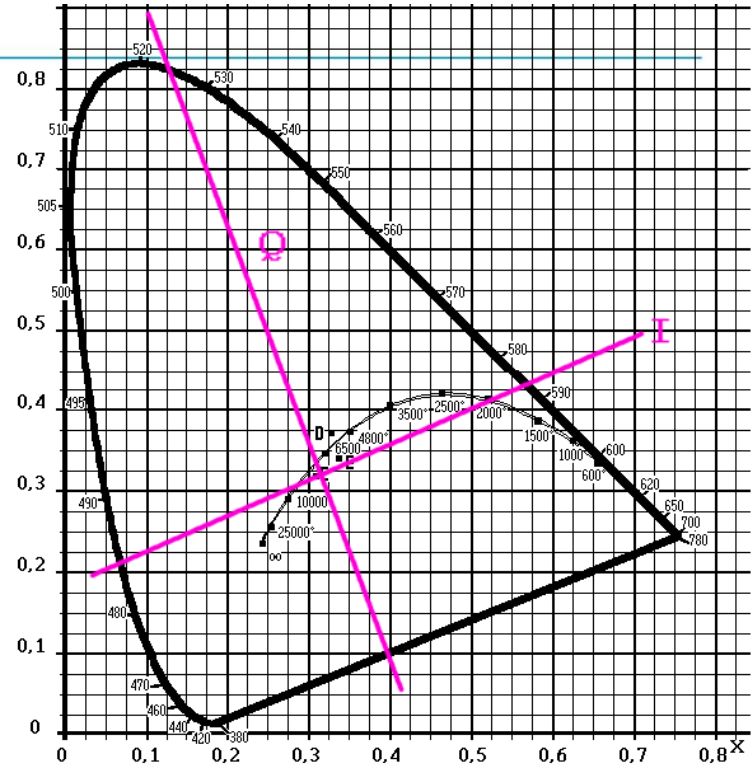
PDI – Color: El espacio YIQ

Los tres ejes de este nuevo espacio se denominan YIQ. Y coincide con el eje de luminancia del espacio XYZ. I y Q están como se muestra en el diagrama.

La importancia de la información perceptual que transmite cada uno de esos valores es aproximadamente 80% Y, 15% I, y 5% Q.

Tampoco es un detalle menor que estos ejes coinciden con los canales oponentes que veremos.

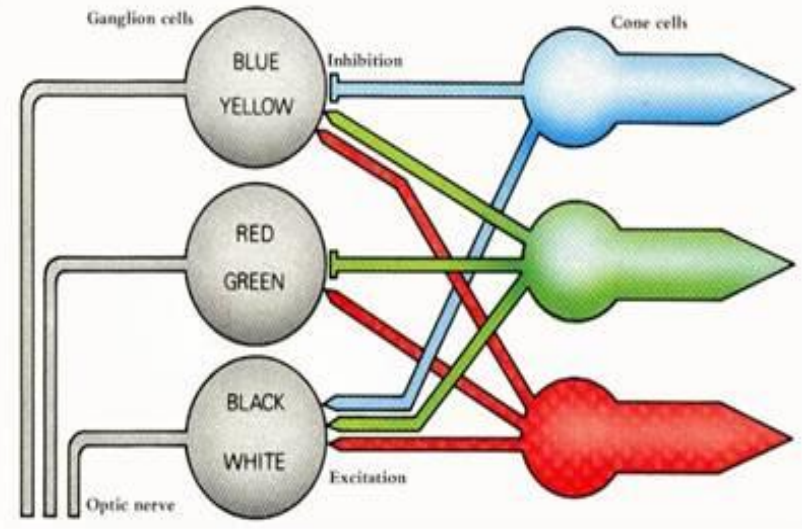
<https://es.wikipedia.org/wiki/YIQ>



PDI – Color: canales oponentes

Las células nerviosas ganglionares mostradas en figura de la retina se combinan los estímulos de cada cono como se muestra en esta figura.

La suma de los tres conos produce el canal blanco-negro, el cono “rojo” menos el verde produce el canal rojo-verde, y el “rojo” más verde menos azul produce el canal amarillo-azul. Estos canales son denominados “canales oponentes”.



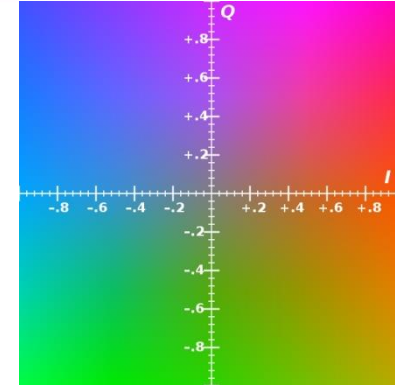
https://en.wikipedia.org/wiki/Opponent_process

PDI – Color: El espacio YIQ

La representación en el espacio YIQ es práctica dado que separa la luminancia (Y) de la cromaticidad. Esta última queda representada como se muestra en el diagrama. Afortunadamente la transformación entre el espacio RGB y el YIQ se basa en un sencillo sistema lineal:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9663 & 0.6210 \\ 1 & -0.2721 & -0.6474 \\ 1 & -1.1070 & 1.7046 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.595716 & -0.274453 & -0.321263 \\ 0.211456 & -0.522591 & 0.311135 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



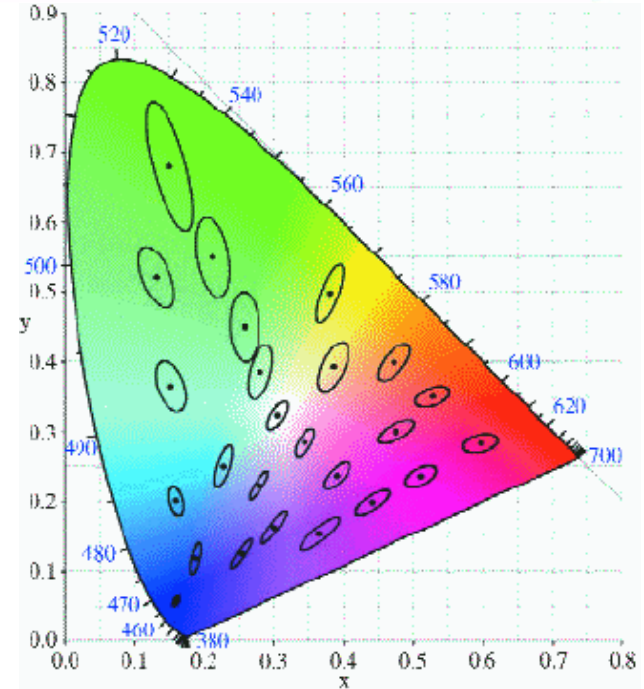
Al utilizar estas ecuaciones, tener en cuenta que los valores de RGB deben estar normalizados (en $[0, 1]$).

Ver la primera fila de la 2da. matriz.

PDI – Color: El espacio YIQ

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.

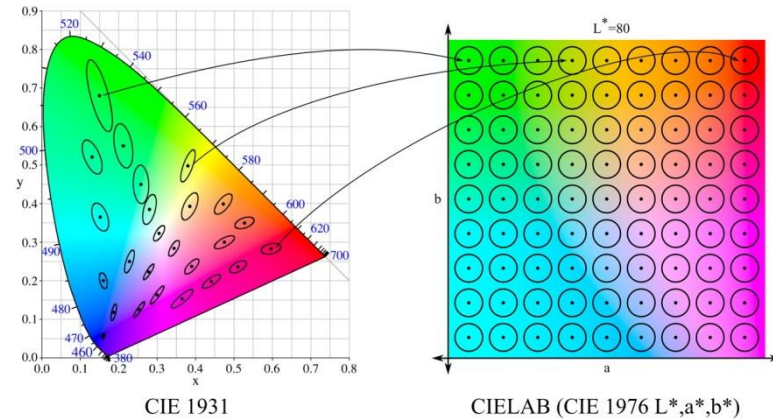
El diagrama a la derecha ilustra las “elipses de McAdams” que contienen los estímulos cromáticos a iguales distancias perceptuales de sus centros.



PDI – Color: Más espacios cromáticos!!!

Para mitigar la dificultad antedicha, 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, $L^*u^*v^*$.

Para streaming de video se utiliza YCrCb (norma MPEG2).



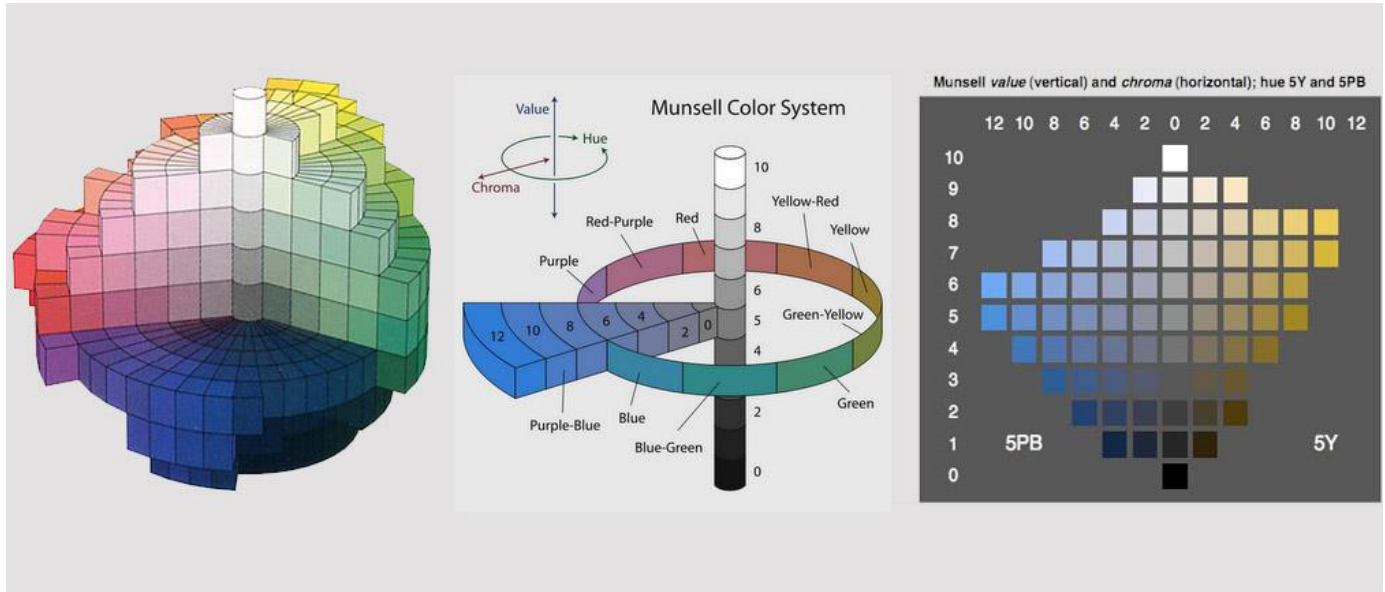
$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.183 & 0.614 & 0.062 \\ -0.101 & -0.339 & 0.439 \\ 0.439 & -0.399 & -0.040 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Ranges:
R/G/B [0 ... 255]
Y [16 ... 235]
Cb/Cr [16 ... 240]

RGB to YCbCr color conversion for HDTV

PDI – Color: Más espacios cromáticos!!!

Existen muchos otros espacios cromáticos, por ejemplo el sistema de Munsell para usos industriales.



PDI – Color: Actividad práctica

La propuesta para esta actividad consiste en manipular independientemente la luminancia y la saturación de una imagen.

Para ello convertimos cada pixel de la imagen del espacio RGB al espacio YIQ, luego alteramos los valores de Y (para cambiar la luminancia) o de IQ (para cambiar la saturación).

Con los nuevos valores de YIQ, convertimos a RGB nuevamente y obtenemos una nueva imagen.

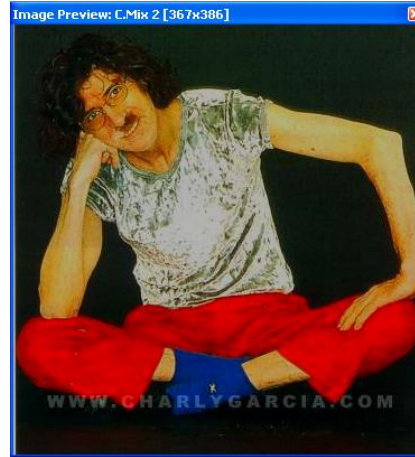
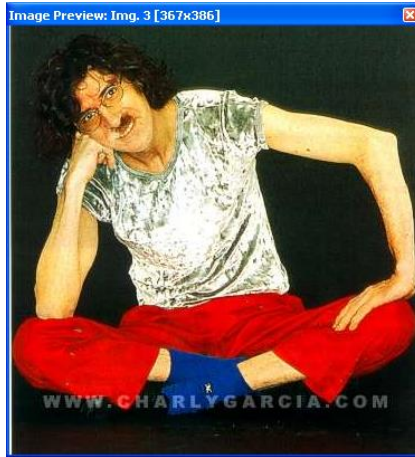
PDI –Color: Actividad práctica

Podríamos llamar α al coeficiente de luminancia (si es menor que uno, baja la luminancia, y viceversa), y β al coeficiente de saturación (si es menor que uno baja la saturación, y viceversa). El workflow a implementar consiste en los siguientes pasos:

1. Normalizar los valores de RGB del pixel
2. RGB \rightarrow YIQ (utilizando la segunda matriz)
3. $Y' := \alpha Y$;
4. $I' := \beta I$; $Q' := \beta Q$;
5. Chequear que $Y' \leq 1$ (para que no se vaya de rango)
6. Chequear $-0.5957 < I' < 0.5957$ y $-0.5226 < Q' < 0.5226$
7. $Y'I'Q' \rightarrow R'G'B'$ (el RGB normalizado del pixel procesado)
8. Convertir $R'G'B'$ a bytes y graficar el pixel

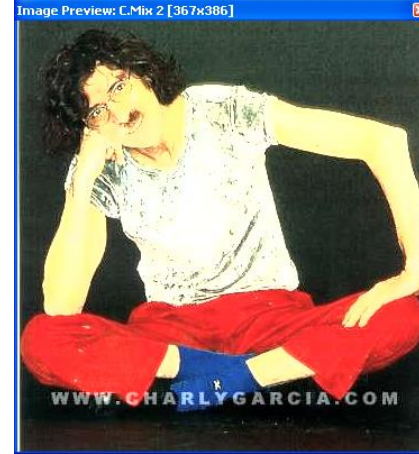
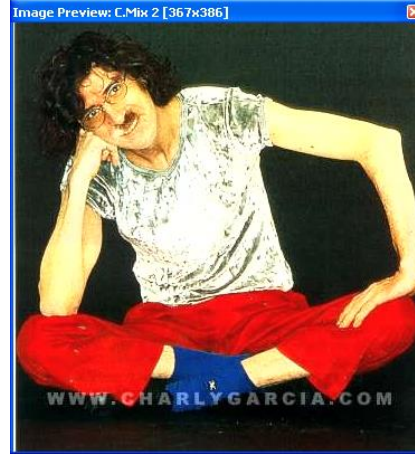
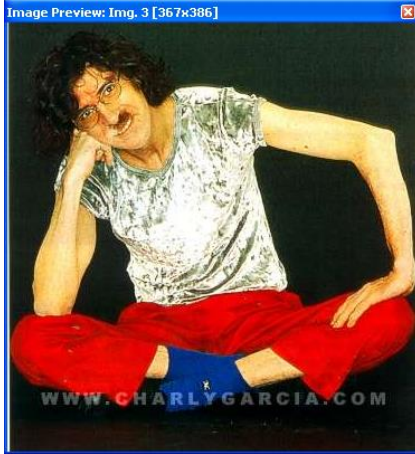
PDI – Color: Actividad práctica

Qué podemos esperar al cambiar α o β ? Como dijimos, un valor de α menor que 1 reducirá la luminancia de la imagen. Vemos abajo la imagen original, y con α 0.7 y 0.4.



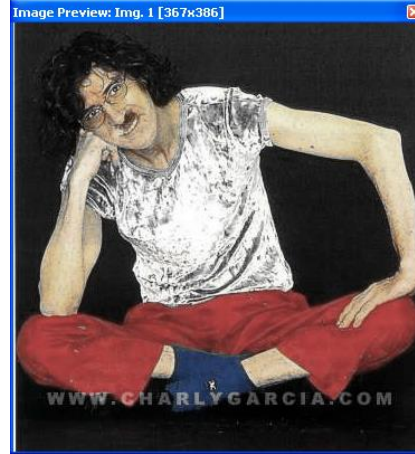
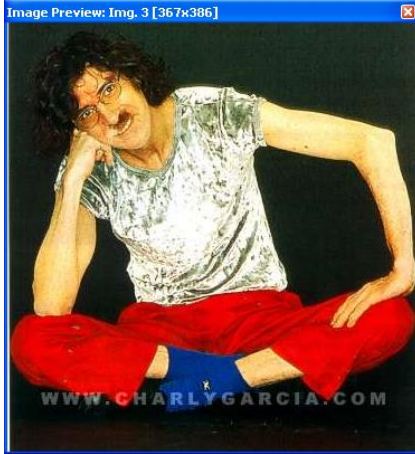
PDI – Color: Actividad práctica

Un valor de α mayor que 1 aumenta la luminancia de la imagen, pero no podemos pasar el valor $Y=1$, lo cual genera “artefactos”. Imagen original, y con α 1.2 y 1.5.



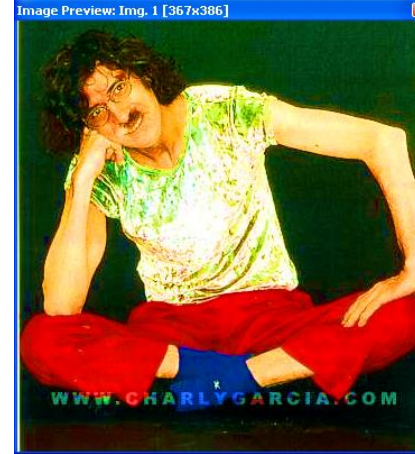
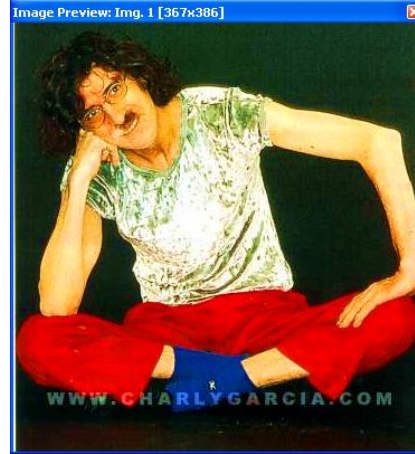
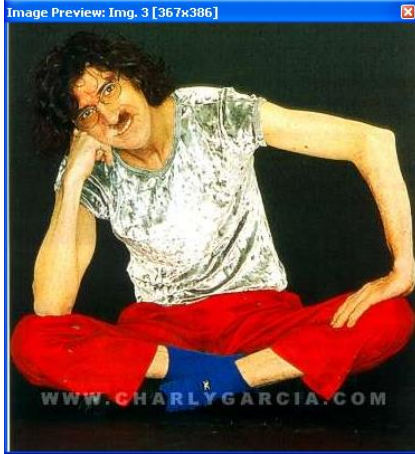
PDI – Color: Actividad práctica

Valores de β menores que 1 disminuyen la saturación (inclusive lleva la imagen a blanco y negro). Imagen original, y con β 0.5 y 0.



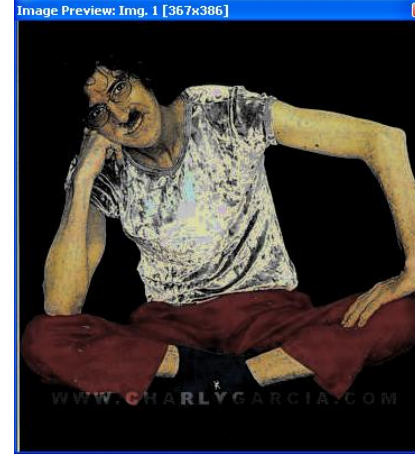
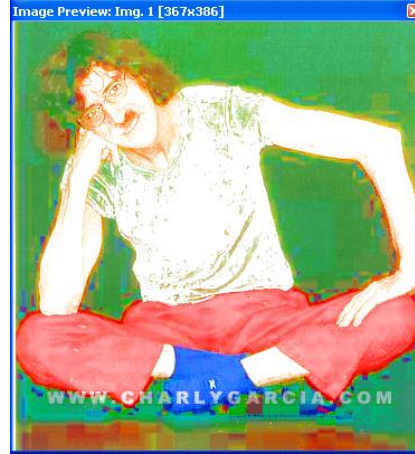
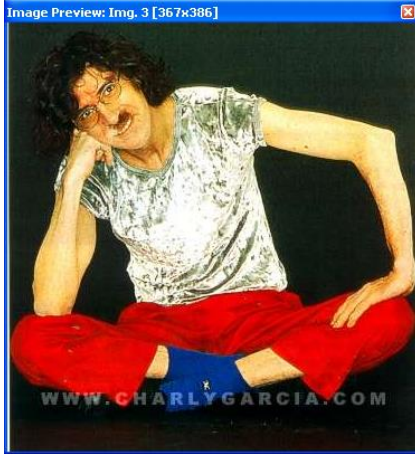
PDI – Color: Actividad práctica

Valores de β mayores que 1 aumentan la saturación. Imagen original, y con β 1.2 y 1.5.



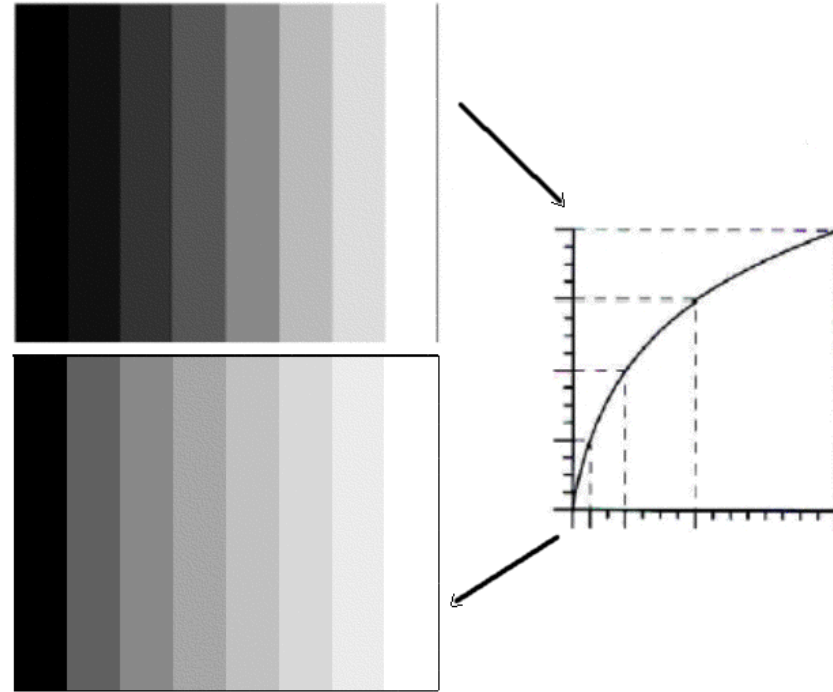
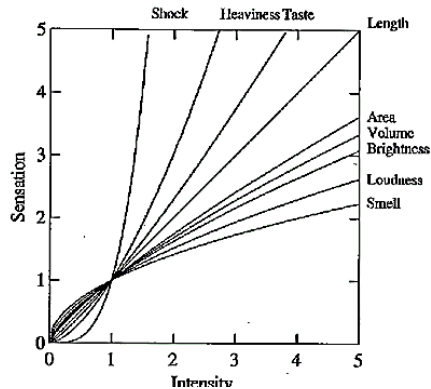
PDI – Color: Actividad práctica

Los valores de α y β pueden combinarse. Qué valores creen que tienen estas imágenes (siempre la de la izquierda es la original)? Ver cómo la manipulación puede hacer notorios los artefactos de la compresión en la imagen original.



PDI – Color: Propiedades de los canales oponentes

Una de las características más importantes de los canales oponentes es su respuesta logarítmica. La mayoría de las magnitudes perceptuales funcionan así!!



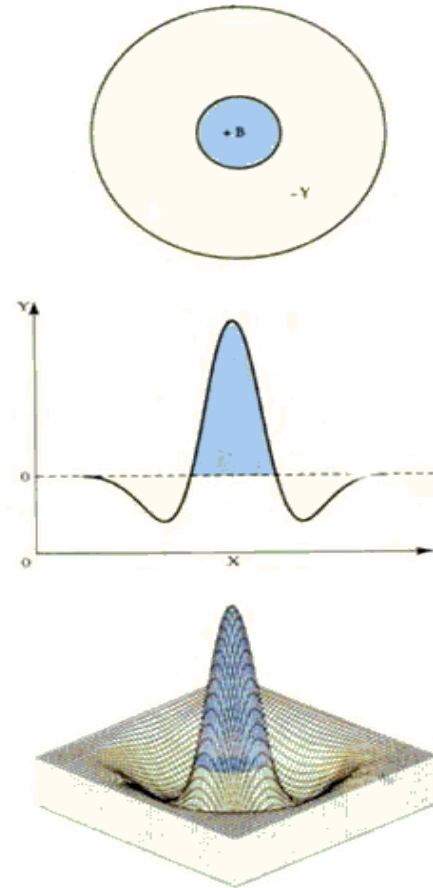
PDI – Color: La inhibición lateral

La respuesta logarítmica de los receptores generaría un problema a la hora de distinguir entre objetos de apariencia muy parecida.

Por ello la transmisión de impulsos nerviosos se caracteriza por enviar una señal inhibitoria (leve) a los vecinos cercanos.

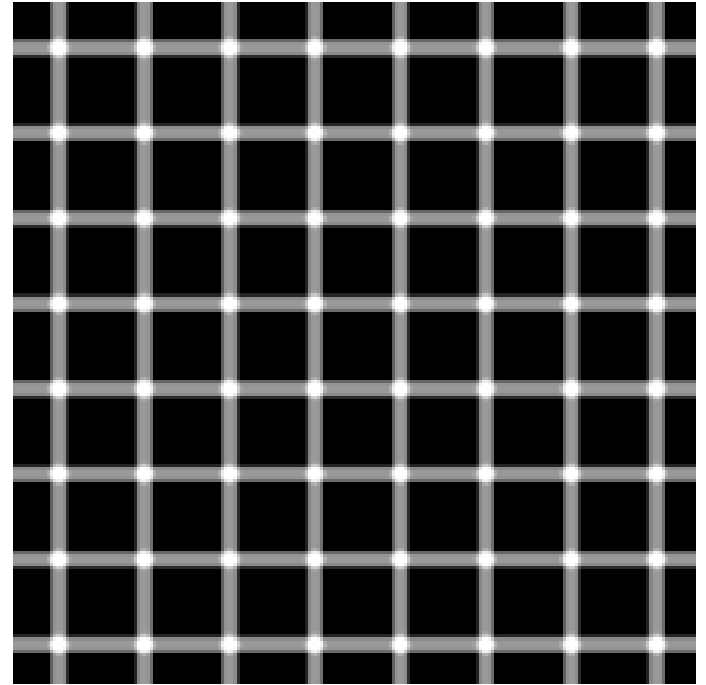
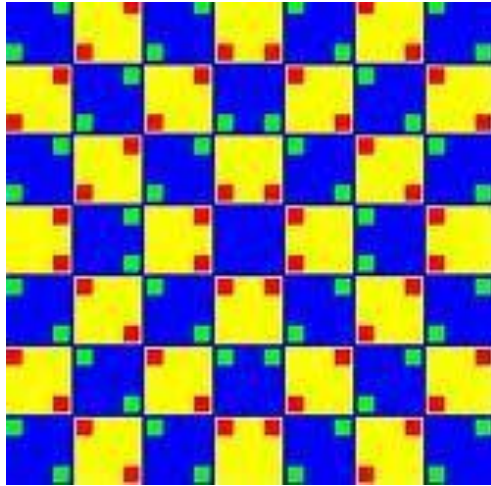
En el caso del nervio óptico, cada estímulo puntual que se transmite de puntos sensibles del ojo al cerebro, genera una inhibición lateral a la transmisión de los puntos vecinos.

Eso ocurre en los tres canales oponentes.



PDI – Color: La inhibición lateral

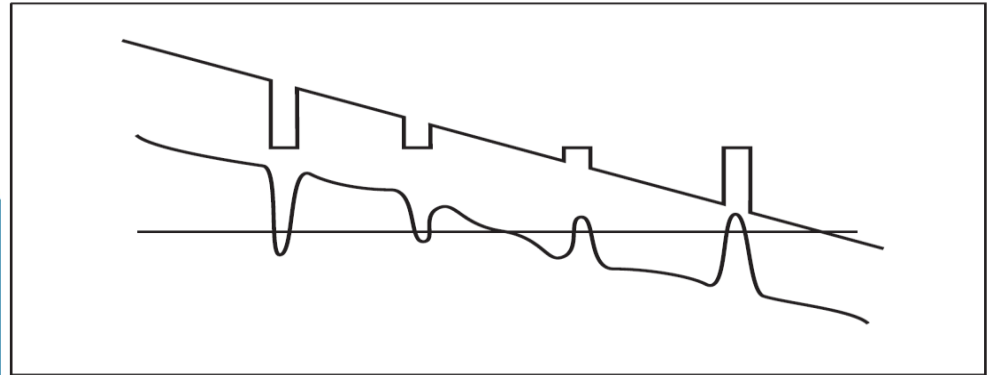
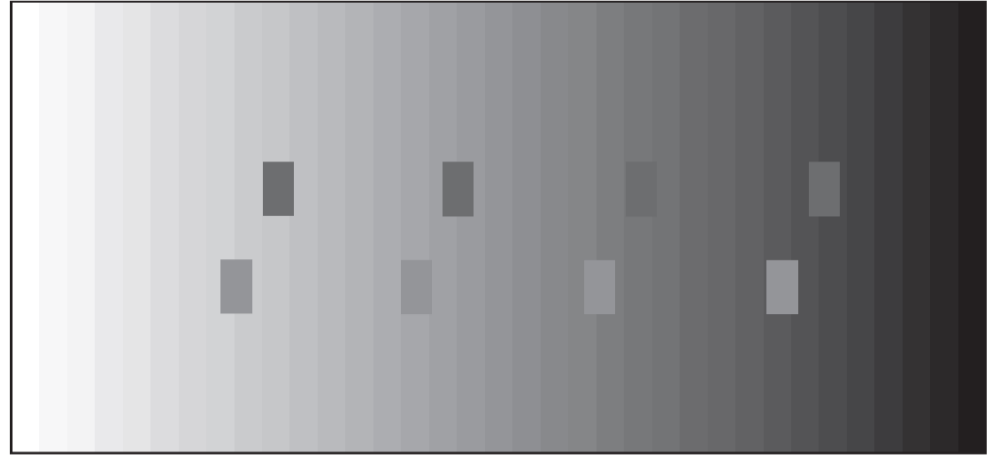
La inhibición lateral genera un sinnúmero de efectos “ilusiones ópticas” como la grilla de Hering (derecha) o la de Harding (abajo)



PDI – Color: La inhibición lateral

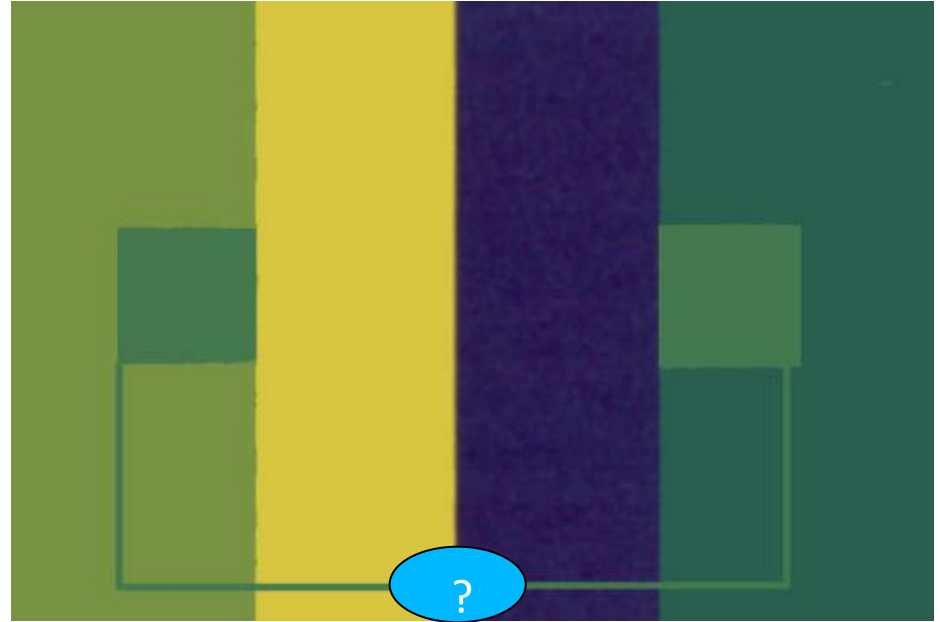
Uno de los efectos más notorios de la inhibición lateral es el llamado “contraste simultáneo”, que impide tener referencias confiables de la apreciación subjetiva de un determinado estímulo.

Vemos a la derecha la luminancia real y la percibida a lo largo de una scan-line.



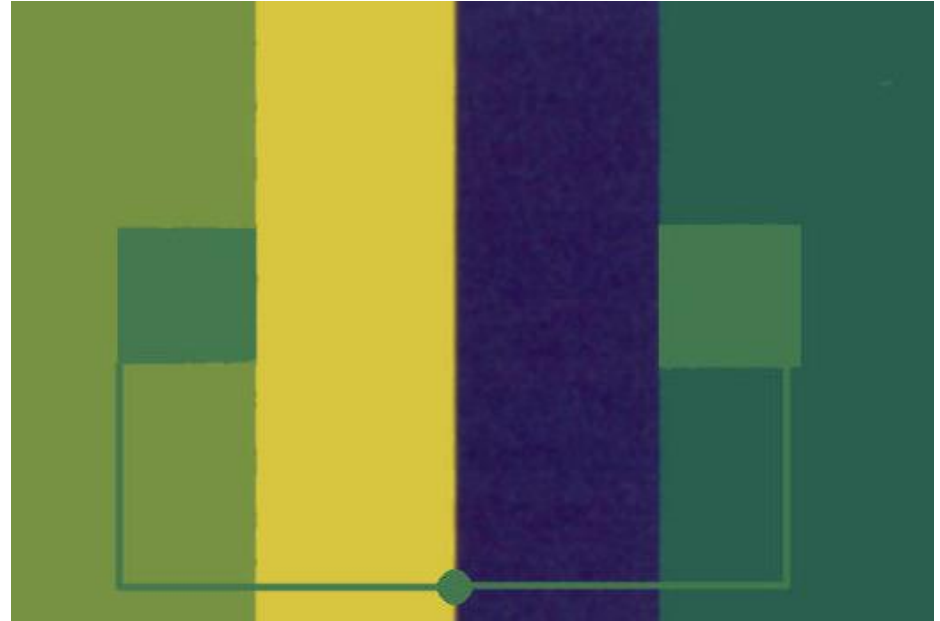
PDI – Color: La inhibición lateral

La inhibición lateral no es privativa de la luminancia: ocurre en todos los canales oponentes, por lo que se puede también tener una percepción distorsionada del “color” de un objeto en función de su entorno.



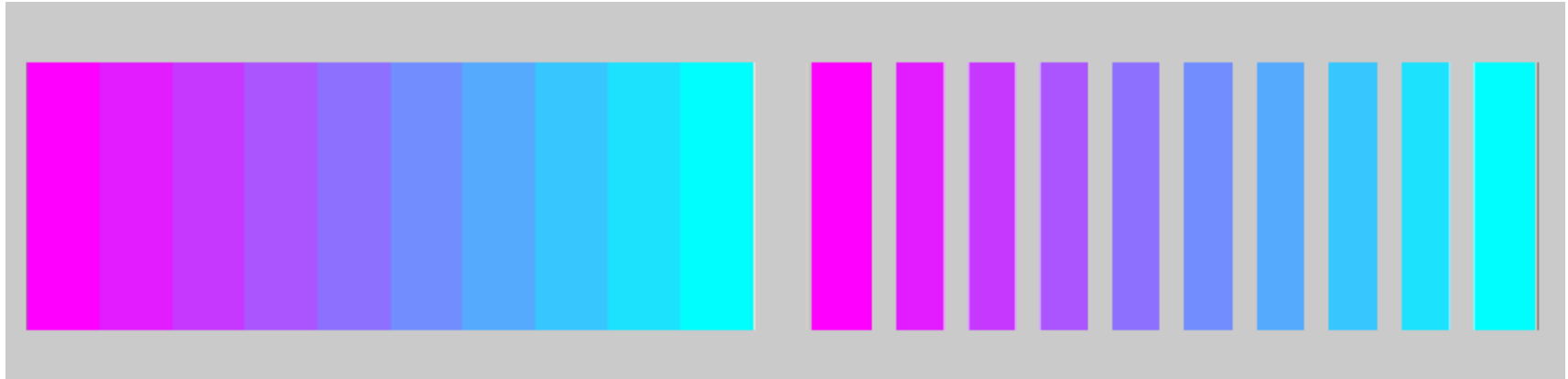
PDI – Color: La inhibición lateral

La inhibición lateral no es privativa de la luminancia: ocurre en todos los canales oponentes, por lo que se puede también tener una percepción distorsionada del “color” de un objeto en función de su entorno.



PDI – Color: Las bandas de Mach

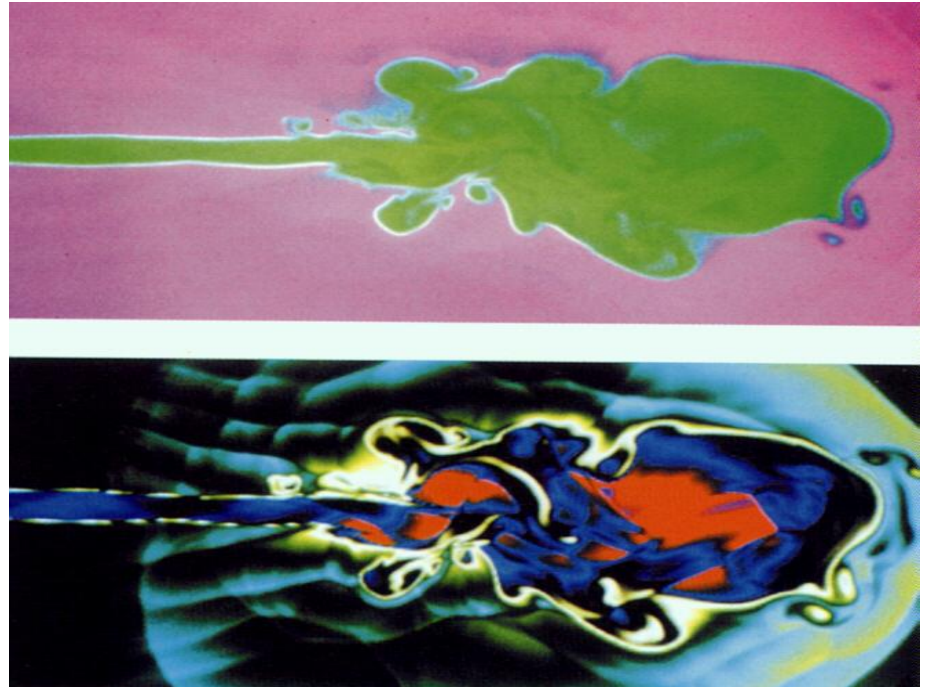
La inhibición lateral produce además otros tipos de fenómenos “paradójicos”, como ser objetos de color plano que se perciben de “color” diferente en cada una de sus partes.



PDI – Mapas cromáticos (“paletas”)

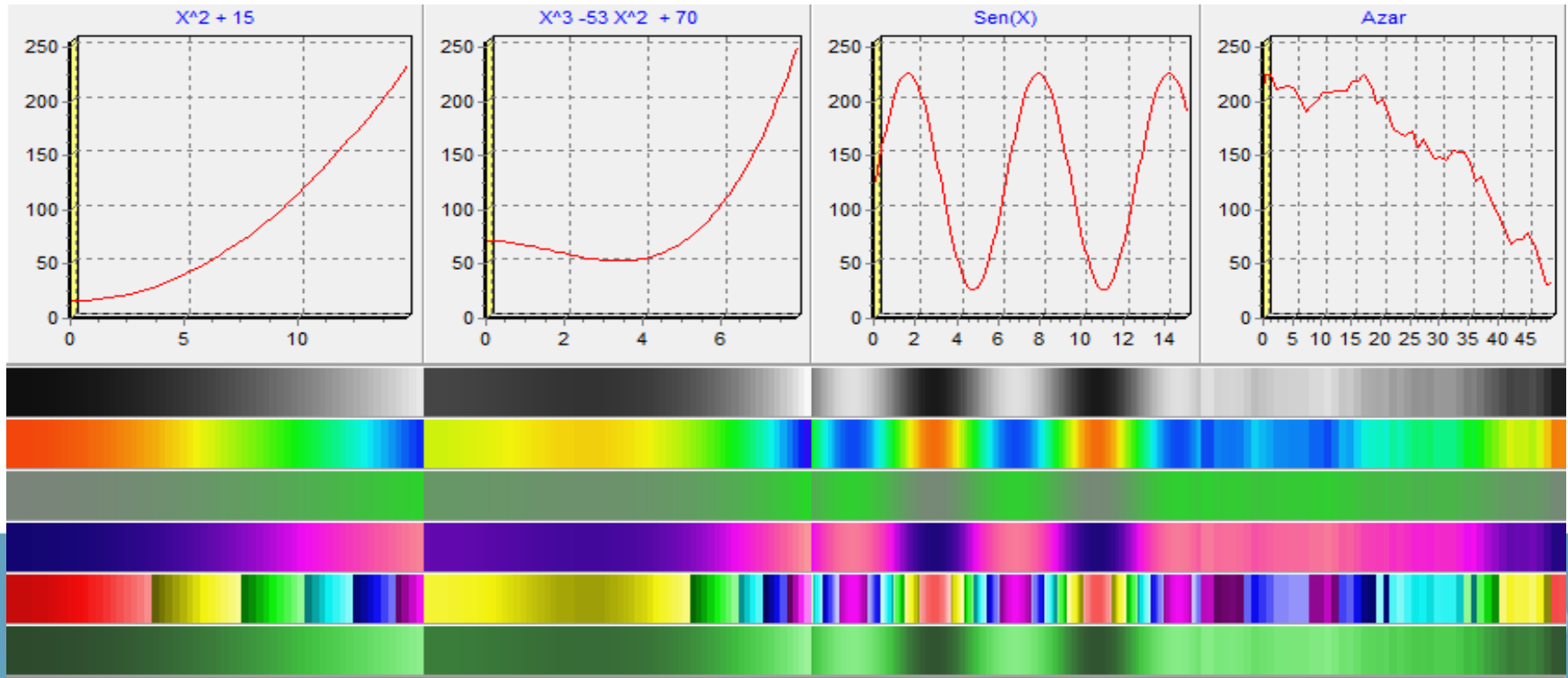
La apariencia de un objeto abstracto (un “dataset”) puede cambiar significativamente por medio del uso de mapas cromáticos diferentes.

El dataset muestra una simulación en mecánica de fluidos. La primera representación omite detalles relevantes? La segunda distrae?



PDI – Mapas cromáticos (“paletas”)

Algunas funciones matemáticas 1D representadas con diferentes paletas.



PDI – Mapas cromáticos: actividad práctica

La propuesta para esta actividad consiste en utilizar algunos datasets 2D (pueden ser mapas de altitud, de temperatura, etc.) y “visualizarlos” con diferentes paletas, incluyendo la de niveles de gris y la arco iris:

