



UMBRALES DE DISCRIMINACIÓN CROMÁTICA Y SU APLICACIÓN A UN ALGORITMO DE FILTRAJE DE IMÁGENES DIGITALES



Máster en Optometría Avanzada y Ciencias de la Visión

M^a Carmen García Domene

Dolores de Fez Saiz Doctora en Físicas y Profesora titular en la Universidad de Alicante y **M^a José Luque Cobija** Doctora en Físicas y Profesora titular en la Universidad en Valencia.

CERTIFICAN: que **M^a Carmen García Domene** ha realizado bajo su dirección el Trabajo de Investigación que se recoge en la presente memoria.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en:

Alicante, a de de 2008.

Dolores de Fez

M^aJosé Luque

Director del Dpto.

Agradecer la oportunidad de realizar este trabajo a mis dos directoras. Ya que me han ayudado, enseñado y apoyado en todo momento, además de iniciarme en este mágico mundo de la investigación. Gracias también a mis compañeros, familia, amigos y demás que, engañados, cometieron el error de entrar en el laboratorio.

Gracias a todos, pobres e inocentes observadores, que pasaron a formar parte de “mis elipses”.

ÍNDICE

1. Objetivo.....	13
2. Introducción.....	17
2.1 El color.....	19
2.2 Colorimetría.....	23
2.2.A Principios de colorimetría.....	23
2.2.B Trivarianza visual.....	23
2.2.C Representación del color.CIE1931xy...	27
2.2.D Espacio ATD de Guth (1995)	33
2.3 Apariencia del color y umbrales.....	36

2.3.A Adaptación y constancia del color.....	37
2.3.B Umbrales cromáticos.....	38
2.3.C Elipses de discriminación cromática.....	42
2.4 Filtros coloreados.....	48
2.4.A Tipos de espectro.....	49
3.Materiales y medidas experimentales.....	53
3.1 Filtros.....	55
3.2 Fase de adaptación.....	58
3.3 Equipo informático y software.....	58

3.3.A Tarjeta gráfica.....	58
3.3.B Monitor CRT, Mitsubishi HL-7955SKTKL.	59
3.3.C Software Colour Cambridge Test.....	66
3.3.D Software Matlab.....	70
3.4 Elección de colores y espacio de representación.....	71
3.5 Observadores.....	77
3.6 Descripción de la sesión.....	77
4. Resultados.....	81
5. Análisis de resultados.....	93
5.1 Filtrado de imágenes digitales.....	104

6. Conclusiones.....	115
7. Bibliografía.....	123
7.1 Libros.....	125
7.2 Artículos y revistas.....	128
7.3 Webs.....	129
8. Anexos.....	131

O
B
J
E
T
I
V
O

Objetivo

Este estudio trata de conseguir un algoritmo de filtraje de imágenes digitales utilizando la interpolación de los umbrales de discriminación cromática experimentales del sistema visual humano, teniendo en cuenta, en particular, el cambio en la sensibilidad que se produce cuando se antepone un filtro coloreado.

Se trabaja con un soporte informático para la caracterización de las imágenes que se presentan al observador, con lo que las conclusiones deben ser interpretadas para este tipo de representaciones.

Para ello, realizaremos la medida de una serie de elipses de discriminación cromática, distribuidas uniformemente dentro del diagrama cromático, valiéndonos del software Colour Cambridge Test. A continuación el algoritmo del modelo de visión nos proporcionará el rellenado del resto del diagrama cromático mediante un proceso de empaquetamiento de elipses.

Por último, haremos actuar estos umbrales de discriminación sobre una serie de imágenes digitales con el fin de simular el efecto de los umbrales del sistema visual humano y reconocer las zonas de colores que, aunque con diferente especificación colorimétrica en la imagen original, tienen la misma apariencia para el observador.

I
N
T
R
O
D
U
C
C
I
Ó
N

Introducción

1.1 EL COLOR

La Comisión Internationale de l'Eclairage, CIE, nos proporciona las definiciones relevantes sobre el color.

El **color** es un atributo de la percepción visual, ligado tanto a los objetos como a la luz que los ilumina. Percibimos los colores gracias a la sensibilidad a las diferentes longitudes de onda de la luz que llega al ojo y a la capacidad del sistema visual para interpretarlos como distintos y asignarles un nombre (rojo, verde, azul,...).

El interés por el color es prácticamente universal: lo estudian científicos e ingenieros, se utiliza en industrias, y juega un papel importante en muchas profesiones, en particular en el arte y el diseño. En la vida cotidiana nos valemos del color como señal informativa, ya sea en semáforos, carteles, etc.... En cada campo el color se definirá de una manera pero siempre estará vinculado a la luz y la visión.

La **colorimetría** es la ciencia que se encarga de la medida del color. Esto no es fácil ya que se trata de describir numéricamente una sensación.

El **estímulo color** es la energía radiante de una intensidad y composición espectral dada que, al entrar en el ojo, produce sensación de color y se puede medir

Introducción

físicamente. Para definir un estímulo de color se utilizan tres magnitudes físicas:

-Luminancia, magnitud fotométrica correspondiente a la radiancia, que nos da el flujo por unidad de área y de ángulo sólido. Se trata, pues, de la cantidad de luz que va a percibir el observador, porque ya incluye la información sobre la respuesta del ojo según la longitud de onda de la luz.

-Dominante: puede comprobarse experimentalmente que todo color se puede igualar a una mezcla de un acromático de referencia (blanco) y un color monocromático de cierta longitud de onda o un púrpura puro, al que llamamos dominante. Si el sistema visual fuese lineal, el tono del color coincidiría con el del dominante.

-Pureza colorimétrica, cantidad que expresa la relación entre la luminancia del dominante, en la mezcla que iguala al color problema, y la luminancia de ese color problema.

Se define **color percibido** como: "... el aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura por la diferencia en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación". También se define el **color psicofísico** como el atributo de la radiación visible mediante el cual un observador puede distinguir entre dos

campos del mismo tamaño, forma y textura por la diferencia en la composición espectral.

Para definir un color percibido bastan tres atributos perceptuales, a los cuales nos referiremos como los “atributos del color”. Estos atributos son: **luminosidad**, **colorido** y **tono**, si se trata de colores aislados (son vistos ellos solos sin entorno o con una periferia acromática uniforme) o **claridad**, **croma** y **tono** si se trata de colores relacionados (son vistos rodeados de otros colores)

-Atributos para colores aislados

- **Luminosidad**: atributo del color por el cual un campo parece emitir más o menos cantidad de luz.

- **Tono**: atributo del color que permite caracterizar un estímulo con los términos *rojo*, *verde*, *amarillo* o *azul*, o con combinaciones de dos de ellos. Podemos diferenciar entre color cromático, color percibido que posee tono y color acromático, color percibido que no posee tono (grises).

- **Colorido**: atributo del color por el cual un campo parece presentar un color percibido más o menos cromático.

Introducción

-Atributos para colores relacionados

- **Claridad:** luminosidad de un campo determinada en proporción a la luminosidad de un campo igualmente iluminado que se percibe como blanco o perfectamente transparente.

- **Croma:** atributo del color por el cual un campo parece presentar un color percibido más o menos cromático en proporción a la luminosidad de un campo igualmente iluminado que se percibe como blanco o perfectamente transparente.

- **Tono:** La definición es la misma que para colores aislados.

El estímulo se puede describir mediante magnitudes físicas y el color percibido mediante descriptores perceptuales. Entonces podemos decir que hay una relación entre ambos descriptores:

- luminosidad o claridad y la luminancia
- tono y longitud de onda dominante
- colorido o croma y pureza colorimétrica

Pero estas relaciones no son unívocas y lineales, sino que existen interacciones entre todos estos descriptores, dando lugar a una serie de efectos visuales ampliamente descritos en la bibliografía. [Capilla 2002].

1.2 COLORIMETRÍA

1.2.A PRINCIPIOS DE COLORIMETRÍA

Como ya hemos dicho, la ciencia que se encarga de la medida del color es la colorimetría. En colorimetría se cuantifica cada uno de los atributos del color: un determinado color se expresa mediante números y se representa en un diagrama 2D o 3D (Espacios de representación cromática). Esto no siempre resulta fácil, ya que se trata de evaluar objetivamente (con números) una sensación que es subjetiva.

La colorimetría se basa en la **trivarianza visual** y en las llamadas **leyes de Grassman**. Dos colores cuya especificación sea igual deben ser vistos iguales por un mismo observador y dos colores que sean vistos iguales deben tener la misma especificación numérica. Además, los números deben ser funciones continuas de los parámetros físicos que definen la distribución de flujo radiante espectral de los estímulos.

1.2.B TRIVARIANZA VISUAL

Como regla general, un color se caracteriza mediante tres parámetros y, por tanto, mediante tres números. A pesar de esto, algunos colores requieren menos de tres:

Introducción

-En los colores **acromáticos** (grises) bastará con conocer el valor de la luminancia; por tanto con un solo parámetro podemos describirlo.

-En los colores **monocromáticos** necesitamos saber la longitud de onda y la luminancia. No obstante, en la naturaleza no se encuentran colores monocromáticos. [Artigas, 1995]

Para el caso general, el color es un color **mezcla** (compuesto por muchas longitudes de onda). En este caso deberíamos saber todas las longitudes de onda que lo componen y la luminancia para cada una de ellas. En realidad esto se simplifica mucho gracias al metamerismo. Cualquier color mezcla puede igualarse con una suma de un color del espectro o un púrpura puro, -el color dominante-, más un blanco equienergético. Por lo tanto, se describe cualquier color mezcla con tres parámetros: la luminancia, la longitud de onda del color espectral, (**longitud de onda dominante**, λ_d) o la longitud de onda complementaria del púrpura puro, y la proporción de blanco y estímulo dominante (**pureza colorimétrica**, p_c).

Definimos **metamerismo** como la propiedad que tiene el sistema visual para percibir como idénticos dos estímulos luminosos que son espectralmente diferentes. Se debe a que el sistema visual no es capaz de

analizar todas las longitudes de onda que componen el estímulo. Para dos colores metámeros sus especificaciones colorimétricas deben ser iguales, pero no así cada una de sus componentes espectrales. Depende, a su vez, del observador, ya que dos colores metámeros para un observador pueden ser vistos como diferentes por otro. El grado de metamerismo viene dado de forma cualitativa según las diferencias espectrales: a mayor diferencia mayor grado de metamerismo.

Por otra parte se comprueba experimentalmente, con la ayuda de un colorímetro y gracias a la propiedad del metamerismo, que se puede igualar un color cualquiera a la suma ponderada de tres luces primarias (por ejemplo R, G, y B). Ésta es otra forma de demostrar que la visión del color es trivariante. Se puede definir, en cualquier espacio de representación del color, los valores triestímulo que caracterizan un color como la relación entre la cantidad de luz primaria para igualar ese color y la cantidad del mismo primario para igualar el estímulo blanco.

La ventaja que presenta el mecanismo de igualación de colores es que cumple una serie de propiedades matemáticas:

-Ley de aditividad:

$$L(P_i)_{c_1+c_2} = L(P_i)_{c_1} + L(P_i)_{c_2}$$

Ec. 1

Introducción

-Ley de proporcionalidad:

$$L(P_i)_{kc_1} = k L(P_i)_{c_1}$$

Ec. 2

donde $L(P_i)_c$ es la luminancia (L) del primario P_i necesaria para igualar el color C.

-Leyes de simetría, aditividad y transitividad o Leyes de Grassman (se representa la condición de metamerismo mediante el símbolo Ξ):

- Ley de Simetría: Si $A \Xi B$ entonces $B \Xi A$
- Ley de Transitividad: Si $A \Xi B$ y $B \Xi C$ entonces $A \Xi C$
- Ley de Proporcionalidad: Si $A \Xi B$ entonces $kA \Xi kB$ (k factor positivo por el que multiplicamos las luminancias de ambos colores)
- Ley de aditividad: Si $A \Xi B$ y $C \Xi D$ entonces $A+C \Xi B+D$

[Capilla, 2002]

Estas propiedades son análogas a las propiedades de linealidad de los vectores, así pues las ternas de valores triestímulos definen un espacio vectorial de representación. Para ello debemos elegir una base adecuada, pero la elección no es única, de ahí que aparezcan

los distintos espacios de representación cromática: RGB, XYZ, los espacios ATD lineales, etc.

1.2.C SISTEMAS PARA NOMBRAR EL COLOR. SISTEMA CIE1931 xy

El espacio XYZ es una transformación lineal del RGB. En el sistema de representación XYZ los primarios son elegidos de tal forma que una de las variables (el valor triestímulo Y) lleva toda la información de flujo luminoso.

El triángulo que forman los primarios en el diagrama cromático XYZ abarca todo el locus espectral, por tanto los primarios son estímulos **irreales**; de esta manera se evitan los colores con componentes negativas que aparecían en el espacio RGB, y que suponían un problema a la hora de obtener dispositivos físicos de medida del color, que simulasen el comportamiento del sistema visual mediante filtros.

Introducción

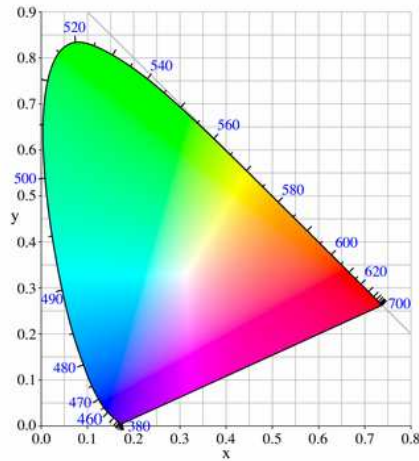


Figura 1. Diagrama cromático en el espacio de representación CIE1931xy.

Se cumple que el estímulo equienergético tiene valores triestímulo iguales:

$$X_E = Y_E = Z_E$$

Ec.3

Se puede relacionar los primarios de un sistema con los de otro sistema mediante una matriz, la **matriz transformadora**.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Ec. 4

La relación que existe entre los primarios XYZ y RGB para el observador patrón de la CIE es:

$$\begin{aligned} [X] &= 2.7734[R] + 1.7734[G] + 1.1329[B] \\ [Y] &= \quad \quad 1[R] + 4.5907[G] + 0.0601[B] \\ [Z] &= \quad \quad \quad 0.0564[G] + 5.5944[B] \end{aligned}$$

Ec.5

Con lo que la matriz transformadora es:

$$A = \begin{pmatrix} 2.7734 & 1.7445 & 1.1329 \\ \quad 1 & 4.5907 & 0.0601 \\ \quad 0 & 0.0564 & 5.5644 \end{pmatrix}$$

Ec.6

De esta Matriz, se obtienen las **funciones de igualación** del color $[\overline{x}_\lambda, \overline{y}_\lambda, \overline{z}_\lambda]$ que corresponden a los valores triestímulo de los

Introducción

colores espectrales de energía patrón. Se observa que sus valores son siempre positivos por lo que las coordenadas cromáticas de cualquier color también lo serán.

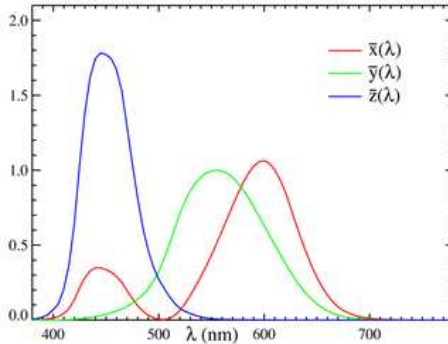


Figura 2. Curvas de las de las funciones de igualación del color correspondientes al observador patrón CIE-XYZ de 2º.

- **Coordenadas cromáticas**

Para hallar las coordenadas cromáticas primero debemos calcular los **valores triestímulo** en XYZ, bien a partir del sistema RGB si son conocidos, o bien a partir de:

$$X = k \int_{380}^{780} P_{\lambda} x_{\lambda} \partial_{\lambda} \quad Y = k \int_{380}^{780} P_{\lambda} y_{\lambda} \partial_{\lambda} \quad Z = k \int_{380}^{780} P_{\lambda} z_{\lambda} \partial_{\lambda}$$

Ec.7

Siendo: *k la constante que deja las unidades en el sistema internacional

* P_λ el flujo radiante espectral del estímulo luminoso

* \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ las funciones de igualación de color para el observador patrón CIE1931xy.

*Los límites de integración son 380-780, ya que son los valores del espectro visible definidos por la CIE.

Dado que no podemos medir todas las λ es habitual tomar intervalos de aproximadamente 5 o 10 nm, que dan resultados suficientemente precisos en la mayoría de los casos, por lo que las ecuaciones quedarían así:

$$X = k \sum_{380}^{780} P_\lambda x_\lambda \Delta_\lambda \quad Y = k \sum_{380}^{780} P_\lambda y_\lambda \Delta_\lambda \quad Z = k \sum_{380}^{780} P_\lambda z_\lambda \Delta_\lambda$$

Ec.8

A partir de los valores triestímulo se definen las coordenadas cromáticas. De esta manera el color se especifica mediante las coordenadas (x, y) y el valor triestímulo Y que se relaciona directamente con el valor de la luminancia (L).

Introducción

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Ec.9

Esta simplificación permite representar la cromaticidad en un plano 2D (x,y). Nótese que el tercer parámetro (z) es una combinación lineal de los dos primeros.

- *Color de objetos*

Si el estímulo color proviene de un objeto, se caracteriza por la reflectancia espectral ρ_λ (si el objeto es opaco) o por la transmitancia espectral τ_λ (si se trata de un objeto transparente).

El flujo radiante espectral que emerge de un objeto viene dado por:

$$\rho_\lambda P_\lambda \Delta_\lambda \quad \text{ó} \quad \tau_\lambda P_\lambda \Delta_\lambda$$

Ec.10

Con lo que se definen los valores triestímulo para el observador patrón de la CIE como:

$$X = k \sum_{380}^{780} P_\lambda \rho_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta_\lambda \quad Y = k \sum_{380}^{780} P_\lambda \rho_\lambda \bar{y}_\lambda \Delta_\lambda \quad Z = k \sum_{380}^{780} P_\lambda \rho_\lambda \bar{z}_\lambda \Delta_\lambda$$

Ec.11

1.2.D ESPACIO ATD DE GUTH (1995)

El sistema CIEXYZ puede utilizarse para especificar estímulos y predecir el resultado de operaciones simples entre colores, pero es un mal descriptor de la apariencia. Para predecir la apariencia, es necesario recurrir a modelos de la visión de color, que tengan en cuenta propiedades del sistema visual, como la oponentencia perceptual y las no linealidades. El modelo ATD de Guth (referencia), que usaremos en este trabajo, está basado en la fisiología de las vías visuales, y contempla que las señales neuronales generadas en una primera fase en los conos son codificadas en una segunda fase en el cuerpo geniculado lateral (primera etapa) donde se recombinan para dar tres nuevas señales [Wyszescski-Stiles,1982], dos de las cuales son cromáticas, siendo acromática la tercera. Este planteamiento está basado en las células oponentes y no oponentes del sistema visual humano. El modelo proporciona, en su última etapa, tres parámetros de salida: A se refiere a la señal acromática, T es la señal oponente rojo-Verde y D la señal oponente azul-amarillo [Mejor Guth Luque, 2000].

$$A = R + G \quad T = B - G \quad D = B - R$$

Ec.12

Introducción

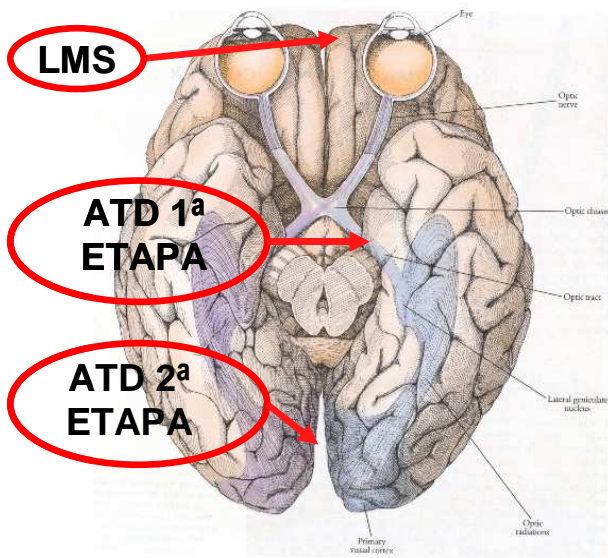


Fig3. Etapas del modelo ATD.

La respuesta que dan los conos, LMS, llega al cuerpo geniculado lateral donde se recodifica y obtenemos la salida ATD en primera etapa, esa señal continúa hasta el córtex visual donde finalmente se obtiene la salida ATD en segunda etapa.

La luminosidad y la discriminación entre estímulos se obtendrían a partir de las señales en primera etapa, mientras que el tono y la saturación (descriptores perceptuales) se obtendrían a partir de la segunda etapa. La

saturación se define como el colorido relativo a la luminosidad de estímulo.

Las funciones de respuesta espectral en las condiciones de umbral absoluto se muestran en la figura 3. Puede observarse que la contribución del mecanismo D es en general menor que los mecanismos A y T.

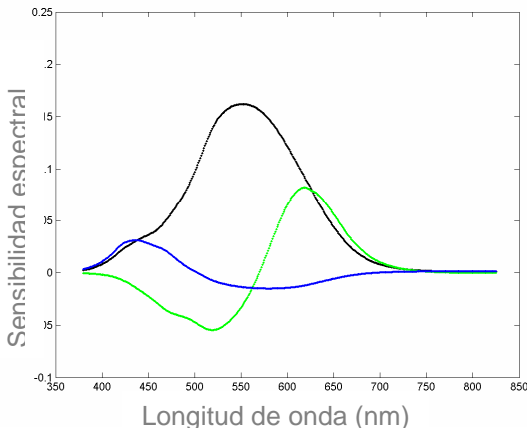


Figura 4. Mecanismos ATD en el espacio de Guth.
A: línea negra, T: línea verde y D: línea azul.

Para que un color tenga apariencia acromática los canales T y D deben anularse ($T=0$ y $D=0$), para ello los valores de las coordenadas cromáticas x' e y' deben valer 0.37 y 0.33 respectivamente.

Introducción

Como en este modelo podemos seleccionar si queremos la salida en 1ª o en 2ª etapa, según los parámetros objeto de estudio hemos decidido trabajar en primera etapa que es donde tiene sentido el cálculo de umbrales. La ventaja de la salida en 2ª etapa es la posibilidad de obtener descriptores perceptuales pero no seríamos capaces de calcular distancias. Además, el modelo está optimizado para calcular los descriptores de estímulos que presentan un fondo (o periferia), pero en las imágenes reales establecer qué color es el fondo no es algo trivial. Por otra parte trabajar con estímulos homogéneos con centro y periferia no nos permitirá realizar la comparativa necesaria para el estudio de pérdida de discriminación cromática mediante elipses.

1.3 APARIENCIA DE COLOR Y ADAPTACIÓN

Cuando tenemos que describir la apariencia de un color hay que tener en cuenta que el aspecto que presenta ese color objeto depende de otros factores independientes de él mismo. Estos factores dependen de qué hemos estado mirando inmediatamente antes y lo que vemos simultáneamente alrededor de ese color objeto, es decir, la escena que lo rodea. Este es el efecto que se denomina genéricamente adaptación.

1.3.A ADAPTACIÓN CROMÁTICA Y CONSTANCIA DEL COLOR

Los fenómenos de adaptación se asocian a cambios en la sensibilidad del sistema visual originados como respuesta a la intensidad y el tiempo de exposición a las luces que se observan. El sistema visual es capaz de adaptarse a formas, color, luminancia e incluso movimiento, siendo el iluminante el factor de mayor importancia en la apariencia del color [Artigas,1995].

Los mecanismos de acción de los conos se ajustan de tal forma que un mismo objeto nos parece igual de luminoso esté bajo la luz del día o bajo una luminaria. El caso de la adaptación a la composición espectral dominante en la luz se denomina **adaptación cromática**.

Un caso de adaptación cromática es el llamado **contraste sucesivo**; cuando se observa un campo cromático, donde se satura alguno de los conos, y seguidamente al observador se le presenta una pantalla blanca (que contiene todas las λ), el cono saturado no dará respuesta por lo que no se percibirá blanco en esa zona de la retina, sino que se apreciará el color opuesto al adaptado. En este caso, el color percibido se debe a una disminución de sensibilidad en los conos provocado por una exposición anterior a un estímulo cromático.

Introducción

Otro ejemplo de adaptación cromática es el fenómeno conocido como **descuento del iluminante**. En este caso, se percibe del mismo color un único objeto bajo iluminantes diferentes. Sabemos que el color percibido depende del factor de reflexión del objeto, del iluminante y del observador; por lo tanto deducimos que el color debería ser distinto bajo distintas luminarias, pero las sensibilidades de los mecanismos de visión del color se modifican de modo que el resultado final es prácticamente independiente del iluminante. Es como si el sistema visual fuese capaz de “descontar el efecto del iluminante”, este fenómeno también se conoce como **constancia del color**. Pero hay casos en que este efecto no se da, como, por ejemplo, con dos colores metámeros bajo un iluminante pero que no lo son bajo otro distinto, o cambios muy bruscos de iluminante (objeto verde visto bajo luz natural y luego bajo luz roja).

1.3.B UMBRALES CROMÁTICOS

Para un estímulo color se pueden definir diferentes umbrales.

- *Umbral absoluto*

Es la mínima cantidad de energía detectable en oscuridad.

- Umbral incremental

Es la cantidad mínima de energía que se debe añadir al campo observado para que se pueda diferenciar en él. Hay que hacer notar que los estímulos se presentan sucesivamente, no son vistos al mismo tiempo por el observador.

- Umbral diferencial

Es la diferencia más pequeña de color que puede percibirse entre dos estímulos colocados uno al lado del otro.

Aparte, y común para cualquier tipo de umbral, podemos considerar varios parámetros para medirlos.

- Diferencias de luminancia

En la figura 4 se observa cómo varía el umbral incremental con la luminancia del fondo.

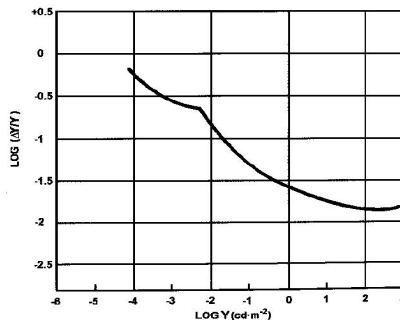


Figura5. Análisis del umbral incremental de luminancia del test con respecto al fondo.

Introducción

La discontinuidad marca el cambio del mecanismo que realiza la detección (conos y bastones), aunque la forma de cada tramo sigue el mismo comportamiento.

-Diferencias de longitud de onda en colores espectrales

Está influida por la iluminación retiniana, el tamaño del test, etc. Wright y Pitt realizaron una experiencia utilizando un campo bipartido con dos colores iguales y en uno de ellos modificaban la longitud de onda hasta que el color se percibiese diferente.

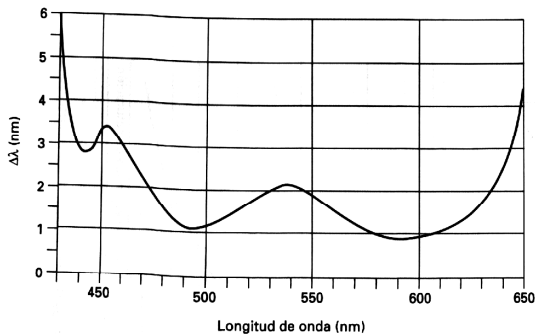


Figura 6. Umbrales diferenciales de longitud de onda en colores espectrales. Test de 2°. Iluminación retiniana de 70td. Wright y Pitt (1934)

En este estudio se distinguen tres mínimos de resolución a 440, 490 y 590 nm. Hasta el 420 nm y a partir de 650 nm desaparece el poder de discriminación.

- Diferencias de pureza colorimétrica

Puede ser estudiado superponiendo luz monocromática sobre un fondo de luz blanca de forma que la luminancia media del test permanezca constante. Esto se consigue sustrayendo del blanco la misma cantidad de luminancia que se ha añadido de luz monocromática. La capacidad de discriminación es mejor cerca del blanco y del espectro (colores de mayor pureza) y se reduce en el entorno de las purezas colorimétricas intermedias.

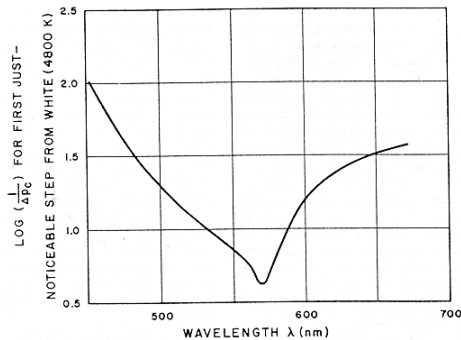


Figura 7. Umbrales diferenciales de pureza colorimétrica en colores espectrales.

Introducción

Pero lo interesante no es la diferencia de una sola de las variables del color sino de todas en su conjunto, esto es lo que realizó MacAdam en su experimento.

1.3.C DIFERENCIAS DE COLOR. ELIPSES DE MacADAM

Al estudiar diferencias de color realmente lo que interesa no son las diferencias de las componentes del color por separado, sino las diferencias de color perceptuales de todas ellas en conjunto.

Wright en 1941 determinó las diferencias de color con iluminación constante mediante un test de campo bipartido de 2° , iluminación retiniana de 100 td constante a lo largo de todo el espectro y para cinco direcciones del diagrama cromático. El resultado son unos intervalos o segmentos cuyos extremos presenta una diferencia de cromaticidad constante. De este experimento se dedujo que el espacio CIE1931xy no era uniforme, ya que dos puntos muy alejados en la zona de los verdes difieren de color lo mismo que dos puntos mucho mas próximos en la zona de los azules o de los púrpuras [Artigas, 1995].

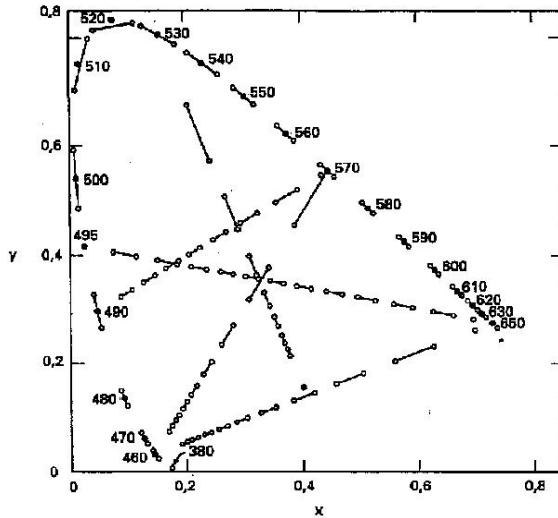


Figura 8. Experimento de discriminación de color de Wright

MacAdam en 1942 determinó estos umbrales de un modo más completo. Para ello utilizó de nuevo un campo bipartido de 2° ; en uno de los dos lados situaba un estímulo referencia fijo y en el otro se efectuaba la igualación de color. El test estaba rodeado por un campo de adaptación de luz blanca de la misma luminancia que el test (200 td). Tras cincuenta igualaciones se definen dos puntos simétricos en una misma dirección, obtenidos como la media más y menos la desviación estándar de las igualaciones. Repitiendo esta misma operación para varias direcciones y

Introducción

uniendo los puntos, se generan elipses. [Artigas1995, Web13]

MacAdam representó los resultados (elipses de discriminación) en el espacio CIE1931xy para 25 colores de referencia [Fig. 7]. Se observa que dichas elipses son diferentes en tamaño, orientación y forma a lo largo del diagrama cromático, siendo más pequeñas en la zona de los azules, intermedias en la de los rojos y más grandes en los verdes.

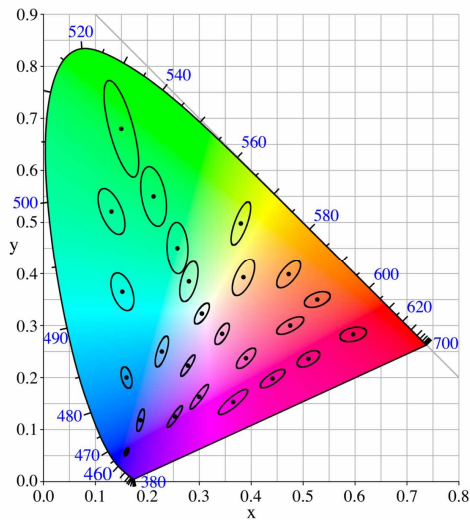


Figura 9. Elipses experimentales de MacAdam ampliadas 10 veces.

La ecuación de la elipse puede expresarse como:

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

Ec.15

donde Δx y Δy representan las diferencia entre un punto de la elipse y el centro (x_0, y_0) ; [g_{11} , g_{12} y g_{22}] lleva la información de los semiejes y la orientación de la elipse, que correspondería a cualquier punto que se encontrara dentro de las 25 elipses medidas, y puede interpretarse como la métrica del espacio CIEXYZ. Si se trata de un punto externo a la elipse debería realizarse una interpolación entre las dos elipses más próximas.

MacAdam constató que la mínima diferencia perceptible entre el estímulo de referencia y la muestra en una dirección dada es dos veces la desviación estándar de las igualaciones de color. Igualando el segundo término de la ecuación 16 a ΔS , puede interpretarse este valor como la distancia entre dos puntos de coordenadas (x,y) y $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ en un espacio no euclídeo. Por consiguiente la desviación estándar de las igualaciones de color correspondería a $\Delta S=1$ y la mínima diferencia perceptible de color a $\Delta S=2$.

Si tomamos la distancia desde el centro a cada punto de la elipse como la unidad de diferencia de color comprobamos que esa distancia no es

Introducción

la misma ni a lo largo de cada elipse ni de una elipse a otra. Además, si se tratara de generalizar el problema realizando las experiencias de igualación de colores añadiendo la tercera dimensión (la luminancia), el resultado son los elipsoides de Brown-MacAdam; que siguen teniendo las mismas características respecto a las distancias.

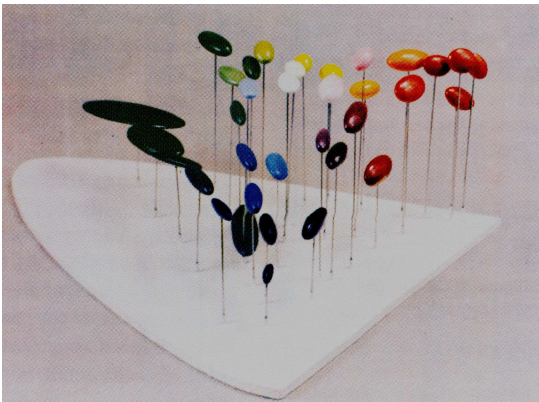


Figura10 Umbrales de discriminación cromática, elipsoides de Brown-MacAdam.

Por lo tanto se deduce que el espacio CIE1931xy no es un espacio uniforme. Supondremos un **espacio uniforme** aquel en el que al representar las diferencias de color los resultados sean circunferencias de igual radio, sea cual sea el color de centro escogido [Web 13], es decir, que exista una correlación entre la diferencia de color y la medida de la

distancia. Para calcular la diferencia de color entre dos colores cualesquiera, en principio de diferente luminancia, será necesario considerar, además de la diferencia de cromaticidad, la diferencia de luminancia.

A partir de este descubrimiento se ha intentado encontrar el espacio de representación de color uniforme, y a pesar de que no se ha conseguido, sí que se ha llegado a otros espacios de representación mucho más homogéneos. Entre los más utilizados están CIELAB, modelos ATD no lineales como el de Guth, y SVF [Guth 1998].

En cuanto a modelos ATD, el experimento de Krauskopf y Gegenfurtner en 1992, consistió en colocar cuatro discos de colores, tres de color idéntico y uno diferente, de modo que el observador debía detectar cuál difería de los otros tres. Las direcciones exploradas fueron las direcciones cardinales para cada uno de los centros de referencia elegidos. Esos centros se distribuyeron uniformemente en un locus que equidistaba del color del adaptador. La luminancia de los estímulos era sobre 35 cd/m^2 que se presentaron en una pantalla de televisión.

En sus resultados obtuvieron que los umbrales eran más pequeños cuando el color del fondo era el mismo que el estímulo adaptador. Los umbrales eran mayores en proporción a la diferencia entre el color del test

Introducción

y del adaptador cuando la delta (cambio de color) se generaba a lo largo de la misma dirección cardinal que se encontraba el centro con respecto al adaptador.

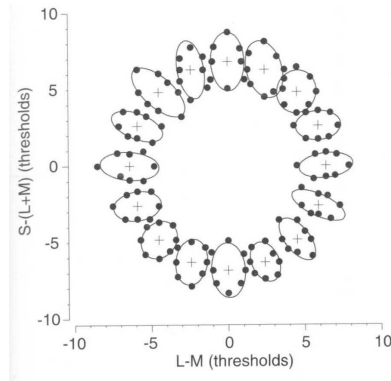


Figura11 .Resultados experimentales del estudio de Krauskopf y Gegenfurtner. [Gegenfurtner, 1999]

2.4 FILTROS COLOREADOS

Los filtros coloreados que llevamos en las gafas habitualmente, no deberían producir pérdidas de agudeza visual o sensibilidad al contraste, ni cambios radicales en la percepción del color. Sin embargo sabemos que con todos los filtros coloreados el espectro de transmisión en el visible se reduce, alterando la visión cromática en mayor o menor grado. El sistema visual tiene mecanismos que compensan parcialmente este efecto, como son la constancia del color y el descuento del

iluminante. Sólo con algunas lentes los cambios de color son importantes.

2.4.A TIPOS DE ESPECTRO

Existen dos tipos de espectro para los filtros coloreados: los de corte y los de banda, toman el nombre dependiendo de las longitudes de onda que transmiten. En las figuras 12 y 13 podemos observar los espectros de transmitancia para estos dos tipos:

En el caso de los filtros de corte, se llaman así porque tienen una transmitancia media alta hasta cierto rango donde la transmitancia es nula o casi nula. Para los de banda, sólo un grupo selecto de longitudes de onda son transmitidas, con un máximo alrededor de una de ellas.

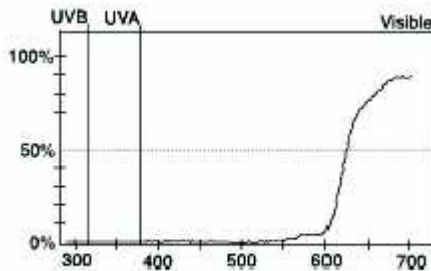


Figura12 Espectro de transmitancia del filtro coloreado PLS (UV) 480-Marrón 15%

Introducción

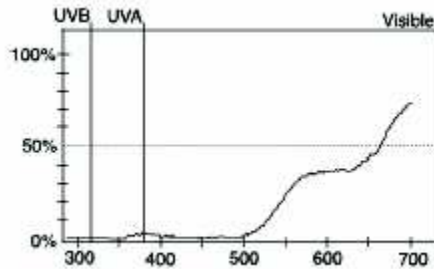


Figura13 Espectro de transmitancia del filtro coloreado PLS 500 naranja 50%

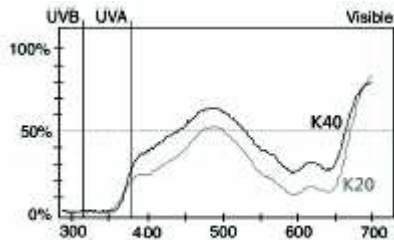


Figura14. Colorantes como el Norlite Kosmos dejan transmitir en casi todo el visible siendo el máximo sobre 500 nm. Aproximadamente [Web12].

El efecto es más fuerte con filtros amarillos o naranjas, ya que causan una percepción parecida a la de una persona con defecto tritán en su visión del color. Pero dependiendo de la longitud de onda de corte, son capaces de realzar el contraste percibido sin alterar demasiado la visión cromática.

En nuestro caso, se han utilizado filtros que son de banda ancha. A pesar de que la forma del espectro se asemeja a un filtro de corte, no se puede considerar como tal, ya que tiene un máximo relativo que no elimina completamente la transmitancia en ese rango de longitudes de onda; podemos corroborar este dato si comparamos las figuras 12 y 16.

Un filtro de corte tendrá pérdidas más drásticas de color en la zona donde no deja pasar la radiación visible, mientras que esperamos que en un filtro de banda ancha no produzca cambios tan radicales, como también indica el proveedor de estos filtros en las características de los mismos.

La discriminación cromática es mejor sin lentes coloreadas que con ellas, siempre. El estudio de de Fez [de Fez 2002] muestra que, si se usan filtros, es mejor que sean de color gris que marrón, verde o azul. El tamaño de las elipses de discriminación obtenidas para el filtro gris es similar al caso de sin lentes, obteniéndose que, para cualquier filtro, el eje mayor de la elipse de discriminación varía más que el eje menor.

El uso de un filtro amarillo es más aconsejable porque es capaz de realzar el contraste sin perturbar demasiado la visión cromática.

Los filtros verde, marrón, gris y azul causan pérdidas de discriminación parecidos.

Introducción

Estos cambios no pueden ser clasificados de comportamiento tritán, deután o protán ya que las elipses no están en la misma dirección que las líneas de confusión cromáticas.

M
É
T
O
D
O
E
X
P
E
R
I
M
E
N
T
A
L



Método experimental

En este apartado se describen todos los materiales empleados, la población que tomó parte del trabajo, así como los distintos métodos de medida llevados a cabo en el presente trabajo.

3.1 FILTROS

Para este estudio hemos utilizado cuatro filtros solares producidos y comercializados por la empresa Essilor S.A. Son cuatro filtros de la gama “Physiotint” en colores Marrón, Gris, Verde y Verde-Gris.

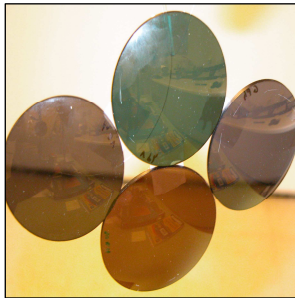


Figura15 Filtros Physiotint de Essilor España S.A. utilizados en este estudio.

Sus espectros de transmitancia fueron medidos con un espectrofotómetro ATI Unicam UV2/200, dentro de un rango de 350 a 800 nm. Los correspondientes espectros se muestran en las figuras [16 a la 19]. Como puede apreciarse en las figuras, estos filtros se

Método experimental

caracterizan por tener un espectro con un pequeño máximo en torno a los 480-500 nm.

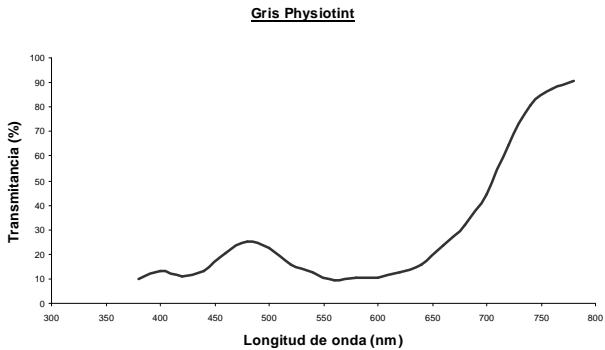


Figura 16. Espectro de transmittancia del filtro physiotint Gris.

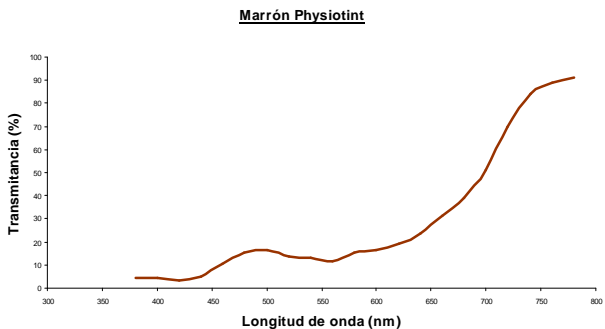


Figura 17. Espectro de transmittancia del filtro physiotint Marrón.

Método experimental

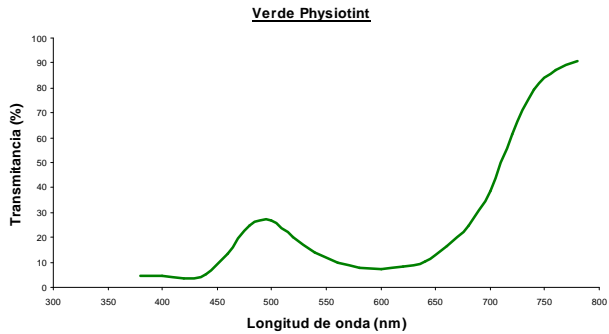


Figura 18. Espectro de transmitancia del filtro physiotint Verde.

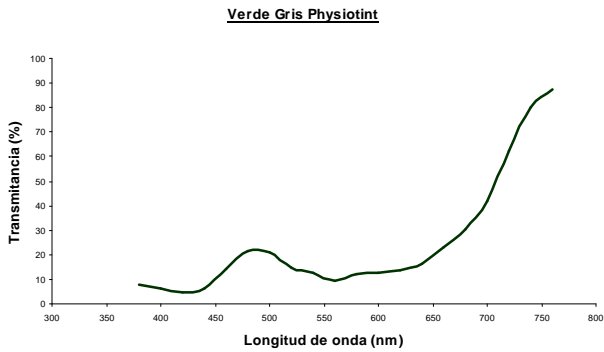


Figura 19. Espectro de transmitancia del filtro physiotint Verde-Gris.

Método experimental

3.2 FASE DE ADAPTACIÓN

Antes de proceder a las medidas experimentales, el observador se adapta durante 3 minutos a un campo acromático homogéneo de coordenadas cromáticas (0.290, 0.310), con los filtros antepuestos para el caso de la medida con filtro. La luminancia de este campo es de 13 cd/m^2 , correspondiente a la luminancia media de los estímulos que el observador va a presenciar en el test de discriminación cromática.

3.3 EQUIPO INFORMÁTICO Y SOFTWARE

El equipo informático es un ordenador PC Pentium III, conectado a un monitor Mitsubishi de 20', donde se presentan los estímulos, con una tarjeta gráfica VSG 2/3F. Seguidamente se presentan las principales características de la tarjeta gráfica y el monitor, así como la descripción del software utilizado.

3.3.A TARJETA GRÁFICA VSG 2/3F

La tarjeta gráfica de un ordenador es la encargada de controlar el color y la intensidad de cada píxel de la pantalla. Este color va a depender de la capacidad de almacenamiento de la tarjeta (memoria framebuffer), y del número de píxeles en la pantalla que determinan la resolución.

Método experimental

El almacenamiento de la información de la tarjeta gráfica es digital y para transformarlo a un nivel de voltaje están los convertidores DAC (Digital to Analogue Converter) que enviarán la señal del voltaje a cada uno de los cañones. Estos cañones se encargan de producir los colores en la pantalla, de manera que el observador aprecia el color como resultado de la “mezcla subjetiva” de las intensidades de los fósforos rojo, verde y azul. La tarjeta gráfica empleada en este trabajo está especialmente pensada para estudios de visión (medidas de tiempo de reacción, CSF, potenciales evocados, etc.). La memoria framebuffer incluye 4 Mb RAM para programación y tablas de datos y 4 Mb de memoria de video. Esta memoria está acoplada a dos paletas de color y la salida RGB proporciona 8 bits por DAC, transformables a 12 bits, con un máximo de 512 colores diferentes simultáneos en la pantalla. En cuanto a las posibilidades de la resolución, la VSG puede manejar un CRT hasta una resolución de 2048*2048 píxeles.

3.3.B MONITOR CRT. MITSUBISHI HL-7955 SKTKL

Básicamente un CRT de color es un tubo de vacío provisto de tres cátodos, cada uno de los cuales emite una corriente de electrones que atraviesa una máscara oscura para terminar “excitando” un punto de la pantalla. La

Método experimental

pantalla del CRT está cubierta de fósforos de tres tipos, uno para cada uno de los primarios del monitor; a partir de la combinación de estos se generan colores de acuerdo a las leyes básicas de la colorimetría. Existen diferentes tipos de composiciones en los fósforos para la producción de cada primario, pero los más comunes son los de plata, terbio y europio, usados para producir el azul, el verde y el rojo respectivamente. La máscara consiste en una placa de metal, perforada a modo de rejilla, en la que cada uno de los agujeros está perfectamente alineado con los fósforos; la función de esta máscara consiste en garantizar que se excite solamente el fósforo deseado. Las perforaciones pueden ser puntuales tal y como ocurre en el diseño "Delta Gun" (con los tres cátodos dispuestos en un triángulo) o lineales, como sucede en los monitores de diseño Trinitron con cátodos alineados.

Es muy importante que los electrones de cada haz no desvíen su trayectoria, excitando un fósforo que no les corresponda. Cuando esto ocurre, se produce una variación del color indeseada. Las posibles causas de estas desviaciones son dilataciones térmicas, efectos de la vibración, presencia de campos magnéticos parásitos, etc. Todo ello provoca una falta de convergencia que se traduce en una pérdida de la calidad de imagen.

Método experimental

El funcionamiento de un monitor CRT se basa en un barrido continuo de izquierda a derecha y de arriba abajo. La velocidad de barrido horizontal en los monitores actuales suele tener un valor en torno a los 70 Hz (aunque se están popularizando cada día más los de 100 Hz). En cualquier caso es necesario un mínimo de 50 Hz para que el ojo humano no aprecie el parpadeo de la imagen.

La pantalla se compone de píxeles y cada píxel está compuesto de tres subpíxeles de colores rojo, verde, y azul. Debido al pequeño tamaño de los píxeles, a la distancia de observación normal el ojo no es capaz de resolver puntos contiguos, por lo que el córtex visual funciona e interpreta solamente la imagen mezcla y no la imagen de cada uno de los puntos.

En las pantallas de color es imprescindible controlar cada subpixel, es decir, controlar por separado la porción de rojo, verde y azul que forma el color de cada píxel, ya que el color percibido se forma por la aditividad de cada uno de los primarios. El tamaño de los píxeles, así como su forma, depende del tipo de pantalla, pero los más usuales en monitores CRT son los cuadrados.

El control del color en el monitor se establece desde la memoria "framestore" que almacena la información píxel a píxel. Esta información es la que se envía a los cañones

Método experimental

RGB para que emitan los voltajes correspondientes a cada píxel. El suministro de los valores numéricos proporciona una corriente de tres señales de voltaje correspondientes a RGB (a través de los convertidores DAC). Los convertidores DAC se encargan de transformar la señal digital de la tarjeta gráfica en un voltaje de salida para el correspondiente cañón.

Dado que la variación en la pantalla se realiza píxel a píxel, la velocidad de recambio de imagen, puede llegar a limitarse tanto por la capacidad de tarjeta gráfica, como por la capacidad de los convertidores DAC. En la figura 20 se muestra el sistema completo, desde la memoria framebuffer de la tarjeta gráfica hasta el monitor CRT.

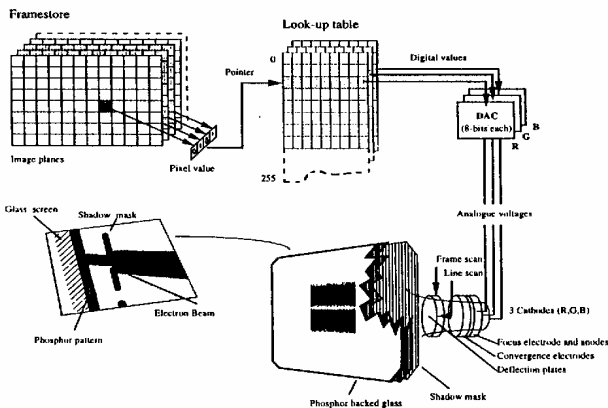


Figura20. Esquema de una tarjeta gráfica y monitor CRT.

Método experimental

El número máximo de píxeles direccionables en la imagen depende de la disponibilidad de memoria; por tanto la memoria framebuffer puede limitar el número de colores que se presentan simultáneamente en la pantalla. Para muestrear el espacio de color correctamente es necesario controlar cada cañón con una resolución mínima de 8 bits (256 niveles de salida), y si se desea medir umbrales de color es recomendable como mínimo 10 bits por cañón. Los dispositivos más habituales utilizados en las últimas investigaciones para generar colores, son similares al mostrado en la figura anterior.

Como ya se ha dicho en el apartado anterior, en nuestra pantalla controlada por una tarjeta gráfica que permite hasta 12 bits por canal. El convertidor traduce la señal proporcionada por el nivel digital a voltaje, y el voltaje aplicado a los cañones de electrones es lo que controla la intensidad adecuada. La relación entre el nivel digital y el voltaje depende del convertidor, no obstante se puede afirmar que la luminancia del color emitida por un píxel varía potencialmente con el voltaje.

El monitor empleado en este trabajo tiene una pantalla dotada con tratamiento antirreflejante, tratamiento antiestático y sistema VLFM (sistema de limitación de radiaciones). Sus principales características técnicas se recogen en la tabla 1.

Método experimental

Tabla 1, Características técnicas del monitor CRT Mitsubishi HL-7955

CRT	Tamaño	19"
	Cañones	En línea
	Ángulo de desviación	90°
	Fósforos	RGB P-22
	Ancho de trío	0.31 mm
Frecuencia de barrido	Horizontal / Vertical	30-64kHz / 50-130 Hz
Resolución	1280 x 1024 píxeles	
Tiempo de blanqueo	Horizontal	53-64 kHz > 4.0 μ seg 40-53 kHz >5.0 μ seg
	Vertical	30-40 KHz >6.0 μ seg 30-40 KHz >600 μ seg
Entorno operativo	Temperatura	0°-40°
	Humedad	10%-95%
Error de convergencia	Centro	0.35 mm
	Resto de la pantalla	0.5 mm

Método experimental

Todos los monitores CRT requieren un tiempo de precalentamiento más o menos prolongado, con el fin de estabilizar la señal de salida de cada uno de los píxeles. En el caso del Mitsubishi HL-7955, el fabricante aconseja un período mínimo de 30 minutos para la estabilización total de la señal, tanto en luminancia como en cromaticidad.

a) Calibrado del monitor

Para el calibrado del monitor, consideramos que el comportamiento de los fósforos es aditivo, es decir, que la suma de las tres curvas de luminancia con respecto al nivel digital de los tres fósforos por separado, es igual a la de la luminancia del blanco. Admitida esta condición, la dependencia de la luminancia de cada fósforo con el nivel digital es de tipo potencial.

$$L = a n^{\gamma}$$

Ec. 16

donde a y γ constantes para cada fósforo del monitor.

Método experimental

3.3.C SOFTWARE COLOUR CAMBRIDGE TEST

El ordenador que ejecuta el programa Colour Cambridge Test sostiene dos monitores, uno desde el cual se controlan los parámetros del estímulo y otro donde visualizamos el test. El estímulo que se presenta al observador es un anillo de Landolt, cuya abertura está orientada en cuatro posibles direcciones: arriba, abajo, derecha e izquierda. Tanto el test como el fondo no presentan bordes definidos, sino que están compuestos por pequeños círculos de diferente tamaño, cuya luminancia cambia aleatoriamente con la posición. De este modo, la discriminación del anillo se realiza por diferencia de color y no por efecto de borde u otros mecanismos de visión espacial. [Gómez, 2006]

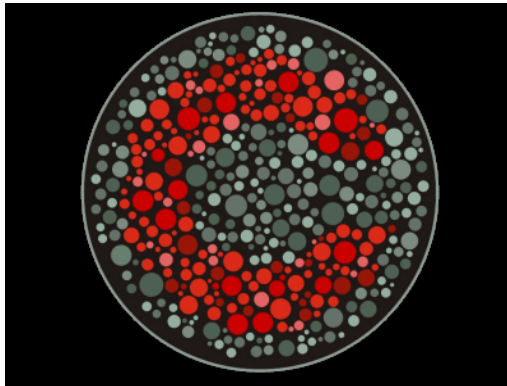


Figura21. Imagen del estímulo que se presenta en el software *Colour Cambridge Test*

Método experimental

El software permite modificar a voluntad la mayoría de parámetros del estímulo: la luminancia máxima y mínima que presenta, así como cuántos escalones de luminancia diferentes forman la imagen, el número de direcciones en el plano de cromaticidad que queremos que tome para medir la diferencia de color, las coordenadas cromáticas del color que será el centro de la elipse, el tiempo que permanece el test para poder responder y el modo de testeo a seguir: Trivector o Elipses. La opción Trivector permite detectar el tipo de alteración cromática en una prueba sencilla y rápida. Se muestra al observador una única presentación centrada en el acromático de coordenadas x,y (0.313, 0.330) y con variaciones cromáticas del estímulo a lo largo de tres direcciones coincidentes con los ejes de confusión tritán, protán y deután. El umbral de discriminación obtenido en cada una de estas direcciones permite deducir si el observador es normal o presenta algún tipo de alteración en su visión del color.

La opción “elipse” es la que hemos utilizado para la realización de este trabajo. El programa permite medir por defecto las elipses de discriminación de tres centros, alineados según el eje tritán que pasa por el blanco. Para nuestras medidas hemos sustituido los valores de los centros por los estímulos que

Método experimental

anteriormente decidimos que íbamos a medir. En este tipo de estrategia de medida no tenemos acceso a las direcciones en las que el software cambia la cromaticidad del estímulo presentado, que son determinadas automáticamente.

En este trabajo hemos elegido los siguientes parámetros:

Tabla 2: Parámetros escogidos para nuestro trabajo de investigación.

Luminancia máxima	17 cd/m ²
Luminancia mínima	8 cd/m ²
Escalones de luminancia	4
Direcciones	8
Coordenadas cromáticas	44 colores (ver tabla 3)
Tiempo de presentación del estímulo	3 s
Modo	elipses

Una vez elegidos los parámetros, el propio programa calcula, según la pantalla de visualización, la distancia a la que debemos colocar al observador para que la apertura del

Método experimental

test subtienda 1^o. De esta manera, nos aseguramos que, si el observador es incapaz de localizar correctamente la apertura, es porque no percibe diferencias de color, y no por su agudeza visual.

Tras adaptar al observador y situarlo en la posición óptima, se oprime el icono “Comenzar”. En ese momento en la pantalla de visualización aparece un anillo de Landolt, que va cambiando la orientación de la abertura y su color a medida que el observador va contestando, para parecerse cada vez más al fondo, que es el color alrededor del cual queremos medir el umbral (el centro de la elipse). El observador va respondiendo mediante el teclado del ordenador la posición de la apertura, hasta que no consigue distinguirla. Para no crear falsos positivos el programa repite algunos de los valores, por si el observador lo ha acertado al azar y además cada cierto tiempo presenta una pantalla con un anillo muy evidente para comprobar que el observador ha entendido el test y lo realiza correctamente. Tras finalizar la medida podemos visualizar el resultado (cada elipse de discriminación cromática) y guardar los datos numéricos obtenidos (eje mayor, ratio ente eje mayor y menor, ángulo con respecto a la horizontal del eje mayor).

3.3.D SOFTWARE MATLAB

Para ampliar el estudio de las elipses de discriminación, se ha desarrollado un programa en entorno Matlab que calcula un patrón teórico de discriminación cromática a partir de los datos experimentales. Este programa se ha desarrollado como parte de la colaboración entre el Grupo de Visión y Color de la Universidad de Alicante, en el que participo, y el Grupo de Visión de la Universidad de Valencia. El programa funciona calculando la media de las elipses experimentales medidas por diferentes observadores, tras lo cual, mediante una serie de criterios específicamente elegidos calcula, por interpolación, las elipses que faltan para completar al máximo posible el diagrama cromático. En algunas zonas del diagrama las elipses quedan demasiado solapadas, de modo que el mismo programa es el encargado de eliminar las que producen un mayor grado de solapamiento.

Una vez obtenido dicho patrón, el software permite filtrar imágenes de acuerdo al siguiente criterio: el programa asigna a cada color de la imagen que está dentro de una elipse el valor de su centro. Además, en aquellas zonas del diagrama en las que el solapamiento de elipses es pequeño y no se han suprimido o si hay huecos entre elipses, el criterio que sigue es el de dar el valor del centro de la elipse mas cercana que encuentra.

3.4 ELECCIÓN DE COLORES Y ESPACIO DE REPRESENTACIÓN

El software de Cambridge trabaja únicamente en el espacio CIE1931xy, que, como sabemos, no tiene un grado adecuado de uniformidad para interpretar correctamente los resultados. Nos planteamos entonces trabajar en otro espacio de representación.

El espacio elegido fue el ATD de Guth (1995), por tratarse de un espacio más uniforme que el CIE-1931xy; además es uno de los espacios más empleados en la investigación basada en pruebas psicofísicas y que nos va a permitir el cálculo de umbrales.

Los centros a partir de los cuales se van a medir las elipses de discriminación fueron escogidos en una rejilla de tal forma que cubriesen uniforme y prácticamente todo el plano TD de primera etapa. En la figura 22 se representa la primera rejilla de centros elaborada en el espacio CIE1931xy.

Método experimental

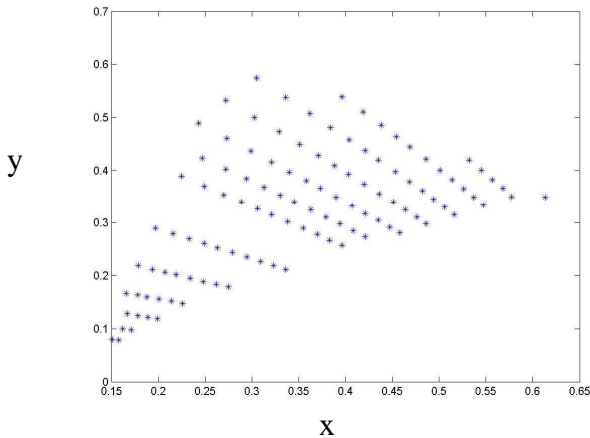


Figura 22. Gráfica de la rejilla con 110 centros elegidos para las elipses en el espacio CIE-1931xy

Al comienzo del estudio se definieron 110 elipses, pero comprobamos que al tomar las medidas algunos centros quedaban dentro de otras elipses y que un número menor sería suficiente, puesto que el programa ya se encarga de completar los espacios vacíos no obtenidos experimentalmente. Tras realizar algunas simulaciones, se fijó en 44 el número de centros necesarios para rellenar satisfactoriamente el espacio completo (siempre dentro del triángulo de primarios de los fósforos de la pantalla). Estos puntos se recogen en la figura 24 en CIExy y en la figura 25 en ATD de Guth.

Método experimental

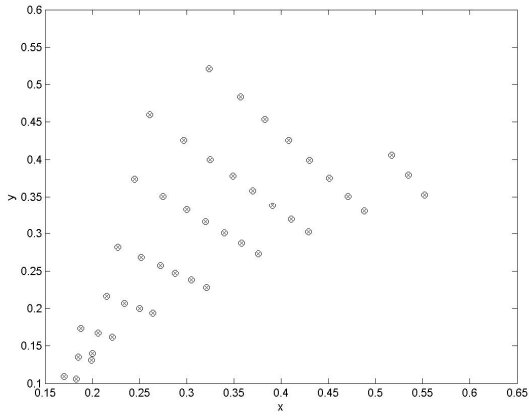


Figura 24. Representación en CIE1931xy de los 44 colores elegidos como centros.

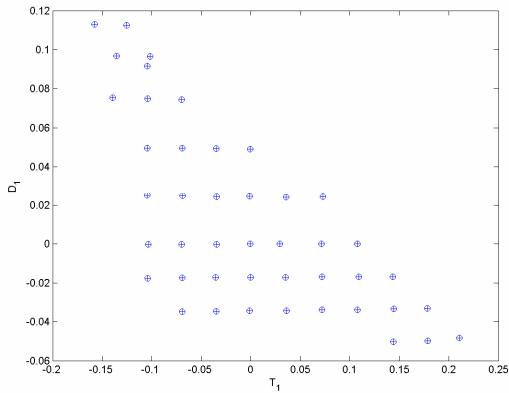


Figura 25. Representación de los 44 colores escogidos como centro en el espacio ATD95

Método experimental

Se presentan a continuación las coordenadas cromáticas de los 44 centros en ambos espacios.

Tabla 3: Coordenadas cromáticas de los 44 centros en XYZ.

	x	y		x	y
1	0,517	0,406	23	0,376	0,273
2	0,535	0,379	24	0,320	0,316
3	0,552	0,353	25	0,321	0,228
4	0,324	0,521	26	0,272	0,257
5	0,357	0,484	27	0,288	0,247
6	0,383	0,454	28	0,252	0,268
7	0,408	0,426	29	0,227	0,282
8	0,430	0,399	30	0,264	0,194
9	0,451	0,375	31	0,250	0,200
10	0,488	0,330	32	0,234	0,207
11	0,261	0,460	33	0,215	0,216
12	0,297	0,426	34	0,221	0,162
13	0,325	0,400	35	0,206	0,167
14	0,349	0,378	36	0,188	0,173
15	0,370	0,358	37	0,199	0,131

Método experimental

16	0,391	0,338	38	0,185	0,135
17	0,411	0,319	39	0,183	0,106
18	0,429	0,302	40	0,170	0,109
19	0,245	0,374	41	0,340	0,301
20	0,300	0,332	42	0,305	0,238
21	0,275	0,351	43	0,471	0,351
22	0,358	0,287	44	0,200	0,140

Método experimental

Tabla 4: Coordenadas T y D en el modelo ATD95 de Guth.

	T	D		T	D
1	1,44E-01	-5,03E-02	23	7,15E-02	5,47E-06
2	1,44E-01	-4,98E-02	24	1,08E-01	1,69E-05
3	1,44E-01	-4,83E-02	25	-6,65E-04	5,93E-05
4	-6,92E-02	-3,48E-02	26	7,26E-02	2,43E-02
5	-3,49E-02	-3,46E-02	27	-3,42E-02	2,45E-02
6	-1,07E-03	-3,43E-02	28	-1,16E-03	2,46E-02
7	3,60E-02	-3,42E-02	29	-6,86E-02	2,48E-02
8	7,20E-02	-3,38E-02	30	-1,05E-01	2,50E-02
9	1,08E-01	-3,37E-02	31	-4,97E-04	4,91E-02
10	1,78E-01	-3,32E-02	32	-3,51E-02	4,95E-02
11	-1,04E-01	-1,76E-02	33	-6,93E-02	4,97E-02
12	-6,91E-02	-1,74E-02	34	-1,04E-01	4,97E-02
13	-3,53E-02	-1,73E-02	35	-6,96E-02	7,45E-02
14	-9,40E-05	-1,73E-02	36	-1,04E-01	7,49E-02
15	3,51E-02	-1,71E-02	37	-1,40E-01	7,54E-02
16	7,20E-02	-1,70E-02	38	-1,01E-01	9,66E-02
17	1,09E-01	-1,69E-02	39	-1,35E-01	9,69E-02
18	1,44E-01	-1,69E-02	40	-1,25E-01	1,13E-01

Método experimental

19	-1,04E-01	-1,36E-04	41	-1,58E-01	1,13E-01
20	-3,47E-02	-1,02E-04	42	2,92E-02	-6,18E-05
21	-6,96E-02	-8,97E-05	43	3,59E-02	2,42E-02
22	7,15E-02	5,47E-06	44	1,44E-01	-3,35E-02

3.5 OBSERVADORES

En este estudio han participado un total de 129 observadores. La edad media de estos observadores es de 22 años, todos ellos con visión normal de color y con su compensación óptica, lo que ha asegurado una agudeza visual media de 1.

3.6 DESCRIPCIÓN DE LA SESIÓN

Previo al comienzo de la sesión, debemos encender el monitor al menos 30 minutos antes, para la estabilización de los fósforos. Al inicio de la primera sesión de medida con un observador, comprobamos que su visión de color sea normal administrándole, en una cabina de observación el test de las láminas de Ishihara (test para detectar anomalías cromáticas) y anotamos sus datos personales.

Método experimental

A continuación explicamos al observador en qué consiste la prueba y le hacemos una pequeña demostración para que no queden dudas:

-Aparece una "C" (anillo de Landolt), con la apertura en cuatro posibles posiciones (arriba, abajo, izquierda y derecha) el observador debe marcar mediante el cursor del ordenador (flechas de dirección del teclado) dónde se encuentra la apertura. En el caso de ver un anillo completo no debe responder y si se intuye donde está la apertura, a pesar de no ver totalmente definida la "C", sí debe contestar. Esto se le explica para no falsear los resultados, ya que por azar podría acertar y obtener falsos positivos. No obstante, el método de escalera utilizado, siempre minimiza los efectos del azar.

Seleccionamos en el Cambridge Colour Test el centro de la elipse a medir puesto que tras el siguiente paso, la adaptación, ya no debe encenderse ninguna luz.

Para la adaptación, el observador se coloca delante de una pantalla en la que se presenta un estímulo de 13 cd/m^2 en pantalla completa, luminancia que coincide con la media de las luminancias de los estímulos que se muestran en el Cambridge Colour Test. El sujeto siempre lleva puesto, si es el caso, las gafas con los filtros a testear.

Método experimental

La distancia de observación hay que tomarla de modo que el ojo no tenga que ejercer un trabajo de resolución espacial, sino que únicamente se discrimine la posición de la apertura por diferencia de color. Así que se midió a 3 metros, de forma que la abertura del anillo subtendiese 1° desde la posición de observación.



Figura 26. Dispositivo experimental y toma de medidas de un observador.

Seguidamente, pulsamos la tecla para que comience a funcionar el programa y nos colocamos cerca del observador, donde podamos ver la pantalla, para controlar que ha entendido el test y lo ejecuta correctamente. Cada vez que el programa termina de calcular una elipse, comprobamos que la elipse medida es correcta y la archivamos para su posterior procesamiento.

El tiempo medio para la realización completa de una elipse de discriminación es de 10 minutos.

R
E
S
U
L
T
A
D
O
S

Resultados

Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos. En cada gráfica se presenta la media de cinco medidas realizadas por diferentes observadores. Como hemos trabajado en dos espacios de representación, incluimos las figuras de elipses de discriminación tanto en el espacio CIE1931xy como en el ATD95.

Para el observador promedio Sin Filtro los resultados se presentan en las fig.27-28 y en la tabla 1 (ver anexo).

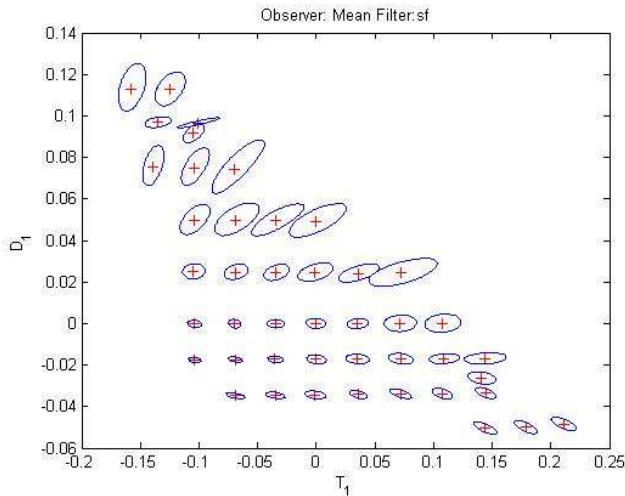


Figura 27. Elipses de discriminación en el espacio ATD95 para el observador promedio Sin Filtro.

Resultados

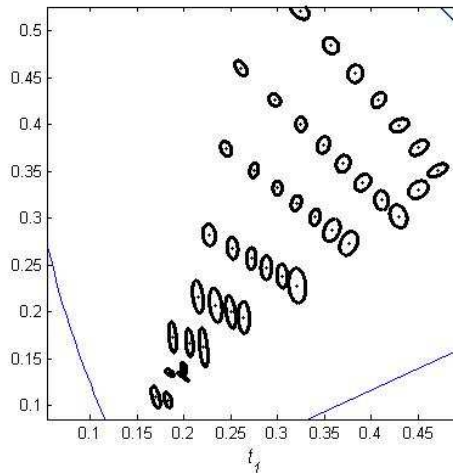


Figura 28. Elipses de discriminación en el espacio CIExy1931 para el observador promedio Sin Filtro.

Para el observador con el filtro Gris los resultados se presentan en las fig. 29-30 y en la tabla 2 (ver anexo).

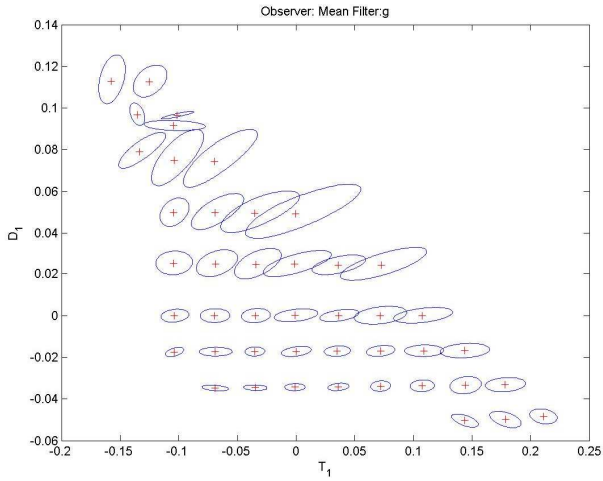


Figura 29 Elipses de discriminación en el espacio ATD95 para el observador con filtro Gris.

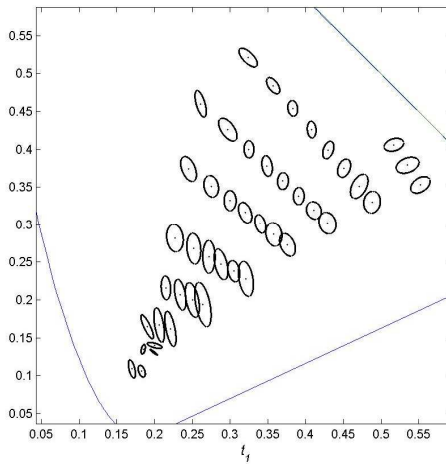


Figura 30. Elipses de discriminación en el espacio CIExy1931 para el observador con filtro Gris.

Resultados

Para el observador con filtro Marrón los resultados se presentan en las fig.31-32 y en la tabla 3 (ver anexo).

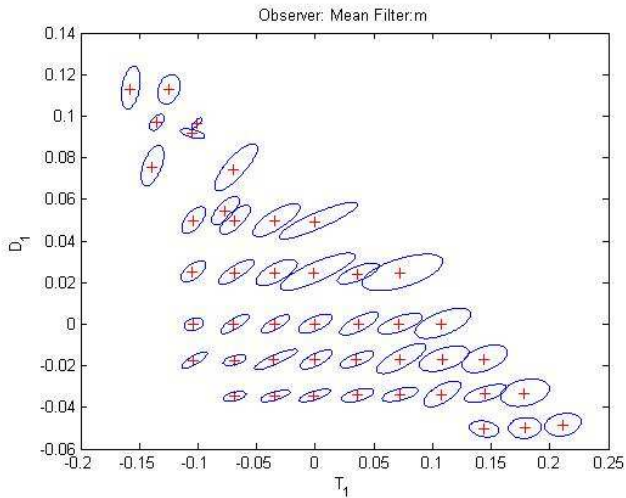


Figura 31. Elipses de discriminación en el espacio ATD95 para el observador con filtro Marrón.

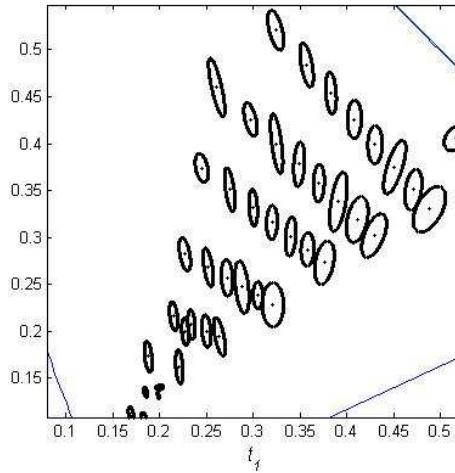


Figura 32. Elipses de discriminación en el espacio CIExy1931 para el observador con filtro Marrón.

Para el observador con filtro Verde los resultados se presentan en las fig. 33-34 y en la tabla 3 (ver anexo).

Resultados

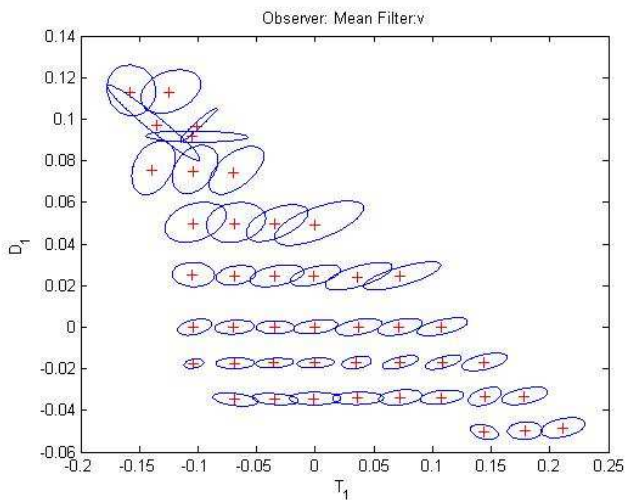


Figura 33. Elipses de discriminación en el espacio ATD95 para el observador con filtro Verde.

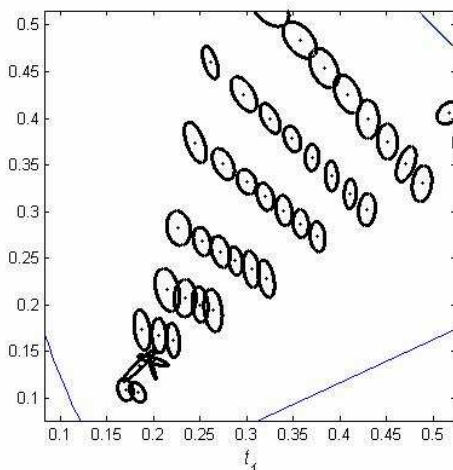


Figura 34. Elipses de discriminación en el espacio CIExy1931 para el observador con filtro Verde.

Resultados

Para el observador con filtro Verde-Gris los resultados se presentan en las fig. 35-36 y en la tabla 4 (ver anexo).

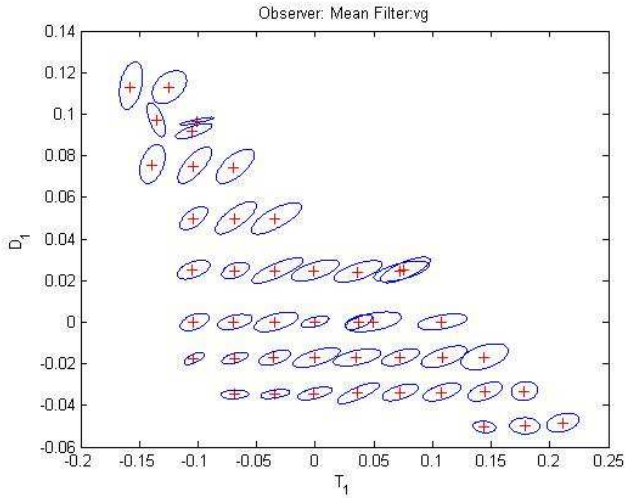


Figura 35. Elipses de discriminación en el espacio ATD95 para el observador con filtro Verde-Gris.

Resultados

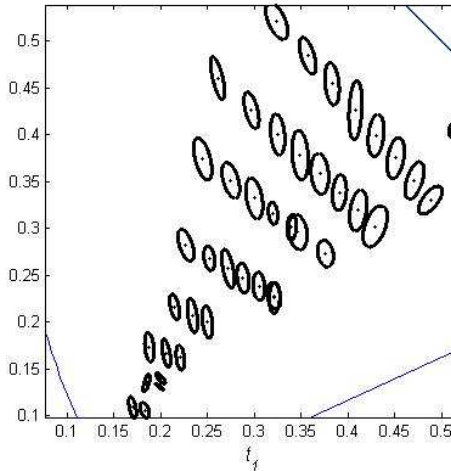


Figura 36. Elipses de discriminación en el espacio CIExy1931 para el observador con filtro Verde-Gris.

Como se puede comprobar en todos los casos, si observamos el espacio ATD95, que es más uniforme, las elipses más grandes corresponden a las situadas en la zona de los azules, a continuación las rojas y por último las verdes.

También hay evidencia de que los canales T y D no son independientes dado que, si estudiamos los tamaños de las elipses de discriminación dejando constante una de las variables y cambiamos la otra, el umbral en el canal constante varía, lo que implica un ángulo de giro de las elipses al ser representadas en el espacio de color, es decir, el eje de peor

Resultados

discriminación no está orientado según los ejes cardinales T y D, figuras 27, 29, 31, 33 y 35. Aparentemente, la interacción es mayor cuanto mayores son los valores de D o T.

Al introducir un filtro, la orientación de las elipses parece cambiar globalmente en la misma dirección (excepto por la esquina de $D>0$ y $T<0$).

Resultados

A
N
Á
L
I
S
I
S

Análisis

Tras obtener los resultados presentados en la sección anterior, pasamos a calcular el conjunto de elipses de discriminación (que llamaremos patrón), un patrón que nos servirá para estimar cómo es la discriminación de color de un observador normal en todo el diagrama cuando lleva o no antepuestos filtros coloreados. Para ello calculamos, mediante interpolación del mosaico de elipses obtenidas empíricamente, el resto de elipses de discriminación con el fin de rellenar todo el espacio cromático (siempre dentro del triángulo de primarios del monitor) y con un cierto grado de tolerancia al solapamiento de áreas que es necesario admitir. Nos valemos por tanto del software Matlab, de la librería de funciones Colorlab, y de una librería de funciones específica para este estudio, realizada en entorno Matlab por el Grupo de Visión y Color del que formo parte, en colaboración con el Grupo de Visión de la Universidad de Valencia.

La figura 37 corresponde al patrón para el observador promedio Sin Filtro. El resultado final depende de la distribución de las 44 elipses originales, por lo que no esperamos el mismo número de elipses finales cuando varíen las condiciones de medida o lo que es lo mismo, el tamaño de las elipses experimentales.

También comprobamos que hay cierto solapamiento en algunas elipses, debido a la

Análisis

tolerancia incluida en el algoritmo y que corresponde a un solapamiento máximo del 10% del área. Esto se ha hecho así para evitar la eliminación de demasiadas elipses y por tanto de la aparición de huecos no cubiertos por las mismas, aunque es un problema que no se ha podido solucionar totalmente todavía.

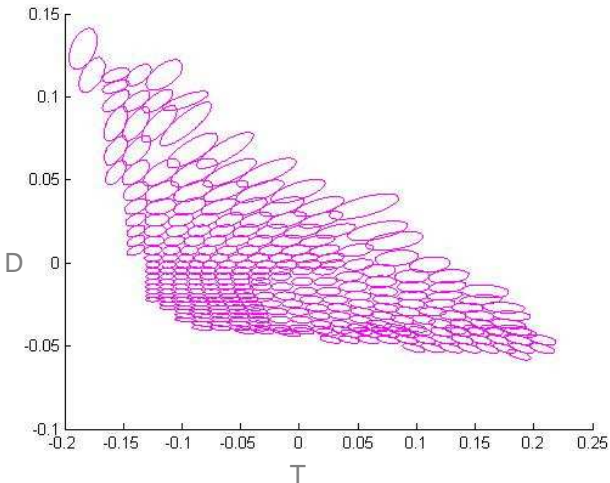


Figura 37. Patrón teórico discriminación de color en el espacio ATD95 para al observador Sin Filtro.

Las siguientes figuras corresponden a los patrones para los observadores promedio con filtros Gris, Marrón, Verde y Verde-Gris.

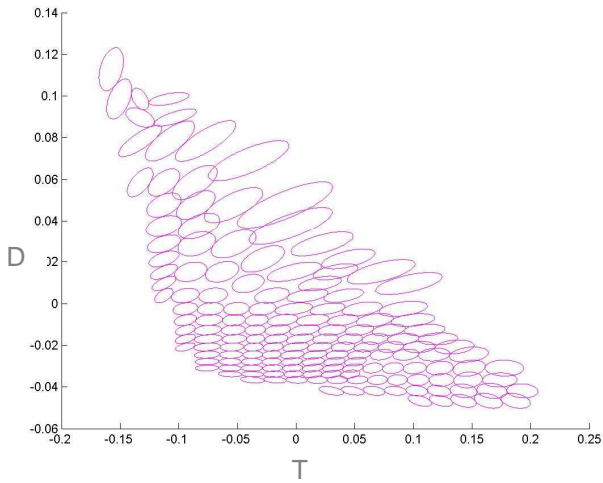


Figura 38. Patrón teórico discriminación de color en el espacio ATD95 para al observador Marrón.

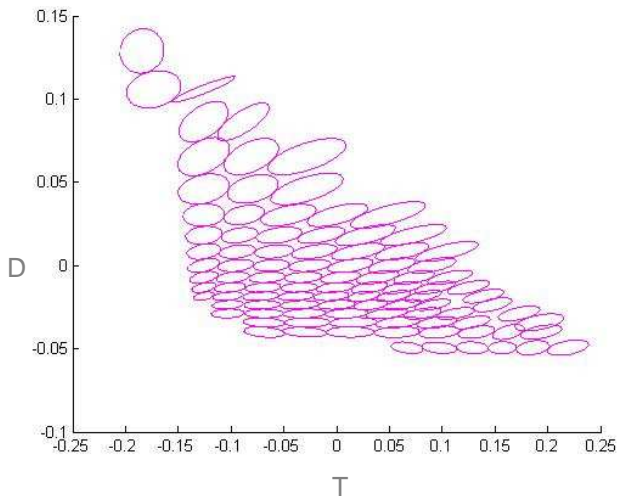


Figura 39. Patrón teórico discriminación de color en el espacio ATD95 para al observador Verde.

Análisis

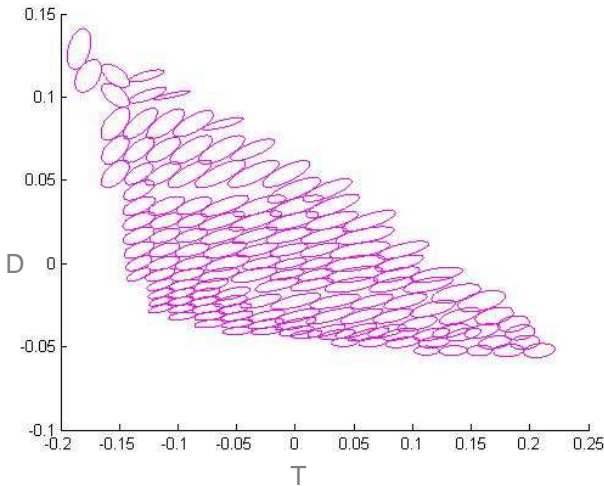


Figura 40. Patrón teórico discriminación de color en el espacio ATD95 para al observador Verde-Gris.

ESTUDIO ESTADÍSTICO:

A continuación se presenta una tabla que contiene datos promedio de las elipses medidas experimentalmente con el CCT.

Aparece el porcentaje de elipses que aumentan su tamaño al anteponer el filtro, el área promedio de esas elipses, el porcentaje de aumento y el ángulo de giro promedio referido al eje mayor de los umbrales de discriminación.

Tabla4 Datos estadísticos de las elipses con los filtros,

	G	M	V	VG
%elipses con aumento	95.5	77.3	97.7	84.1
Área promedio $\times 10^{-4}$	1.2 ± 0.03	1.3 ± 0.03	1.7 $\pm 0,03$	1.2 ± 0.03
Diferencia con sin filtro $\times 10^{-5}$	5.1	6.7	10.3	5.8
% de aumento	76.82	101.09	154.69	86.24
Angulo de giro medio($^{\circ}$)	12.68 ± 22	3.45 ± 15	15.14 ± 18	9.60 ± 15
H	1	1	1	1
p	0	0	0	0

Los dos últimos parámetros de la tabla. 4 H y p, corresponden al test de Kolmogorov-Smirnov. Esta es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar si existen diferencias significativas entre dos muestras que sigan una distribución continua, sin el requisito de que esta sea normal. Con esta

Análisis

prueba pretendemos demostrar estadísticamente que las elipses experimentales sin filtro son significativamente diferentes de las que se obtienen cuando llevamos puesto un filtro.

La hipótesis nula (H_0) para el estudio es: “El conjunto de las áreas de las elipses obtenidas experimentalmente con el ojo desnudo son de igual área que las que se obtienen con un filtro antepuesto”.

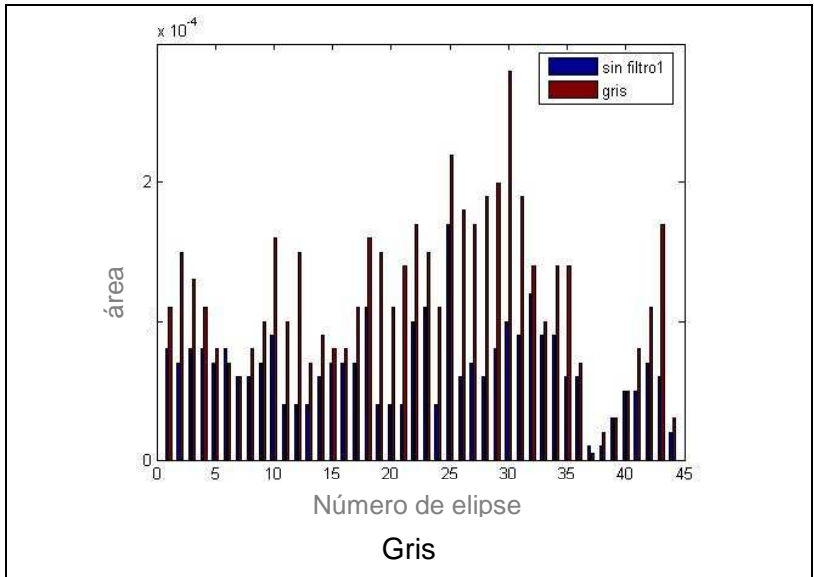
El parámetro H es el indicador de si podemos rechazar la hipótesis nula, y en todos los casos fue positivo, por lo que podemos rechazarla. El p-valor obtenido es la probabilidad de que, rechazando la hipótesis nula, nos equivoquemos. En general se acepta un p-valor ≤ 0.05 , en nuestro caso el p-valor es tan pequeño que podemos aproximarlo a 0.

Como conclusión, podemos rechazar la hipótesis nula, y por lo tanto es cierto que el conjunto de las áreas de las elipses obtenidas experimentalmente con el ojo desnudo son significativamente diferentes a las que se obtienen con un filtro antepuesto.

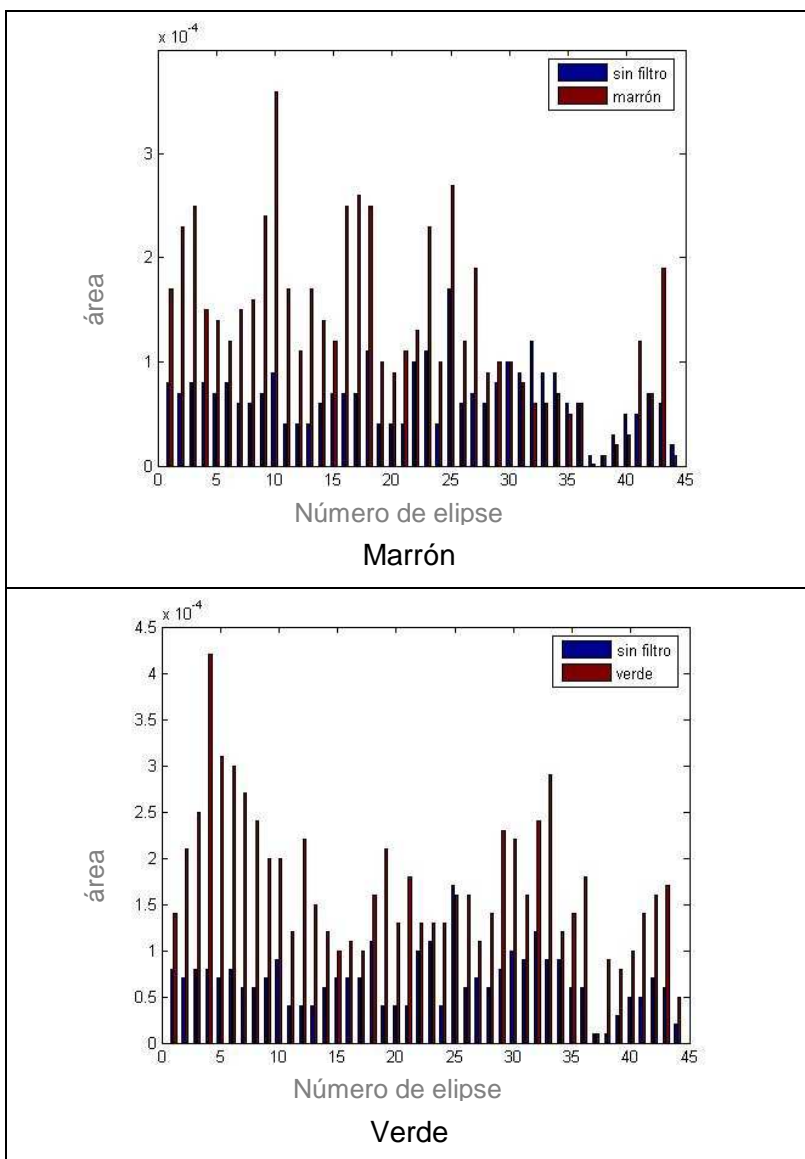
Como se puede comprobar con cualquier filtro, el área de las elipses aumenta, con lo que la confusión de colores será mayor, fig 41

El aumento relativo de las elipses es mayor si miramos a través de un filtro verde o

uno marrón y menor para el verde-gris y gris, siendo este último el que menor cambio produce, como era de esperar, ya que es un filtro bastante acromático.



Análisis



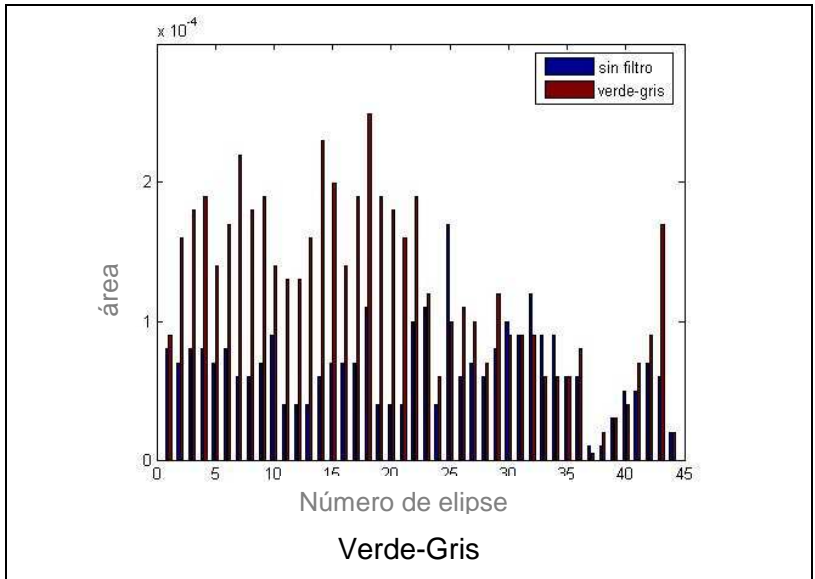


Figura 41 Comparación de las áreas de las elipses de discriminación experimentales con filtros coloreados y con ojo al desnudo.

En cuanto al ángulo de giro promedio, las elipses que sufren mayor cambio de orientación en su eje mayor son las calculadas con el filtro verde, después el gris a continuación el verde-gris y por ultimo el marrón.

5.1 FILTRADO DE IMÁGENES DIGITALES

A continuación pasamos a realizar el filtraje de una serie de imágenes en formato digital, con el fin de comprobar la disminución de la paleta de colores al aplicar las elipses de discriminación obtenidas.

A la hora de extraer conclusiones a partir de estas imágenes filtradas, hay que tener en cuenta diferentes aspectos.

En primer lugar conviene aclarar que aunque presentamos siempre la imagen original, no es ésta la que debe servirnos para comparar el comportamiento de los diferentes filtros coloreados, ya que la propia imagen Sin Filtro ya ha sufrido modificaciones respecto a la original, al haber sido filtrada por un patrón medido experimentalmente.

En segundo lugar, indicar que las imágenes no se representan con la apariencia que tienen para el observador cuando las ve a través del filtro coloreado correspondiente (obviamente, excepto en el caso del observador Sin Filtro). Lo que se ha representado en cada imagen son los colores originales pero con una paleta más reducida, correspondiente a la sustitución de colores que caen dentro de una misma elipse por el color correspondiente al centro de dicha elipse. Es decir, se muestra una imagen que elimina los colores metámeros de la imagen inicial al mirar

a través del filtro. Queda pendiente, para posteriores estudios, el cálculo de la apariencia real de toda la paleta de colores a través de cada uno de los filtros.

Dependiendo de la paleta original de colores contenida en la imagen de partida, el efecto del filtraje puede quedar diluido al no haber muchos colores dentro de una elipse de discriminación. También puede ocurrir que, si los colores están muy próximos al centro correspondiente, al ser sustituidos casi no exista variación en la apariencia.

Decidimos utilizar imágenes con luminancia constante para evaluar mejor las pérdidas de cromaticidad. Se ha utilizado un valor de 13cd/m^2 , ya que es la luminancia media usada en la determinación de las medidas experimentales. Los resultados del filtraje son mostrados en la figura

Como se puede observar en la fig 42 la mayor parte de la información de una imagen se codifica por los cambios de luminancia. Al eliminar estos datos, no se puede reconocer prácticamente qué objetos hay en la imagen.

Análisis

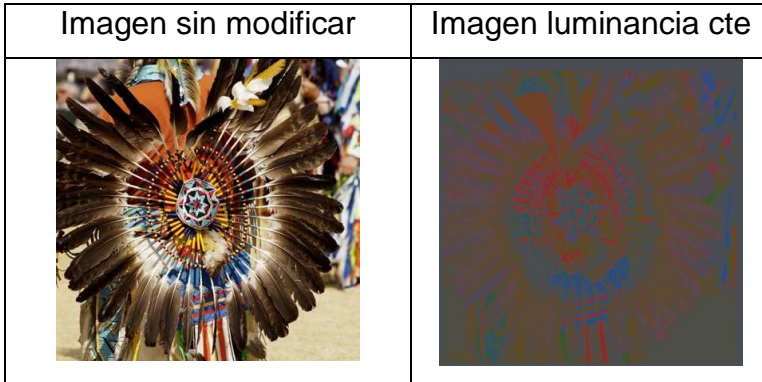


Figura 42 Imagen original a la derecha e imagen con luminancia constante.

Si atendemos sólo al cambio en cromaticidades, se ve que al filtrar una imagen con el patrón del observador a ojo desnudo, no existe prácticamente variación, obteniendo que regiones que eran diferentes en la imagen original siguen siendo diferentes en la imagen filtrada.

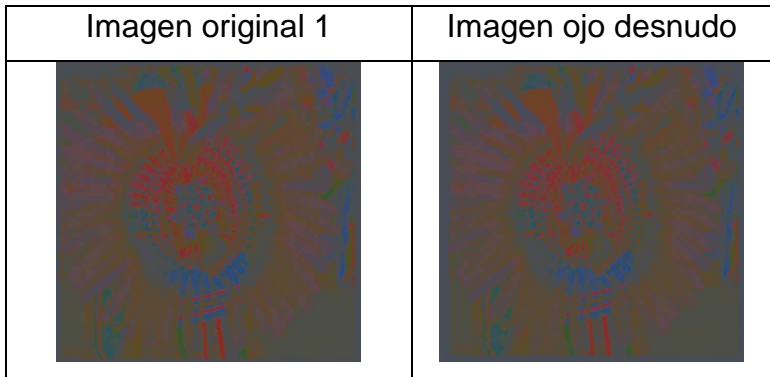


Figura 43. Imágenes naturales con luminancia constante. Imagen original (derecha) e imagen filtrada con el patrón sin filtro (izquierda)

No podemos afirmar lo mismo en cuanto al número de colores de la paleta. Mientras que en la imagen original existen un número total de cromaticidades diferentes de 6294, en la imagen simulada tenemos tan sólo existen 1102. Se ha representado en la figura 44 la paleta de colores en el diagrama cromático CIE_{xy}. Esto es muy importante a la hora de comprimir imágenes, puesto que la información que se utiliza se reduce pero la imagen prácticamente no cambia.

Análisis

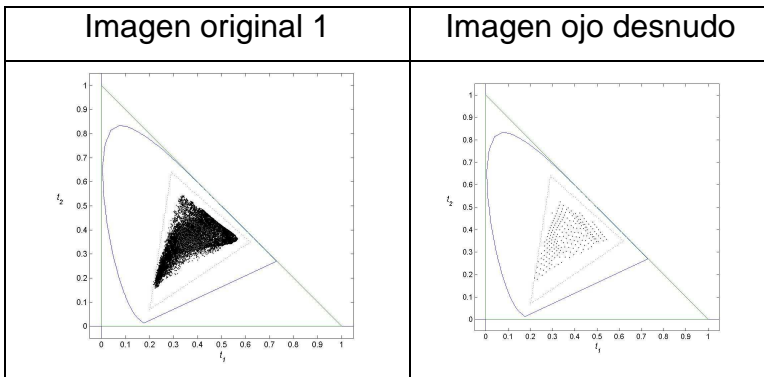


Figura 44. Distribución de colores en la imagen original (der.), distribución de colores en la imagen filtrada con el patrón sin filtro (izq.).

El siguiente paso para evaluar las pérdidas de discriminación cromática ha sido utilizar una imagen con luminancia constante y variación de tono y croma constante, lo que nos asegura una distribución más uniforme de cromaticidades.

El resultado de esta fase viene reflejado en las figuras 45 y 46.

Analizamos qué ocurre al filtrar con el patrón del observador medio a ojo desnudo.

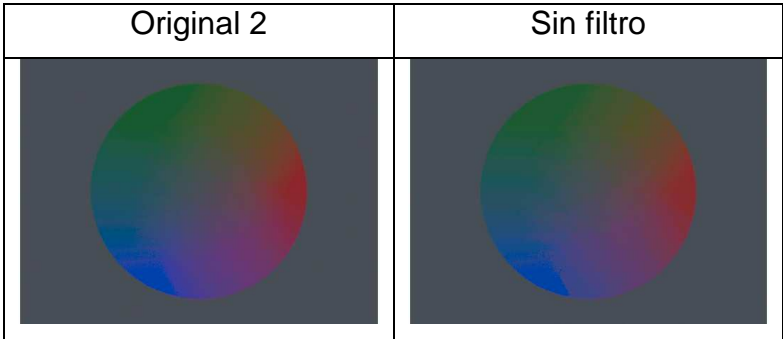


Figura 45. Comparación de la Imagen original 2 y la Imagen original Sin Filtro

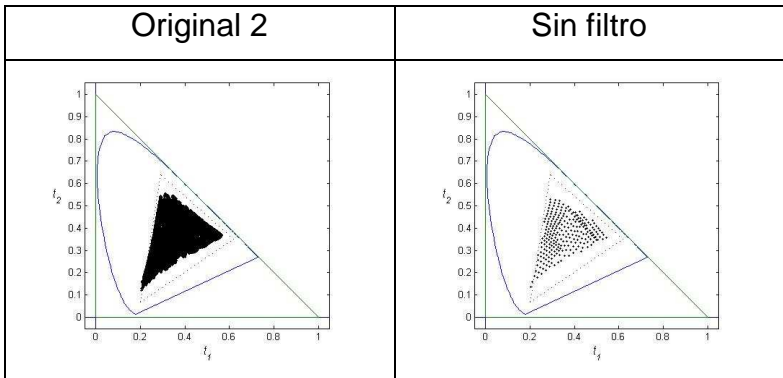


Figura 46. Paleta de colores en el diagrama cromático de la imagen original (der.) y de la imagen filtrada con el patrón sin filtro (izq.).

Con los 4 filtros observamos que no existen grandes cambios. Hay más pérdidas de

Análisis

discriminación en la zona de azules y violetas como se esperaba por el tipo de filtro utilizado.

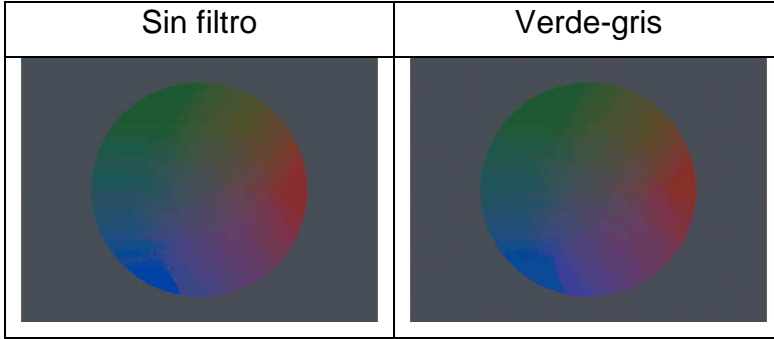


Figura 47. Comparativa de la imagen Sin Filtro y con filtro Verde-Gris.

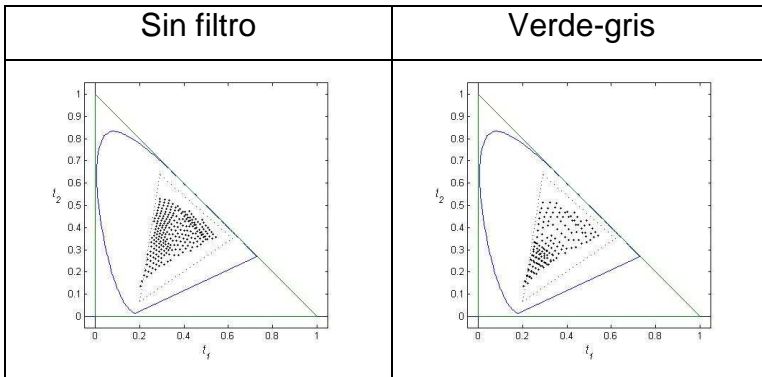


Figura 48 Paleta de colores en el diagrama cromático de la imagen original (der.) y de la imagen filtrada con el patrón verde-gris (izq.).

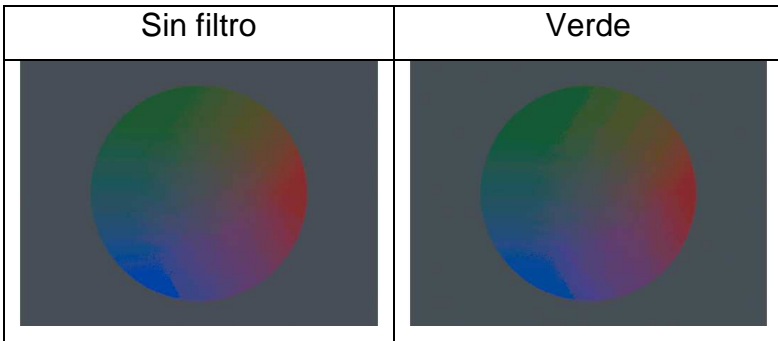


Figura 49. Comparativa de la imagen Sin Filtro y con filtro Verde.

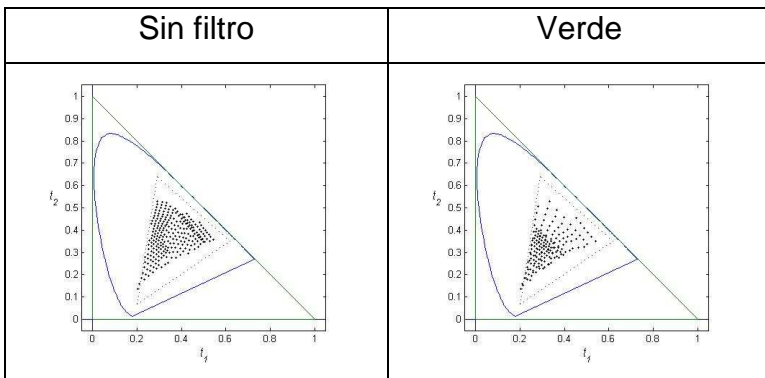


Figura 50 Paleta de colores en el diagrama cromático de la imagen original (der.) y de la imagen filtrada con el patrón verde (izq.).

Análisis

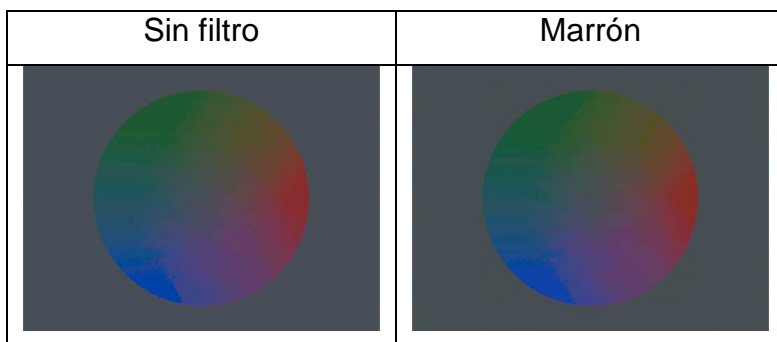


Figura 51. Comparativa de la imagen Sin Filtro y con filtro Marrón.

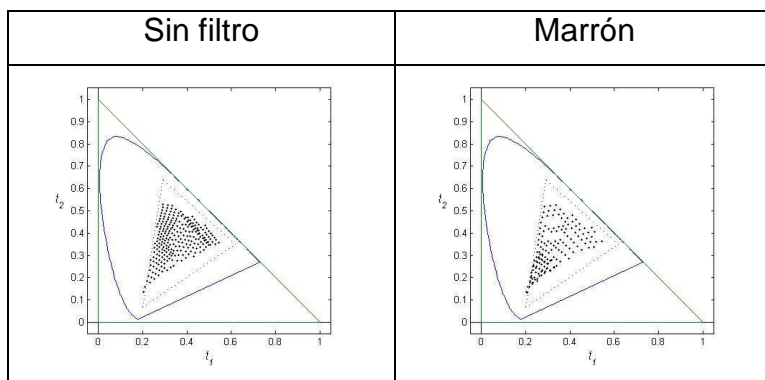


Figura 52. Paleta de colores en el diagrama cromático de la imagen original (der.) y de la imagen filtrada con el patrón marrón (izq.).

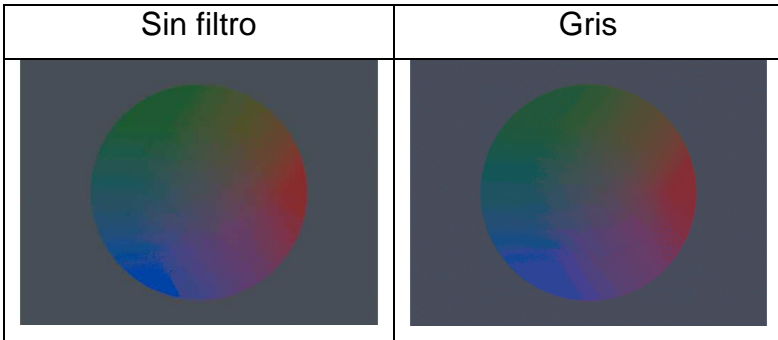


Figura 53. Comparativa de la imagen Sin Filtro y con filtro Gris.

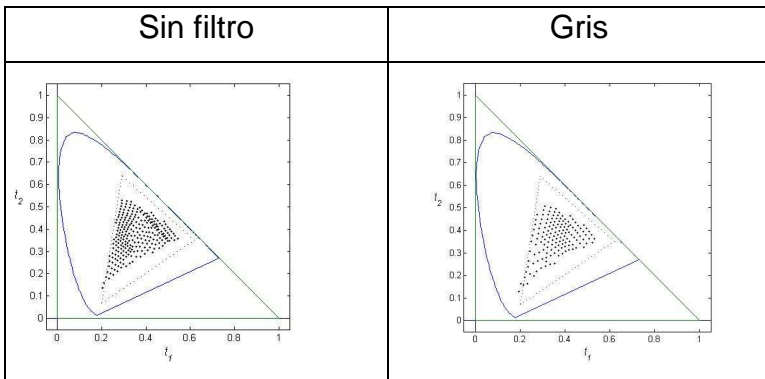


Figura 54. Paleta de colores en el diagrama cromático de la imagen original (der.) y de la imagen filtrada con el patrón gris (izq.).

Análisis

Además, como se puede ver en todos los casos. el número de colores diferentes se reduce considerablemente, con lo que con menos información el aspecto final no debería variar significativamente. En el caso de las imágenes filtradas a través de los filtros coloreados, la pérdida de colores es mayor que con el patrón sin filtro, como ya esperábamos.

Se observa que algunos colores cercanos al azul, que son elegidos como uno de los colores seleccionados en mi paleta final, caen fuera del triángulo de primarios del monitor. Esto se debe a que el monitor utilizado para los cálculos y estas representaciones gráficas de las imágenes es un CRT estándar, mientras que en el proceso de medida, se trabajó con el triángulo de primarios del monitor Mitsubishi. En la figura 55 podemos ver ambos triángulos y comprobar que no son exactamente iguales.

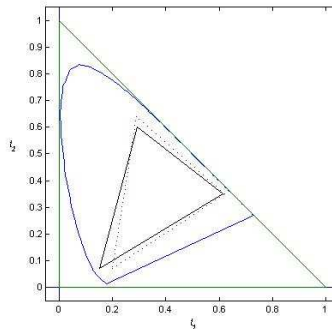
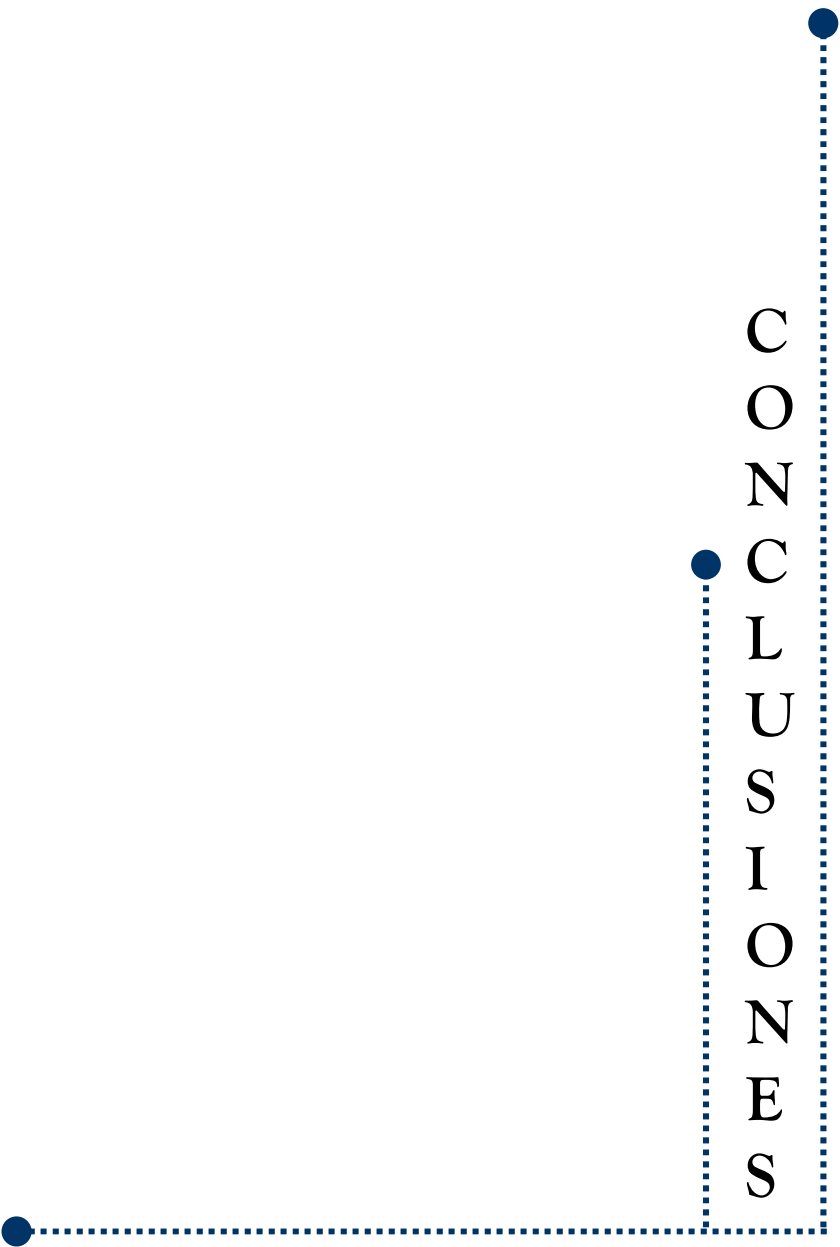


Figura 55. Triángulo de los fósforos de primarios del monitor. En línea continua el correspondiente al Mitsubishi y en discontinua la de un CRT estándar.

C
O
N
C
L
U
S
I
O
N
E
S



Conclusiones

En este estudio hemos trabajado con un algoritmo que simula los efectos de las propiedades de discriminación cromática del sistema visual humano, y ha sido llevado a cabo como parte de la colaboración entre el Grupo de Visión de la Universidad de Valencia y el Grupo de Visión y Color de la Universidad de Alicante. Este modelo permite estimar el tamaño y la orientación de las elipses de umbral cromático en todo el espacio de color, a partir de la medida de 44 elipses de discriminación.

Las **conclusiones** que podemos extraer de este estudio son las siguientes:

☞ El proceso de construcción del mosaico depende de los tamaños de las elipses experimentales, obteniéndose que para elipses pequeñas el algoritmo de rellenado del patrón resulta en un empaquetamiento más compacto.

☞ El proceso de limpieza del mosaico para evitar los solapamientos de elipses deja zonas del diagrama sin cubrir, lo que posiblemente se refleje en el resultado final como efectos no deseados, al tener que establecer un criterio de asignación de esos colores a la elipse de centro más cercano.

☞ Como esperábamos, la imagen filtrada con el patrón Sin Filtro, no presenta cambios apreciables de apariencia con respecto a la

Conclusiones

imagen original, aunque sí en el número de colores de cromaticidad diferente de la paleta.

↻ Cuando se filtra la imagen con las elipses de filtros coloreados, también se observa esta reducción de colores, pero depende de la cromaticidad del filtro. La mayor reducción se da con el filtro verde, que es el que tiene elipses con mayor área.

↻ Parece que el modelo evalúa la pérdida de discriminación a la baja, ya que con los filtros coloreados no hay pérdidas notables como cabría esperar según los tamaños de las elipses experimentales obtenidas.

↻ A la vista de los resultados de las imágenes filtradas, la elección de la librería de imágenes parece un factor crítico, pudiendo darse las siguientes situaciones:

- Que haya pocos colores de la imagen dentro de cada elipse. Por ello, hemos hecho pruebas tanto con imágenes originales de paleta reducida a 256 colores como con imágenes de color verdadero, llegando a la conclusión de que con la paleta reducida aparecen fallos en la asignación de colores, además de apreciarse mucho menos la reducción posterior tanto en la paleta como en la imagen pseudocoloreada.

- Que los colores dentro de una elipse estén distribuidos cerca del centro de la elipse, por lo que al ser de apariencia similar al centro

los cambios no serían muy apreciables. Vistos los diagramas cromáticos de las imágenes originales, esto parece poco probable, salvo cuando la paleta inicial de la imagen deja sin recubrir de forma densa una región particular del diagrama de color (ver figura 44 como ejemplo).

- Que las gamas de colores de las imágenes seleccionadas no sean adecuadas para resaltar la pérdida de discriminación. Nótese que, sin embargo, la figura 45 presenta una gama completa de tonos y croma, y que en esta figura los efectos del filtro son más marcados.

Las **perspectivas de futuro** que tenemos en proceso son:

↻ Mejorar el algoritmo, tanto en el proceso de obtención del patrón a partir del mosaico de elipses experimental, incluyendo la extrapolación de los datos experimentales hacia los límites del monitor, como en el proceso de filtraje de todo tipo de imágenes.

↻ Dar el paso de un simple algoritmo de cálculo de elipses a un modelo de discriminación del espacio visual, ligado a un modelo particular de visión del color.

Conclusiones

☞ Trabajar en un espacio de color con mayor grado de uniformidad perceptual, como el CIECAM02.

☞ Sustituir el proceso de pseudocoloración usado en el algoritmo de simulación de la discriminación por un modelo de simulación de la apariencia, con el fin de interpretar los resultados con mayor grado de aproximación a las situaciones reales. Esto nos llevaría a la determinación de los pares correspondientes bajo las nuevas condiciones de observación, por ejemplo, con cada uno de los filtros coloreados.

☞ Cuantificar la pérdida de discriminación mediante software estudiando con más detalle el efecto de la reducción de paleta en la calidad de imagen, particularmente con filtros. Qué es lo relevante: el porcentaje de colores perdidos, el número de colores que quedan, en qué zona del espacio de color se pierden más colores, etc.

☞ Comprobar si el patrón final calculado a partir de otros centros de elipses diferentes es similar.

APLICACIONES

Algunas de las aplicaciones previstas de este algoritmo podrían ser:

↻ Situaciones en que es deseable una reducción del tamaño de la imagen, ya que puede reducirse la paleta teniendo en cuenta la discriminación cromática del usuario final, como por ejemplo en compresión de imágenes.

↻ Aplicaciones optométricas, detección de visión cromática defectiva y patologías vinculadas (DMAE, glaucoma,...), en las que la paleta de colores es determinante para el correcto diagnóstico.

↻ Cálculo de gamas de colores reproducibles para diferentes dispositivos, visión artificial.

Conclusiones

B
I
B
L
I
O
G
R
A
F
Í
A

Bibliografía

7.1 LIBROS

D. H. Hubel; *Ojo cerebro y visión*;
Universidad de Murcia, 2000

D. Marr; *Visio, a computacional investigation into the human representation and processing of visual information*; W.H. Freeman and company
New York, 1982

D.A. Atchison, G. Smith; *Optics of the human eye*; Butterworth-Heinemann, 2000

E.C.Carterette, M.P. Friedman; *Seeing*;
Handbook of perception and cognition,
2000.

Fairchild MD. *Color Appearance Models*.
Reading, MA: Addison-Wesley, 1998.

Gegenfurtner, KR., Sharpe, L.T. *Color Vision. From genes to perception*.
Cambridge University, 1999

Bibliografía

Guth S L. Model for color vision and light adaptation. *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, 976-993 (1991). Erratum. *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 344 (1992).

Guth S L. The ATD Model as a Uniform Chromaticity Space, *Proc. CIM' 98 Colour Imaging in Multimedia*, pp. 19-26, (1998).

Guth S.L. ATD model for color vision I: background. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, **2170**, 149-152, (1994).

Guth S.L. Further applications of the ATD model for color vision. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, **2414**, 12-26 (1995).

Hunt RWG. *The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television, 5th ed.* Tolworth, England: Fountain Press, 1995.

J.D. Mollon, B.C.Regan; *Cambridge colour test (handbook)*; Cambridge University, 1999

Bibliografía

J.M. Artigas, P. Capilla, A. Felipe, J. Pujol;
*Óptica fisiológica, Psicofisiología de la
visión*; Interamericana McGraw-Hill, 1995

Manual de usuario Mitsubishi, Mitsubishi
Electric Corporation, 1991

Manual de usuario VSG, Cambridge
Research System, 1995

P. Capilla, J.M. Artigas, J. Puyol;
Fundamentos de colorimetría; Universidad
de Valencia, 2002

P.K. Kaiser, R.M. Boynton; *Human colour
vision*; Optical Society of America, 1996

R. Snowden, P. Thompson, T. Troscianko;
*Basic Vision, an introduction to visual
perception*; Oxford University Press, 2006

S.H.Schwartz; *visual perception, a clinical
orientation*; McGraw-Hill, 1999

Bibliografía

Wyszescski-Stiles; *Colour science, concepts and methods, quantitative data and formulae*; John Wiley & Sons, 1982

7.2 ARTÍCULOS Y REVISTAS

D. Gómez López, E. Domingo Luna, A. Sánchez Cerdán, D. del Fez Saiz; *Estudio clínico de la aceptación de filtros fisiológicos en pacientes de cirugía refractiva*; 2006-07-25

D de Fez, MJ Luque y V Viqueira. *Enhancement of contrast sensitivity and losses of chromatic discrimination with tinted lenses*. *Optometry and Vision Science*, Vol 79, No.9, Septiembre 2002

M.C. Puell Marín; *Codificación de la señal visual*; Monografía 7 de la Gaceta Óptica, Suplemento a la revista Gaceta Óptica N° 278, 1994

J. Lee; *El ojo y el cerebro*; Revista Creces, Junio 1997 (Traducido del artículo aparecido en New Scientist, Mayo 15 de 1997)

7.3 PÁGINAS WEB

Web1:<http://dragon.uml.edu/psych/illusion.html> (14-2-2008)

Web2:
http://en.wikipedia.org/wiki/MacAdam_ellipse(14-2-2008)

Web3:
<http://es.wikipedia.org/wiki/retina/Oftalmologia/Neurooft.html> (14-2-2008)

(Dr. C. Salgado Alarcón)

Web4:
<http://escuela.med.puc.cl/paginas/Cursos/quinto/Especialidades/>(21-4-2008)

Web5: <http://mural.uv.es/retina/> (14-2-2008)

Web6:
http://psych.hanover.edu/Krantz/sen_tut.html (22-4-2008)

Web7:
<http://webvision.med.utah.edu/spanish/fotorre.html>(13-5-2008)

Bibliografía

Web8:http://www.e-oftalmologia.com/area_formacion/fisiologia/index.html (14-2-2008)

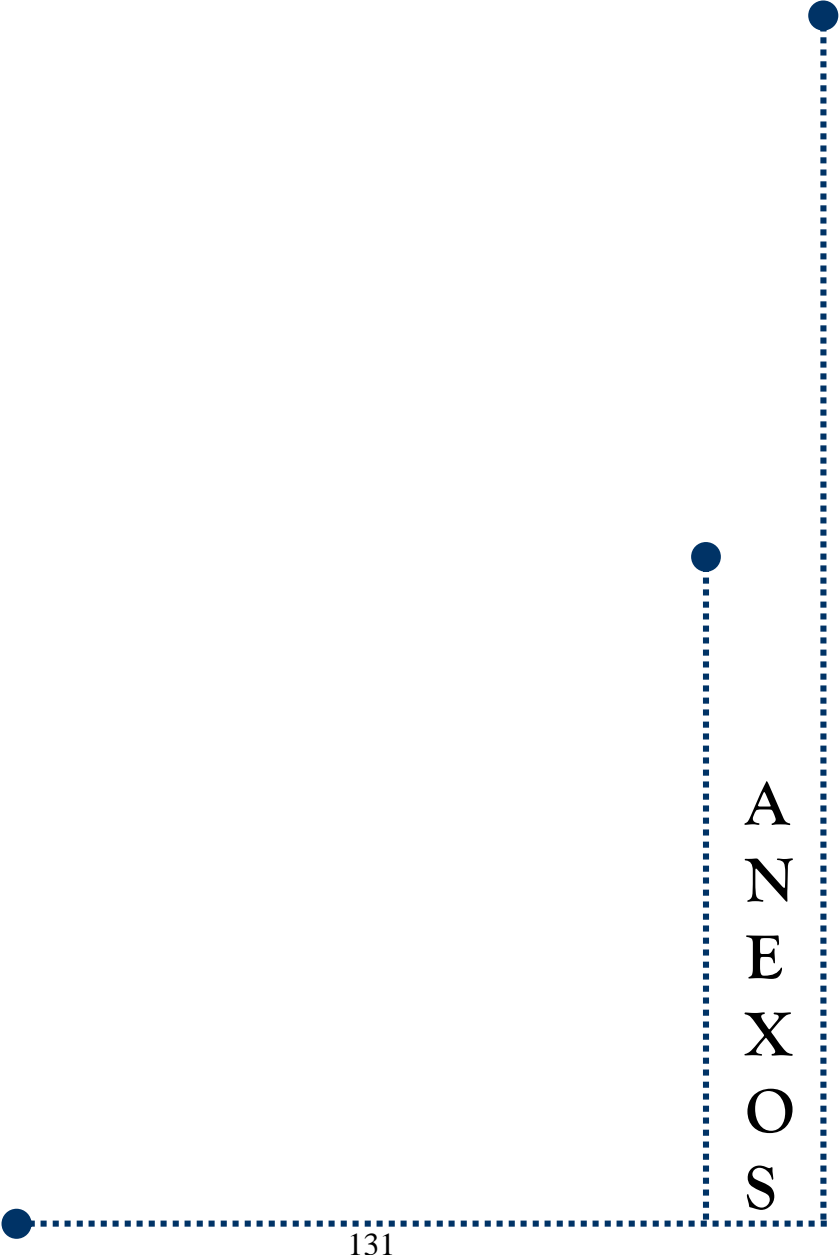
Web9:
<http://www.gusgsm.com/faqcolor/inicio.html>
I (14-2-2008)

Web10: <http://www.illusionworks.com/>
((21-2-2008)0)

Web11:
<http://www.monografias.com/trabajos7/ojo/>
(21-4-2008)ojo.shtml#cg

Web12:
<http://www.norville.co.uk/pdfs/part1.pdf>(3-5-2008)

Web13:
<http://www.ucm.es/info/fgu/foro/pvilla.pdf>
(14-2-2008)



A
N
E
X
O
S

Anexos

Tabla 5 Datos de las elipses experimentales obtenidas en el espacio CIE1931xy para el observador promedio Sin Filtro.

Eje mayor	Desv.std	Ratio	Ángulo	Desv.std
0,025	0,007	2,05	17	9
0,026	0,011	2,39	19	11
0,027	0,007	2,27	15	6
0,022	0,006	1,66	141	13
0,018	0,005	1,22	123	61
0,019	0,006	1,20	80	71
0,018	0,007	1,43	47	24
0,021	0,008	1,63	22	20
0,022	0,006	1,70	36	24
0,023	0,008	1,41	35	42
0,018	0,004	1,89	123	19
0,014	0,004	1,27	126	7
0,016	0,004	1,43	95	44
0,018	0,007	1,47	71	25
0,019	0,009	1,32	72	47
0,020	0,005	1,37	49	38
0,021	0,007	1,45	96	62
0,025	0,010	1,45	111	75
0,017	0,005	1,55	112	27
0,015	0,006	1,50	91	14
0,016	0,005	1,82	79	41
0,025	0,014	1,57	67	34
0,027	0,008	1,54	66	23
0,017	0,008	1,63	73	11
0,037	0,023	2,07	96	6
0,023	0,010	2,31	89	6
0,025	0,010	2,18	89	4
0,023	0,009	2,06	95	10
0,023	0,011	1,72	97	9

Anexos

0,034	0,011	2,87	92	4
0,035	0,013	3,60	98	6
0,036	0,014	2,84	98	7
0,035	0,019	3,25	97	3
0,042	0,009	5,12	96	6
0,030	0,016	3,93	94	3
0,033	0,015	4,29	95	6
0,015	0,016	8,07	141	78
0,011	0,002	2,16	142	75
0,017	0,004	2,35	106	5
0,024	0,010	3,12	105	4
0,018	0,007	1,71	81	13
0,025	0,010	2,30	94	10
0,022	0,008	2,08	27	8
0,013	0,007	2,58	104	80

Anexos

Tabla 6 con los datos de las elipses experimentales obtenidas en el espacio CIE1931xy para el observador con el filtro Gris.

Eje mayor	Desv.std	Ratio	Ángulo	Desv.std
0,027	0.012	1,66	17	30
0,032	0.018	1,66	21	28
0,028	0.013	1,58	35	11
0,032	0.004	2,29	134	10
0,024	0.005	1,95	126	13
0,021	0.006	1,62	98	13
0,022	0.006	1,91	94	13
0,024	0.008	1,84	71	29
0,025	0.009	1,62	68	47
0,029	0.013	1,33	82	75
0,036	0.020	3,15	106	6
0,035	0.017	2,02	125	21
0,023	0.013	1,73	91	26
0,028	0.021	2,07	99	5
0,023	0.016	1,57	86	26
0,023	0.009	1,61	88	18
0,023	0.014	1,22	111	33
0,029	0.016	1,33	107	29
0,035	0.019	2,00	112	8
0,027	0.007	1,67	90	28
0,029	0.010	1,55	102	32
0,032	0.015	1,51	100	17
0,032	0.014	1,72	113	24
0,029	0.015	1,84	110	26
0,047	0.030	2,55	100	5
0,044	0.029	2,67	91	11
0,042	0.016	2,62	104	10
0,041	0.023	2,23	95	14
0,037	0.016	1,69	98	15
0,059	0.023	3,18	101	11
0,047	0.016	2,85	102	5

Anexos

0,041	0.011	3,04	100	9
0,031	0.006	2,50	93	12
0,047	0.006	3,99	101	3
0,046	0.014	3,94	100	5
0,035	0.018	4,22	115	35
0,011	0.006	6,77	142	75
0,013	0.003	2,53	78	88
0,016	0.002	1,98	110	5
0,024	0.005	3,19	103	8
0,025	0.009	1,90	106	20
0,029	0.014	1,91	102	16
0,035	0.012	1,83	62	43
0,020	0.0100	3,43	165	9

Anexos

Tabla 7 con los datos de las elipses experimentales obtenidas en el espacio CIE1931xy para el observador con filtro Marrón.

Eje mayor	Desv.std	Ratio	Ángulo	Desv.std
0,031	0,001	1,46	47	49
0,041	0,004	1,86	56	16
0,045	0,010	1,98	55	9
0,043	0,009	3,13	104	11
0,048	0,019	4,00	100	14
0,045	0,011	4,07	94	6
0,041	0,032	2,79	89	7
0,041	0,019	2,65	89	6
0,060	0,011	3,70	72	5
0,053	0,009	1,98	61	20
0,064	0,022	6,00	103	4
0,036	0,013	3,07	103	3
0,064	0,025	6,18	97	8
0,048	0,041	4,15	87	6
0,040	0,038	3,38	88	13
0,064	0,028	4,11	81	11
0,049	0,024	2,32	78	8
0,049	0,034	2,36	68	6
0,031	0,021	2,43	102	5
0,039	0,040	4,42	93	8
0,047	0,023	5,08	98	14
0,036	0,027	2,57	88	5
0,047	0,006	2,42	79	35
0,036	0,009	3,14	89	5
0,047	0,014	2,05	90	12
0,039	0,014	3,24	93	6
0,056	0,014	4,05	96	9
0,042	0,013	4,60	99	13
0,036	0,017	3,44	100	3
0,041	0,016	4,29	102	22
0,035	0,013	3,72	95	8

Anexos

0,032	0,014	4,16	94	11
0,031	0,006	3,74	97	8
0,036	0,009	4,89	94	5
0,029	0,008	3,98	94	3
0,033	0,013	4,35	97	6
0,007	0,003	5,07	108	76
0,011	0,012	2,85	107	85
0,014	0,002	2,22	98	18
0,021	0,008	3,78	100	6
0,041	0,006	3,71	86	6
0,029	0,015	2,80	91	10
0,044	0,014	2,56	81	4
0,009	0,002	1,89	8	70

Anexos

Tabla 8 con los datos de las elipses experimentales obtenidas en el espacio CIE1931xy para el observador con filtro Verde.

Eje mayor	Desv.std	Ratio	Ángulo(°)	Desv.std
0,029	0,009	1,42	39	57
0,035	0,011	1,50	63	31
0,043	0,019	1,81	72	18
0,053	0,011	1,64	132	9
0,046	0,018	1,71	131	12
0,045	0,018	1,70	116	10
0,043	0,016	1,74	114	12
0,041	0,011	1,78	91	11
0,038	0,019	1,79	93	10
0,039	0,020	1,90	82	13
0,036	0,003	2,68	108	5
0,041	0,004	1,98	121	13
0,035	0,009	2,10	117	12
0,029	0,008	1,79	110	14
0,028	0,007	1,95	89	5
0,032	0,013	2,43	93	8
0,031	0,010	2,47	88	8
0,035	0,015	1,97	85	12
0,046	0,034	2,51	111	6
0,028	0,012	1,45	113	32
0,036	0,019	1,81	116	45
0,030	0,020	1,83	95	20
0,032	0,023	2,02	96	13
0,030	0,006	1,81	106	22
0,041	0,032	2,55	101	6
0,035	0,019	1,85	105	12
0,031	0,011	2,11	98	10
0,031	0,010	1,76	104	23
0,037	0,026	1,47	101	19
0,046	0,029	2,45	97	12
0,039	0,026	2,29	95	9

Anexos

0,040	0,033	1,72	89	12
0,047	0,039	1,93	105	8
0,037	0,012	2,73	95	6
0,037	0,016	2,46	93	7
0,044	0,018	2,68	98	10
0,023	0,012	11,03	109	92
0,048	0,064	6,40	44	68
0,023	0,011	1,66	121	25
0,024	0,007	1,53	102	12
0,033	0,014	1,93	98	5
0,040	0,018	2,39	98	5
0,040	0,011	2,31	70	27
0,033	0,022	5,11	163	5

Anexos

Tabla 9 con los datos de las elipses obtenidas en el espacio CIE1931xy para el observador con filtro Verde-Gris.

Eje mayor	Desv.std	Ratio	Ángulo(°)	Desv.std
0,023	0,001	1,36	55	49
0,031	0,004	1,51	55	16
0,039	0,010	2,04	61	9
0,042	0,009	2,31	114	11
0,040	0,019	2,94	107	14
0,046	0,011	3,06	96	6
0,063	0,032	4,62	87	7
0,045	0,019	2,76	84	6
0,044	0,011	2,59	80	5
0,036	0,009	2,25	52	20
0,047	0,022	4,32	103	4
0,040	0,013	3,05	104	3
0,044	0,025	2,96	95	8
0,053	0,041	3,11	94	6
0,044	0,038	2,35	95	13
0,038	0,028	2,60	86	11
0,044	0,024	2,54	81	8
0,046	0,034	2,14	70	6
0,047	0,021	2,91	105	5
0,044	0,040	2,63	100	8
0,039	0,023	2,45	106	14
0,038	0,027	1,92	99	5
0,029	0,006	1,75	102	35
0,023	0,009	2,38	97	5
0,029	0,014	2,05	100	12
0,042	0,014	3,83	101	6
0,032	0,014	2,56	97	9
0,026	0,013	2,33	99	13
0,036	0,017	2,62	109	3
0,033	0,016	2,92	88	22
0,034	0,013	3,30	97	8

Anexos

0,037	0,014	3,82	98	11
0,028	0,006	3,10	102	8
0,026	0,009	3,13	96	5
0,030	0,008	3,89	100	3
0,032	0,013	3,30	96	6
0,012	0,003	6,82	143	76
0,019	0,012	3,69	74	85
0,017	0,002	1,98	110	18
0,023	0,008	3,38	102	6
0,027	0,006	2,65	86	6
0,030	0,015	2,43	95	10
0,042	0,014	2,51	72	4
0,015	0,002	3,15	129	70