



**MÀSTER UNIVERSITARI EN OPTOMETRIA I CIÈNCIES DE LA VISIÓ**

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

---

**EVALUACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN A  
DISFUNCIONES DE LA VISIÓN DEL COLOR**

**ISAURA COCA TORRENTS**

Directors

**Aurora Torrents Gómez i Genís Cardona Torradeflot**  
Departament d'Òptica i Optometria

27/06/2012



## MÀSTER UNIVERSITARI EN OPTOMETRIA I CIÈNCIES DE LA VISIÓ

# Evaluación de las estrategias de adaptación a disfunciones de la visión del color

### RESUM

Este trabajo analiza la afectación de las deficiencias de la visión del color sobre las tareas cotidianas, el trabajo y la conducción, así como las estrategias desarrolladas para afrontar dichas dificultades. También se estudian los cambios producidos durante la evaluación de la visión del color bajo dos iluminantes distintos, un iluminante  $D_{65}$  (luz día) y un iluminante A (luz incandescente). Además, se analizan colorimétricamente las medidas de algunos colores contenidos en las láminas de uno de los test utilizados (test de Ishihara) bajo las mismas fuentes de luz para determinar la influencia del iluminante sobre la presentación del test.

Se ha evaluado la visión del color de 109 participantes mediante cuatro pruebas distintas (test de Ishihara, Farnsworth D15, Tritan Album y Anomaloscopio), bajo los dos iluminantes mencionados. A los sujetos que presentaron anomalías en la visión del color (10 de 109) se les entregó un cuestionario para determinar sus dificultades en la vida diaria y las estrategias desarrolladas para combatirlas.

La conclusión del trabajo es que los individuos con defectos en la visión del color tienen más dificultades realizando algunas tareas que los individuos sin tales afectaciones, resultando más complejas para los dicrómatas que para los tricrómatas anómalos. Por otra parte, se observó que el iluminante empleado para realizar las pruebas de la visión del color influencia los resultados obtenidos, causando incluso un cambio en el diagnóstico del tipo de anomalía. Igualmente, esta influencia del iluminante se puso de manifiesto en el análisis objetivo de las láminas del test de Ishihara.



**MÀSTER UNIVERSITARI EN OPTOMETRIA I CIÈNCIES DE LA VISIÓ**

La Sra. **Aurora Torrents Gómez** i el Sr. **Genís Cardona Torradeflot**, com a directors del treball

CERTIFIQUEN

Que la Sra. **Isaura Coca Torrents** ha realitzat sota la seva supervisió el treball **Avaluació de les estratègies d'adaptació a disfuncions de la visió del color** que es recull en aquesta memòria per optar al títol de Màster en Optometria i Ciències de la Visió.

I per a què consti, signo/em aquest certificat.

Sra. Aurora Torrents Gómez  
Directora del treball

Sr. Genís Cardona Torradeflot  
Director del treball

Terrassa, 27 de Juny de 2012

M'agradaria agrair la col·laboració de tots els participants procedents del Casal de la Gent Gran de Vilafranca, així com molt especialment de la Sonia i en David, de la Universitat de la Gent Gran de Terrassa, de les persones que han col·laborat virtualment i de l'Héctor Abril i el GOAPI (Grup d'Òptica Aplicada i Processament d'Imatge). També voldria agrair la col·laboració d'en Joan Antó, en Josep Pladellorens i en Jordi Torrents. I, sens dubte, agraeixo l'ajuda i paciència de la meva mare, la Teresa.

## ÍNDICE

---

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
2.1. INTRODUCCIÓN A LA VISIÓN DEL COLOR.....	8
2.2. COLORIMETRÍA.....	8
2.3. LA VISIÓN DEL COLOR.....	15
2.4. AFECTACIÓN DE LAS DEFICIENCIAS DE LA VISIÓN DEL COLOR EN LA VIDA DIARIA.....	24
<b>3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....</b>	<b>26</b>
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
4.1. PARTICIPANTES.....	27
4.2. EXAMEN OPTOMÉTRICO Y EVALUACIÓN DE LA VISIÓN DEL COLOR.....	27
4.3. CUESTIONARIO DE CALIDAD DE VIDA.....	32
4.4. ESTUDIO COLORIMÉTRICO DEL TEST DE ISHIHARA BAJO DOS ILUMINANTES DISTINTOS.....	32
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
5.1. EVALUACIÓN DE LAS DEFICIENCIAS EN LA VISIÓN DEL COLOR.....	34
5.2. RESULTADOS DEL CUESTIONARIO DE CALIDAD DE VIDA.....	35
5.3. ESTUDIO COLORIMÉTRICO DEL TEST DE ISHIHARA BAJO DOS ILUMINANTES DISTINTOS.....	38
<b>6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>48</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

La visión del color es la capacidad de distinguir objetos en función de las longitudes de onda ( $\lambda$ ) de la luz que reflejan, emiten o transmiten. El espectro visible por el ojo humano se muestra en la figura 1.1. La percepción visual no sólo depende de la luz que incide en el objeto, sino también del entorno que lo rodea y del sistema visual del observador. La percepción de los colores en un ser humano es un proceso subjetivo mediante el cual el cerebro responde a los estímulos que se producen cuando la luz entra en el ojo y reacciona con los fotorreceptores de la retina responsables de responder a la sensación cromática, los cuales conocemos con el nombre de conos.



Figura 1.1. Sensibilidad a la longitud de onda de la especie humana. (Espectro visible, Wikipedia)

Hablar de los colores es algo muy común y, a veces, subestimamos la verdadera importancia que tiene el concepto de color. El color es tanto luz, belleza y armonía, como equilibrio psíquico, confort y educación.

Los hombres más antiguos aprendieron por la visión de los colores muchos de los fenómenos naturales como el azul del cielo y la oscuridad de la noche, el verde de los campos, el amarillo de los desiertos, el blanco gélido de los glaciares y el rojo de la sangre, influyendo directamente en el desarrollo humano. La visión del color nos ayuda, por ejemplo, a saber si una fruta está lo suficientemente madura para poder comerla, aun sabiendo que el color de dicha fruta puede cambiar dependiendo de la luz que le llegue y del entorno que le rodee.

Durante muchos siglos, los seres humanos se han interesado por el color. Sin embargo, el estudio científico del color sólo se remonta en 1666, cuando Sir Isaac Newton realizó su clásico experimento con un prisma demostrando la dispersión de la luz blanca. Según Newton, el espectro estaba formado por siete colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta, probablemente por la analogía con las siete notas musicales.

Hoy en día sabemos que el proceso de la información cromática empieza en los conos y la elaboración del mensaje visual cromático se produce en la retina y en la corteza visual. Para poder gozar de una buena visión del color, es necesario que la información que le llega al cerebro sea correcta, ya que una alteración en cualquier punto del camino recorrido, alterará el resultado representado por el cerebro.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los conos son los responsables de responder a los estímulos cromáticos. Gracias a la espectrofotometría de absorción de los pigmentos sabemos las longitudes de onda que absorbe cada cono. Actualmente, se habla de pigmento sensible al rojo o a longitudes de onda larga (conos R: 564nm), pigmento sensible al verde o a longitudes de onda media (conos G: 533nm) y pigmento sensible al azul o a longitudes de onda corta (conos B: 437nm).

Las alteraciones en la percepción cromática se denominan discromatopsias. Pueden ser por deficiencia cromática -total inactivación de un pigmento determinado- o por anomalía cromática -alteración en el máximo de absorción de dicho fotopigmento-. En el caso de que los tres conos carezcan de fotopigmento se habla de acromatopsia, no existe la visión del color (visión en blanco y negro), si bien esta condición es relativamente poco frecuente.

Para nombrar los trastornos de la visión del color se han definido unos prefijos que se refieren al tipo de cono afectado, y unos sufijos que se refieren al hecho de que el trastorno sea imposibilidad total o dificultad en reconocer el color. Así pues, para el defecto en el sistema receptor del rojo se utiliza el prefijo *Prot-*, para el verde *Deuter-* y para el azul *Trit-*. El sufijo utilizado para la dificultad de reconocer un color primario es *-anomalía* y para la imposibilidad de reconocimiento *-anopía*.

La visión defectiva del color es hereditaria. La sensibilidad al rojo-verde es de herencia ligada al sexo, es decir, se transmite por los cromosomas sexuales, por lo que se transmite de manera desigual en la descendencia según el sexo. La sensibilidad al azul es de herencia autosómica de manera que se transmite por los cromosomas no sexuales, un solo ejemplar heredado de cualquiera de los padres es suficiente para causar la aparición del defecto. Las deficiencias y anomalías para la visión del rojo-verde se deben a un gen mutante en el cromosoma X, por lo que las mujeres sólo mostrarán el defecto cuando ambos cromosomas X contengan el gen anormal y los hombres, ya que el cromosoma Y no interviene, cuando el cromosoma X sea anormal. Este hecho hace que la frecuencia de anomalías cromáticas en los hombres sea más alta que en las mujeres. Dado que el gen para el azul se localiza en la pareja de cromosomas 7, existe la misma probabilidad para hombres y mujeres de que padezcan esta anomalía.

Por tanto, las alteraciones en la visión del color pueden influir en la calidad de vida de las personas, comportando que éstas desarrollen diferentes estrategias visuales y de identificación de los colores. Es importante que tanto la persona que padece una anomalía en la visión del color como las personas de su entorno sean conscientes de esta alteración para poder ayudarse y así facilitar la vida de la persona afectada. Esta es una de las razones por las que se recomienda realizar chequeos visuales, incluyendo el examen para la visión cromática, de forma temprana. Efectivamente, existen pruebas especiales para la población infantil, como el Made Easy, el City University o algunas láminas del test de Ishihara, que permiten evaluar la visión cromática a partir de los 3 años.

Se han llevado a cabo investigaciones sobre el tratamiento de la alteración en la visión del color. Existen autores que hablan de la utilización de filtros o lentes tintadas. Sin embargo, los resultados no son igual de positivos para todos los casos de anomalía en la visión del color, ni funcionan del mismo modo para cada individuo, aunque pueden haber pacientes que noten el beneficio de las lentes tintadas, mejorando la discriminación del color de algunos test, como las láminas del test de Ishihara, y así, con filtros rosas, magentas o rojos, mejorar los resultados de los mismos (Eperjesi, y otros, 2002)(Oriowo & Alotaibi, 2011) (Hovis, 1997). Otra línea de investigación se centra en la terapia genética, si bien aun es pronto para confirmar sus resultados. La terapia genética pretende mejorar la discriminación del color a partir de la inyección de un gen. Se ha hablado de mejorar la funcionalidad de los conos en el caso de acromatopsia (Komáromy, y otros, 2010) y de reproducir el comportamiento de una visión del color tricromática en el caso de deficiencia en el eje rojo-verde (Mancuso, y otros, 2009).

El objetivo principal de este trabajo consiste en determinar la afectación de las disfunciones de la visión del color sobre las tareas cotidianas, conducción, trabajo, estudios y otras situaciones, y las estrategias que han desarrollado los sujetos afectados por las mismas para realizar las distintas tareas y disfrutar de una vida cómoda y normal. Existen artículos que informan sobre las dificultades que tienen dichos sujetos en este tipo de tareas, así como también de la

afectación de esta anomalía sobre la población infantil, lo que puede entorpecer el proceso del aprendizaje en edad escolar. Sin embargo, en estos trabajos no se relatan las estrategias desarrolladas por estos sujetos para solucionar dichas dificultades. En este estudio los participantes realizaron cuatro pruebas específicas para detectar deficiencias en la visión del color y, posteriormente, respondieron a un cuestionario de calidad de vida. De este modo, se identificaron las tareas en las que tenían más dificultades y las soluciones y estrategias que han desarrollado para resolverlas. Asimismo, y como objetivo secundario de este estudio, se examina la influencia del tipo de iluminación (luz incandescente y luz día) sobre uno de los test más utilizados para la detección, diagnóstico y clasificación de las anomalías cromáticas. Con ello se pretenden analizar los cambios en los resultados obtenidos para un mismo sujeto, en diferentes pruebas para la evaluación del color, debidos al cambio de iluminante. Se trata de un estudio observacional descriptivo y transversal.



## 2. MARCO TEÓRICO

Este estudio trata sobre las deficiencias de la visión del color, de manera que es necesario abordar brevemente distintos conceptos. Por lo tanto, esta introducción incluye un repaso sobre colorimetría y visión del color.

### 2.1. INTRODUCCIÓN A LA VISIÓN DEL COLOR

Después del experimento de Newton, en 1802 Thomas Young enunció la teoría tricromática, proponiendo la existencia de tres tipos de fotorreceptores, uno para cada color primario. Su hipótesis se basaba en que tres colores -rojo, verde y azul- eran suficientes para producir cualquier color usando la combinación apropiada, aunque Young no incidió detalladamente en el mecanismo exacto. Unos cincuenta años más tarde James Clerk Maxwell (1861) y Hermann von Helmholtz (1856) confirmaron la teoría de Young (Birch, 2001) (Gegenfurtner & Sharpe, 1999) (Kaiser & Boynton, 1996) (Malacara, 2002) (Urtubia, 1996).

La teoría de los procesos oponentes fue propuesta por Ewald Hering en 1878. Hering observó que no existía un amarillo azulado o un azul amarillento, determinando que el azul y el amarillo eran colores opuestos, ocurriendo lo mismo con el rojo y el verde, creyendo, así, que el sistema visual funcionaba a partir de un proceso de oposición de colores (Gegenfurtner & Sharpe, 1999) (Malacara, 2002) (Urtubia, 1996).

Las dos teorías fueron conciliadas por Hurvich y Jameson en 1957 y se compatibilizaron con la teoría retinex propuesta por Edwind Land en 1964, la cual explica la constancia del color y resalta la importancia del fondo en la determinación del color de un objeto (Kaiser & Boynton, 1996) (Urtubia, 1996).

Durante el siglo XIX se estudió e investigó el funcionamiento de la visión del color en el ser humano. Por otra parte, la evaluación clínica de la visión del color empezó a estudiarse en 1875 a raíz de un accidente ferroviario en Suiza, siendo el oftalmólogo Frithiof Holmgren (1831-1897) el primero en interesarse en este tema. La escena se sitúa entre Linköping y Bankeberg. El tren debía disminuir la velocidad hasta casi detenerse, en cambio, tras haber disminuido, inexplicablemente, aceleró hacia delante hasta colisionar con la finca de Lagerlunda. Holmgren dedujo que tanto el ingeniero del tren como el engrasador padecían una deficiencia en la visión del color, aunque ninguno de los dos sobrevivió para poder evaluarlos. Dicho accidente no se puede atribuir sólo a una deficiencia en la visión del color, pero sin duda tiene un importante papel en la introducción de su evaluación (Mollon & Cavonius, 2012).

### 2.2. COLORIMETRÍA

El color es una sensación que solo existe en condiciones fotópicas, un elemento interpretado por el cerebro de la radiación luminosa recibida a través del ojo. Se necesitan tres elementos para poder percibirlo: una fuente de luz, un objeto y un observador. La colorimetría es la ciencia que se encarga de medir y cuantificar el color.

El sistema visual es trivariante, es decir, son necesarios tres parámetros para caracterizar el color. Estos tres parámetros, denominados *atributos psicofísicos*, son (Capilla, y otros, 2002):

- 1) Tono: es la  $\lambda$  dominante y se identifica con el nombre del color reflejado por un objeto o transmitido a través de un objeto.

- 2) Luminosidad: es la impresión subjetiva de la luminancia, es decir, es la sensación visual según la cual una superficie parece emitir más o menos luz. Nos informa de si el color es más claro o más oscuro y existe tanto en los colores cromáticos como en los acromáticos.
- 3) Saturación: indica la pureza del color pudiendo oscilar entre el 0% (mínima pureza) y el 100% (máxima pureza). Depende de la cantidad de gris mezclada al color, siendo un color más puro cuanto menos gris contenga. Así, por ejemplo, el rojo es más saturado que el rosa.

Existen dos mezclas de colores, las aditivas y las sustractivas, con las que se consiguen casi todos los colores del espectro.

La mezcla aditiva (Figura 2.2.1, izquierda) parte del negro y es la combinación de luces espectrales de los colores primarios rojo, verde y azul (RGB). Combinando uno de estos colores primarios con otro se producen los colores aditivos secundarios: cian, magenta y amarillo, y la combinación de los tres colores primarios produce el blanco.

La mezcla sustractiva (Figura 2.2.1, derecha) es un fenómeno de absorción física. Esta mezcla parte del blanco y es la combinación de pigmentos de los colores primarios cian, magenta y amarillo (CMY). Cada primario transmite dos tercios del espectro visible y absorbe un tercio. Es decir, el filtro amarillo elimina el color azul transmitiendo el rojo y el verde. Igual pasa con los demás colores, el filtro magenta elimina el verde y transmite el rojo y el azul y, por último, el filtro cian elimina el rojo transmitiendo el verde y el azul. De este modo se pueden controlar las cantidades de color rojo, verde y azul. Con este conocimiento se puede afirmar que hay infinitas combinaciones posibles de colores. La combinación de los tres colores primarios debería producir el color negro, pero en realidad es algo difícil de conseguir, por lo que en muchas ocasiones se añade un cuarto pigmento de color negro (CMYK).

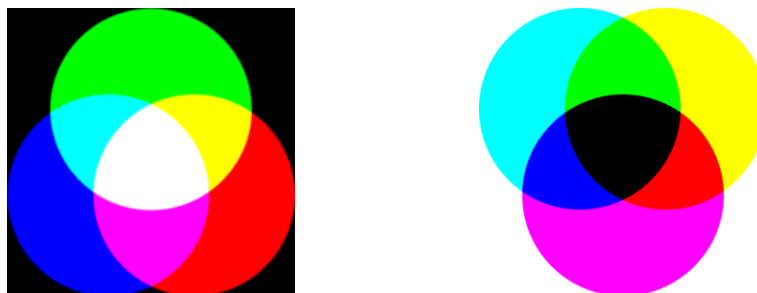


Figura 2.2.1. Mezcla aditiva (izquierda) y sustractiva de colores (derecha). (Backhaus, y otros, 1998)

Como ya se ha indicado anteriormente, la fuente de luz es un elemento condicionante del color. En 1931, la organización internacional de luz y color CIE (*Commission Internationale de L'Éclairage*) recomendó tres iluminantes estándar definidos en base a algunas fuentes de luz reales. En este estudio se utilizan dos de ellas, mostrándose su espectro de emisión –cantidad de energía que emite la fuente de luz por cada  $\lambda$ - y su temperatura de color. Para entender este último término definiremos el concepto de cuerpo oscuro. Un cuerpo oscuro no tiene color, se percibe negro debido a la total absorción de toda la luz, además su temperatura es de 0 K (grados Kelvin) o, lo que es lo mismo, -273 °C (grados centígrados). Si este cuerpo oscuro se calienta se vuelve luminoso, con una radiancia y color que dependerá de la temperatura. La temperatura de color de una fuente de luz es la temperatura de la radiación de un cuerpo oscuro ideal (su emisión depende únicamente de la temperatura) que irradia luz de un tono

comparable al de la fuente de luz, es decir, se refiere a la apariencia o tonalidad de la luz que emite la fuente luminosa.

Los iluminantes utilizados son:

- Iluminante A (OSRAM Classic A 60W 230V) (Figura 2.2.2a): luz incandescente con una temperatura de color de 2856 K, es una luz cálida de un color anaranjado.

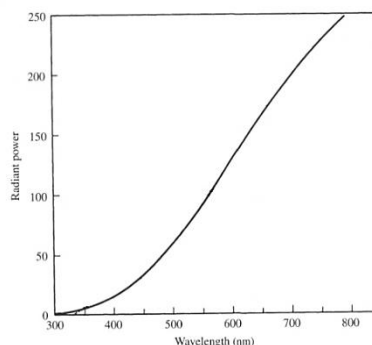


Figura 2.2.2a. Bombilla y radiancia espectral del iluminante estándar A. (Ohta & Robertson, 2005)

- Iluminante D<sub>65</sub> (Philips Genie 18W (80W) Energy A Class Cool Daylight) (Figura 2.2.2b): representa el promedio de luz solar de día y tiene una temperatura de color de 6500 K, es una luz fría de un color azulado.

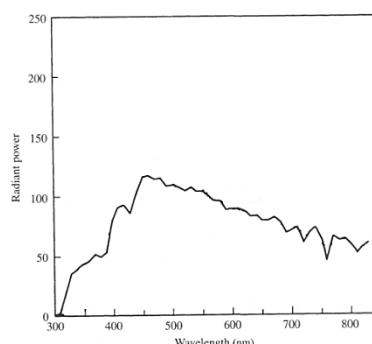


Figura 2.2.2b. Bombilla y radiancia espectral del iluminante estándar D<sub>65</sub>. (Ohta & Robertson, 2005)

### 2.2.1. Sistemas de Especificación del Color CIE

La CIE ha desarrollado diversos sistemas para la especificación del color. En 1931 la CIE introdujo el sistema RGB, basado en la igualación visual de un color cualquiera mediante la suma aditiva de tres cantidades de tres colores primarios: rojo (R), verde (G) y azul (B). Estas tres cantidades de primario se denominan “valores triestímulo”.

Para empezar a estudiar el sistema del color de la CIE consideramos el experimento de igualación de color. Este experimento consta de una pantalla partida en dos mitades iguales: una mitad es el *campo de referencia* iluminado por una luz monocromática pura y la otra mitad es el *campo de test* iluminado con la combinación de tres luces monocromáticas, roja (700 nm), verde (546.1 nm) y azul (435.8 nm). La finalidad del observador es modificar los colores en el campo de test hasta percibir el mismo color que en el campo de referencia.

La trivariancia visual nos dice que para obtener un color hemos de mezclar tres colores primarios en proporciones adecuadas. Para ello, son necesarios los tres primarios –rojo, verde y azul- y el blanco equienergético –posee la misma radiancia espectral para todas las

longitudes de onda-. A partir de aquí, se obtienen las unidades tricromáticas –cantidad necesaria de primario (luminancia (Y)) para igualar el blanco equienergético ( $Y_w = 5.6508 \text{ cd/m}^2$ )- y los valores triestímulo –cantidad necesaria de primario para igualar un color dividido por la unidad tricromática-.

Si el estímulo tiene un espectro continuo y si  $E(\lambda)$  es su densidad de radiancia espectral (energía que se propaga en el espacio), calcularemos sus valores triestímulo RGB mediante las siguientes ecuaciones:

$$R = k_m \int E(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad G = k_m \int E(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad B = k_m \int E(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

donde  $k_m$  es una constante de normalización ( $k_m = 680 \text{ lm/W}$ ) y  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  son las funciones de igualación o mezcla de color (cantidades de primario necesarias para igualar, por parte de un observador patrón, una misma cantidad de flujo radiante de cada estímulo monocromático), es decir, la información referente al observador patrón.

Para la representación de los colores del sistema RGB se obtienen las coordenadas cromáticas,  $r$ ,  $g$ ,  $b$ , representadas a continuación:

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad \text{Donde } r + g + b = 1$$

Existen dos grandes inconvenientes en este espacio: (1) algunos valores triestímulo resultan negativos, es decir, no todos los colores se pueden igualar, y (2) al caracterizar el color por las coordenadas  $(r,g)$  ninguno de los tres valores triestímulos RGB informa directamente sobre la luminancia del estímulo (Figura 2.2.1.1).

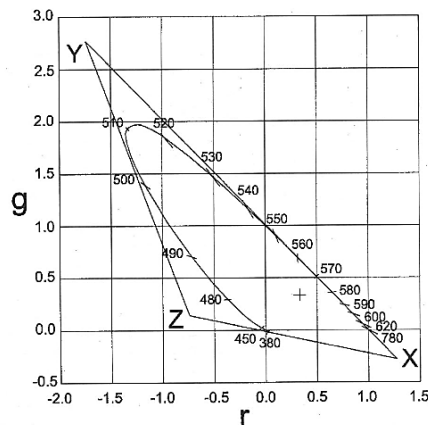


Figura 2.2.1.1. Diagrama cromático del sistema RGB. (Malacara, 2002)

Para poder hacer las igualaciones de todos los colores, el espacio RGB se convierte en el espacio XYZ mediante una transformación lineal. Con ello se consiguen valores triestímulo positivos y, además, también se obtiene información de la luminancia. Sin embargo, la consecuencia negativa de esta transformación es que los nuevos primarios son irreales: sólo existen matemáticamente.

Por construcción, los primarios X y Z caen sobre la recta de luminancia cero (recta XZ). Esto significa que los colores sobre la línea XZ que no tienen estímulo Y son los colores con luminancia cero, y, por esta razón, sólo el primario Y contribuye a la luminancia total del estímulo. Por consiguiente, las unidades tricromáticas de X y Z son cero y la del primario Y se elige como unidad, por lo que el blanco de referencia tiene una luminancia de la unidad. Un requerimiento fundamental de este espacio es aislar la información de la luminancia (Capilla, y otros, 2002).

Exactamente como en el espacio RGB, se pueden calcular los valores triestímulo de un objeto mediante las siguientes ecuaciones:

$$X = k_m \int E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = k_m \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = k_m \int E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Y sus correspondientes coordenadas cromáticas:

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

En efecto, cualquier color real tendrá valores triestímulo positivos y sus coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  acotadas entre 0 y 1, obteniendo el Diagrama Cromático CIE XYZ (Figura 2.2.1.2).

El Diagrama Cromático es la representación bidimensional del color. La curva que une las coordenadas cromáticas de los colores espectrales se denomina *locus espectral* y la recta que une los extremos de dicho locus se conoce como la *recta de los púrpuras*. El espacio interior limitado por el locus espectral y la recta de los púrpuras contiene todos los colores reales.

El observador patrón de la CIE 1931 se determinó para estímulos de 2° de tamaño angular (aunque puede usarse con tests de hasta 4°). Para estímulos de mayor tamaño la CIE propuso, en 1964, un observador patrón medido con un test de 10°. Las diferencias entre ambos observadores patrón son mínimas, lo que repercute muy poco en el diagrama cromático, como puede observarse en la imagen de la derecha de la figura 2.2.1.2.

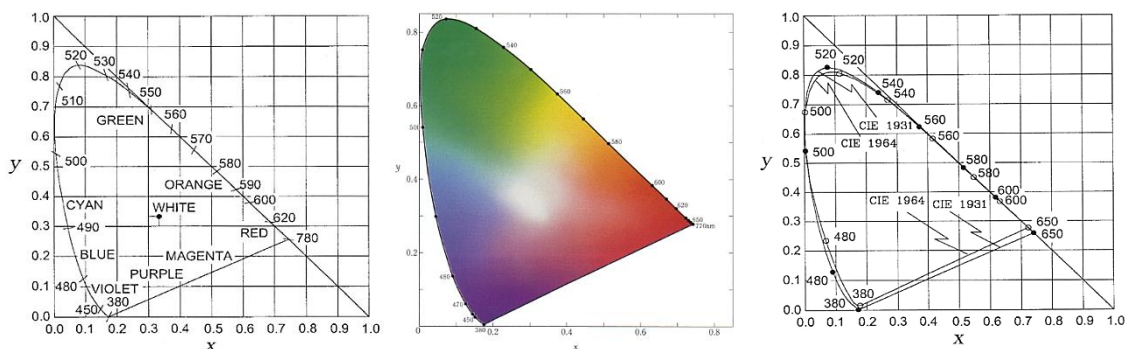


Figura 2.2.1.2. Diagrama cromático del sistema XYZ. En la imagen de la izquierda (diagrama cromático para un campo visual de 10°) se representan todos los colores espectrales puros a lo largo del locus espectral y de la línea de los púrpuras, junto con el blanco de referencia del sistema situado en las coordenadas  $x = 0.33$ ,  $y = 0.33$  (Malacara, 2002). En la imagen del centro se representan todos los colores reales (Ohta & Robertson, 2005). En la imagen de la derecha se muestra la comparación de los dos diagramas cromáticos, de 2° y 10° (Malacara, 2002).

Sobre el diagrama cromático que la Colorimetría ha conseguido definir, describiremos la *longitud de onda dominante* ( $\lambda_d$ ) de un estímulo como la longitud de onda del estímulo monocromático que, mezclado con el blanco de referencia en la proporción adecuada, permite obtener un metámero de dicho color (es decir, que los dos estímulos se perciban visualmente como idénticos). Por otra parte, definimos la *longitud de onda complementaria* ( $\lambda_c$ ) como aquella que mezclada con el color en la proporción adecuada permite reproducir el blanco de referencia. El blanco de referencia es el iluminante utilizado en el cálculo de las coordenadas cromáticas.

Consideremos un punto A en el diagrama de CIE representado en la figura 2.2.1.3. Trazando una línea procedente del punto W (blanco) hacia el locus espectral, pasando por el punto A,

encontramos el punto D. Esta intersección con el locus espectral indica la  $\lambda_d$  del color A. En el caso de que la intersección no se haga en el locus espectral, sino en la línea de los púrpuras, no se define una  $\lambda_d$ . Ahora consideramos un punto B. La unión del punto W con el punto B nos lleva a la línea de los púrpuras, por lo que la continuación de la recta hasta encontrar la intersección con el locus espectral nos define la  $\lambda_c$ .

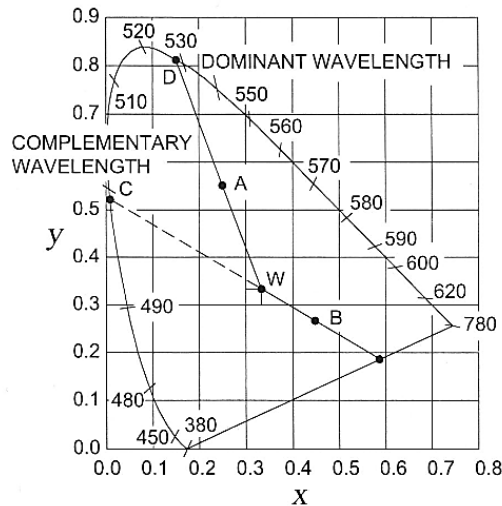


Figura 2.2.1.3. Representación de la longitud de onda dominante y complementaria en el diagrama cromático. (Malacara, 2002)

La pureza de excitación de un estímulo luminoso se define como el cociente entre la distancia del blanco al color y la distancia del blanco a la  $\lambda_d$  del color, medidas en el diagrama cromático.

### 2.2.2. Sistemas de Color Uniformes

Un desplazamiento hacia cualquier dirección en el espacio CIE no produce el mismo cambio en el color percibido. Del mismo modo, cualquier desplazamiento en el diagrama cromático CIE no produce un cambio constante en el tono y la saturación. El mínimo desplazamiento para detectar un cambio en el color en el diagrama CIE se representa con las elipses de MacAdam (Figura 2.2.2.1).

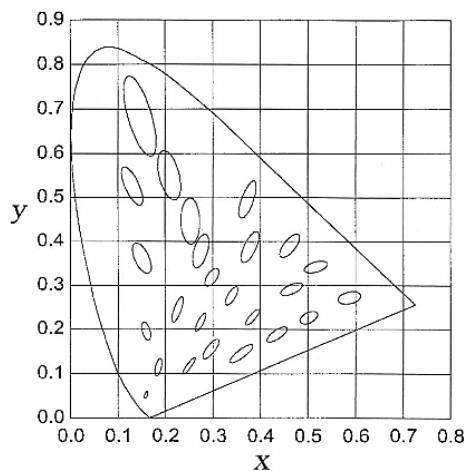


Figura 2.2.2.1. Discriminación del color con las elipses MacAdam. (Malacara, 2002)

Para uniformizar los espacios se crearon sistemas de color posteriores al XYZ. En 1976, la CIE propone dos nuevos espacios: CIE  $L^*u^*v^*$  (mejor para diferenciar los colores luminosos, como el ordenador) y CIE  $L^*a^*b^*$  (mejor para los no luminosos, como el tejido), aunque ambos son bastante imperfectos (Capilla, Artigas, & Pujol, 2002). El espacio de color CIELAB se muestra en la figura 2.2.2.2.

Una manera de analizar la uniformidad de un espacio es ordenar los colores, siendo tal vez el atlas de Munsell el más conocido de estos sistemas.

El sistema de Munsell es un sistema de ordenación del color, es decir, ordena los colores de acuerdo con sus atributos, siendo un sistema de notación comúnmente utilizado para la especificación del color. En este caso, las variables utilizadas para describir los atributos del color son el tono (hue), la claridad (value) y el croma (chroma), por ejemplo: 4 YR 7/3, esto quiere decir un color amarillo-rojo en la subsección 4 (tono = 4 YR) con claridad = 7 y croma = 3 (Figura 2.2.2.3).

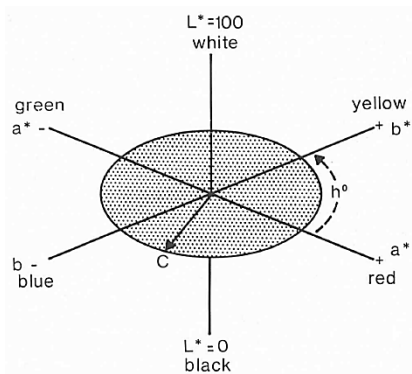


Figura 2.2.2.2. Espacio de color CIELAB. El color rojo (a+) se encuentra en la posición opuesta del verde (a-), del mismo modo se representa el amarillo (b+) y el azul (b-). En el plano horizontal se encuentra el círculo donde se representan todos los colores, siendo h el tono y c el croma o saturación. En el plano vertical se encuentra L que define la claridad del color, siendo máxima cuando su valor es de 100 y mínima cuando es de 0. (Weatherall & Coombs, 1992)

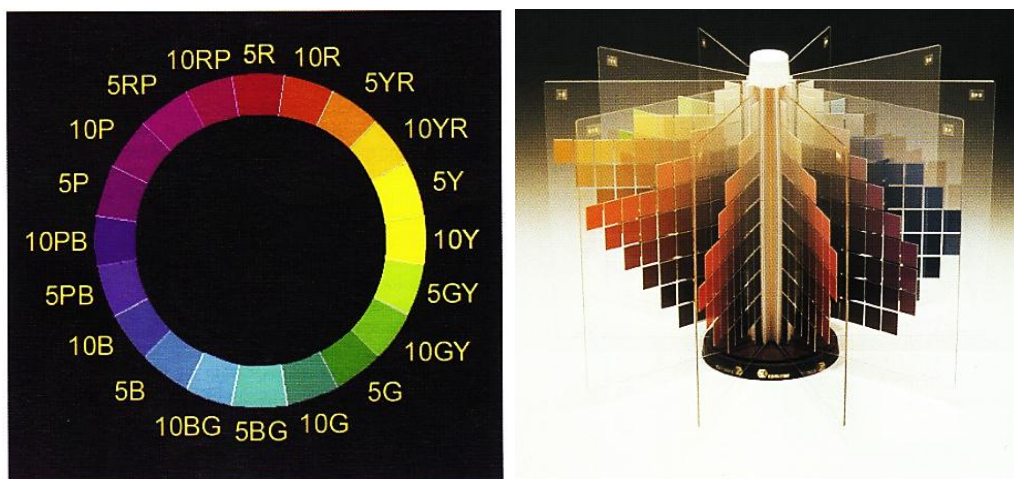


Figura 2.2.2.3. Izquierda: círculo de los colores Munsell. Este círculo está dividido en 10 sectores: amarillo (Y), amarillo-rojo (YR), rojo (R), rojo-púrpura (RP), púrpura (P), púrpura-azul (PB), azul (B), azul-verde (BG), verde (G) y verde-amarillo (GY). Cada sector está dividido en 10 sub-sectores (Malacara, 2002). Derecha: árbol de color del sistema de color de Munsell. Este árbol es una representación tridimensional de todos los colores del espacio de color de Munsell, existe una serie de planos radiales con tonalidad constante, es decir, un plano para cada tono (Ohta & Robertson, 2005).

## 2.3. LA VISIÓN DEL COLOR

### 2.3.1. Fisiología de la visión del color

En la retina humana cabe distinguir dos tipos de fotorreceptores diferentes, los conos y los bastones. Los bastones intervienen en la visión nocturna (escotópica) y los conos en la diurna y cromática (fotópica).

El fotorpigmento de los bastones se denomina *rodopsina* y los tres fotorpigmentos para los conos, *fotopsinas*. La porción proteica, llamada *opsina* es una proteína conjugada en combinación con el retinal. Los pigmentos visuales de los conos están compuestos por el mismo tipo de retinal que los bastones y por tres tipos diferentes de opsinas

La diferente sensibilidad espectral de cada una de las opsinas se debe a la diferencia de cargas eléctricas en el entorno electromagnético del retinal. La diferente secuencia de aminoácidos, como estructura primaria, condicionará la secundaria y la terciaria de cada una de las opsinas. De esta forma, la molécula completa presentará una sensibilidad diferencial a la longitud de onda roja, verde o azul (fotopsinas) o azul-verde, en el caso de los bastones (rodopsina), tal y como se muestra en la figura 2.3.1.1.

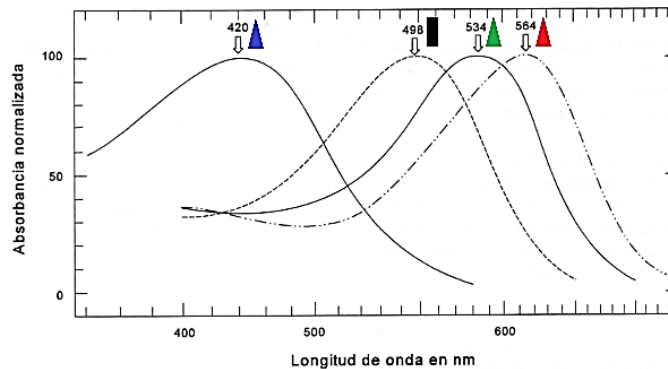


Figura 2.3.1.1. Curvas de absorción espectral de conos y bastones en humanos. El triángulo azul representa el cono B, el verde representa el cono G, el rojo representa el cono R y el rectángulo negro representa los bastones. (Urtubia, 1996)

En la retina del ser humano, y en todas las especies de vertebrados, existen zonas ricas en conos, especializadas en la inspección de detalles. El centro de esta región rica en conos presenta una depresión llamada *fóvea*, de aproximadamente 1.5 mm, con una porción central de 0.26 mm de diámetro que recibe el nombre de *foveola*, compuesta exclusivamente por conos (Figura 2.3.1.2).

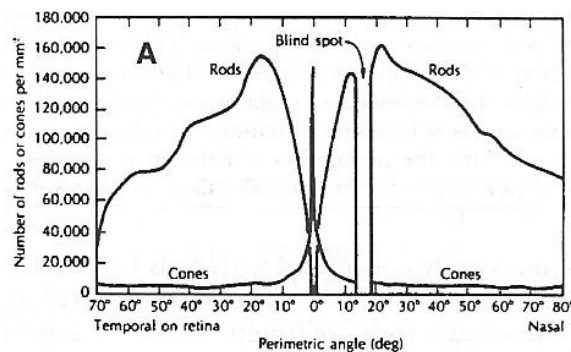


Figura 2.3.1.2 Distribución de conos y bastones en la retina humana. (Kaiser & Boynton, 1996)



Existen varios estudios que informan sobre la distribución de los conos y los bastones. En la figura 2.3.1.3 se muestra la imagen de una retina humana (Curcio, y otros, 1993) y en la figura 2.3.1.4 se compara la de un primate, el tití, con una retina humana (Martin & Grünert, 1999) (Hofer, y otros, 2005). En esta última podemos ver la distribución de los conos sensibles a la longitud de onda larga, media y corta. Se observa una menor cantidad de conos sensibles al azul en toda la retina y una ausencia de ellos en el centro de la fóvea. En cuanto a la distribución de los conos sensibles a la longitud de onda larga y media, no existe la certeza de que se encuentren localizados de manera específica, pero tampoco parecen hallarse dispuestos de manera aleatoria (Hofer, y otros, 2005).

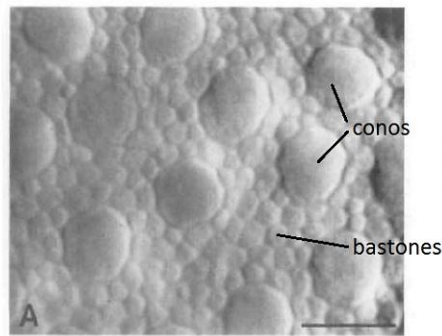


Figura 2.3.1.3. Imagen de los conos y los bastones de una retina humana -mujer de 35 años- en un área 3 mm por debajo del centro foveal. (Curcio, y otros, 1993)

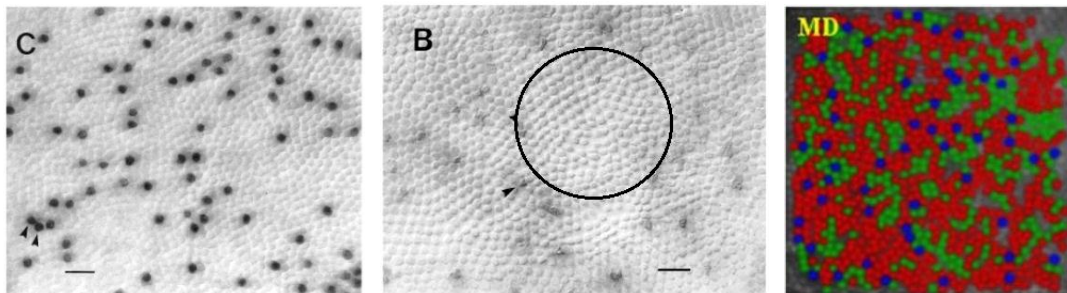


Figura 2.3.1.4. Izquierda: retina de un tití, observándose, de color oscuro, los conos sensibles a  $\lambda$  corta (Martin & Grünert, 1999). Centro: retina de un macaco, observándose el área libre (círculo negro) de conos sensibles al azul (Martin & Grünert, 1999). Derecha: imagen de color falseado de una retina humana (Hofer, y otros, 2005).

### 2.3.2. Visión defectiva del color

Los denominados tricrómatas poseen los tres fotopigmentos y tienen la percepción del color normal (Figura 2.3.2.1). Las alteraciones en dicha percepción se denominan discromatopsias y pueden ser congénitas o adquiridas.

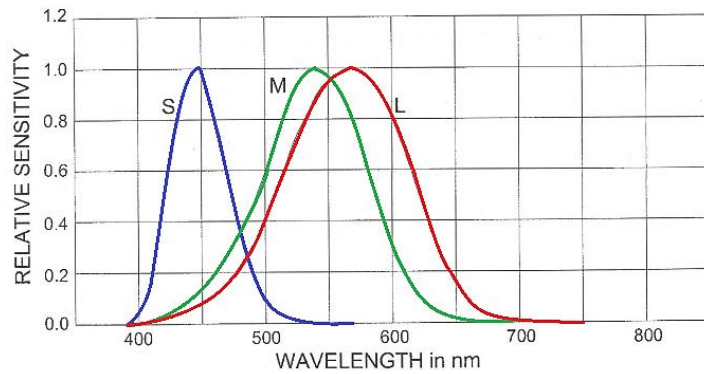


Figura 2.3.2.1. Sensibilidad espectral para los tres tipos de cono -tricromata normal- en una escala lineal. La L se refiere a la sensibilidad a  $\lambda$  larga, la M a la media y la S a la corta. (Malacara, 2002)

### I. DEFICIENCIAS CONGÉNITAS EN LA VISIÓN DEL COLOR

Los tricromatas anómalos tienen los tres fotopigmentos, pero uno de ellos es anómalo. Como consecuencia, la discriminación de colores es deficiente. Los dicromatas sólo disponen de dos fotopigmentos y, por ello, confunden los colores. Los monocrómatas sólo tienen un fotopigmento, por lo que no tienen visión del color, si bien esta condición es rara. Por último existen los acromatas, que sólo disponen de bastones, por lo que, además de carecer de la visión del color, se añaden otros problemas visuales como la fotofobia y la baja agudeza visual entre otros. La nomenclatura y clasificación de algunas de estas deficiencias se muestra en la tabla 2.3.2.1.

Denominación	Comportamiento colorimétrico	Deficiencia	Mecanismo
<b>Protanomalia</b>	Tricromata anormal	Rojo-verde	Alteración (S,M normales L desplazado)
<b>Deuteranomalia</b>	Tricromata anormal	Rojo-verde	Alteración (S,L normales M desplazado)
<b>Tritanomalia</b>	Tricromata anormal	Amarillo-azul	Alteración (M,L normales S desplazado)
<b>Protanopia</b>	Dicromata	Rojo-verde	Reducción (S,M normales L ausente)
<b>Deuteranopia</b>	Dicromata	Rojo-verde	Reducción (S,L normales M ausente)
<b>Tritanopia</b>	Dicromata	Amarillo-azul	Reducción (M,L normales S ausente)

Tabla 2.3.2.1. Clasificación de las anomalías visuales congénitas. (Urtubia, 1996)

Los tricromatas anómalos no aceptan como válidas las mezclas de colores de luces espectrales ajustadas para los tricromatas normales. Es decir, a una mezcla de verde y rojo para obtener amarillo, añaden, o un exceso de verde (deuteranomalia, que es el trastorno más frecuente), o un exceso de rojo (protanomalia).

Estos individuos presentan mutaciones en uno o dos aminoácidos de la secuencia aminoacídica de su opsina, ocasionando una ligera variación de su espectro de absorción respecto del normal. En el caso de los protanómalos, la curva de absorción del rojo se acerca a

la del verde, y en los deuteranómalos, la curva de absorción del verde se acerca a la del rojo (Figura 2.3.2.2).

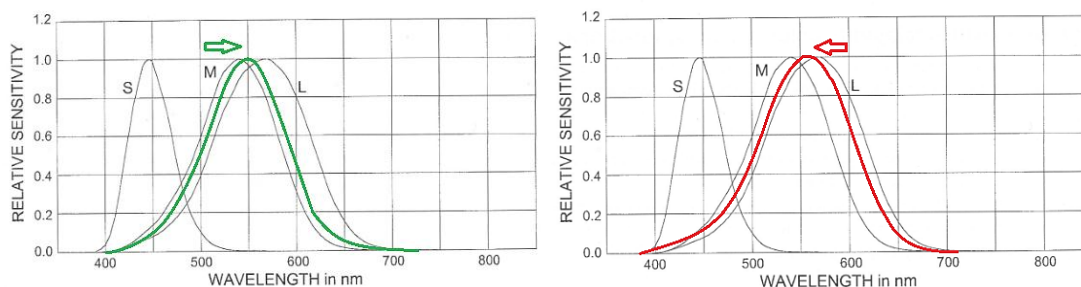


Figura 2.3.2.2. Aproximación del espectro de absorción de un deuteranómalo (izquierda) y de un protanómalo (derecha). (Backhaus, y otros, 1998) (Malacara, 2002)

Los dicrómatas sólo tienen dos tipos de conos funcionales, de manera que no se sintetiza una determinada opsina, estando las otras dos repartidas entre una población de conos normal.

El tipo de deficiencia más conocido es la deficiencia severa para el rojo y el verde, científicamente llamada *daltonismo*<sup>1</sup>, aunque popularmente este término se usa como referencia a cualquier anomalía en la visión del color. Dicha deficiencia se manifiesta como protanopía o deuteranopía. En la protanopía, el espectro está acortado en la región de onda larga, por lo que los protanopes designan como amarillo al espectro por encima de 492 nm y como azul de diferente luminosidad al espectro por debajo de 492 nm. De esta manera, tanto el rojo como el verde les parecen iguales. En la deuteranopía se pierde la información sobre la zona central del espectro visible, manteniendo un espectro visual normal en su extensión. Si los conos sensibles al verde contienen la opsina para el rojo, los colores que van del verde al rojo pueden estimular únicamente los conos sensibles al rojo y la persona percibe sólo un color dentro de estos límites.

Una forma más rara de discromatopsia es la deficiencia para el azul (azul-amarillo). Las luces entre 450 nm y 570 nm se ven verdes, y en el extremo de onda larga, rojas.

Los dicrómatas confunden los colores contenidos en las llamadas *líneas de confusión* representadas en el diagrama cromático de la CIE (Figura 2.3.2.3.). Cada deficiencia cromática tiene sus líneas de confusión, las cuales convergen en un punto llamado *centro de confusión* (Tabla 2.3.2.2).

	x	y
Protanopía	0.75	0.25
Deuteranopía	1.40	-0.40
Tritanopía	0.17	0

Tabla 2.3.2.2. Coordenadas cromáticas CIE de los puntos de convergencia dicromáticos, también llamados centros de confusión. (Birch, 2001)

Para imaginar cómo ven los dicrómatas, y poder compararlo con la visión de un tricrómatas normal, se han reproducido varias simulaciones de escenas. En la figura 2.3.2.4 se muestra una simulación de la apariencia del color en los distintos tipos de dicromatismo y en el

<sup>1</sup> Debido al famoso físico inglés John Dalton, que fue el primero en señalar este defecto, en sí mismo, en 1794.

monocromatismo, presentando, por una parte el espectro visible y, por otra, la escena de un mercado de fruta (Gegenfurtner & Sharpe, 1999).

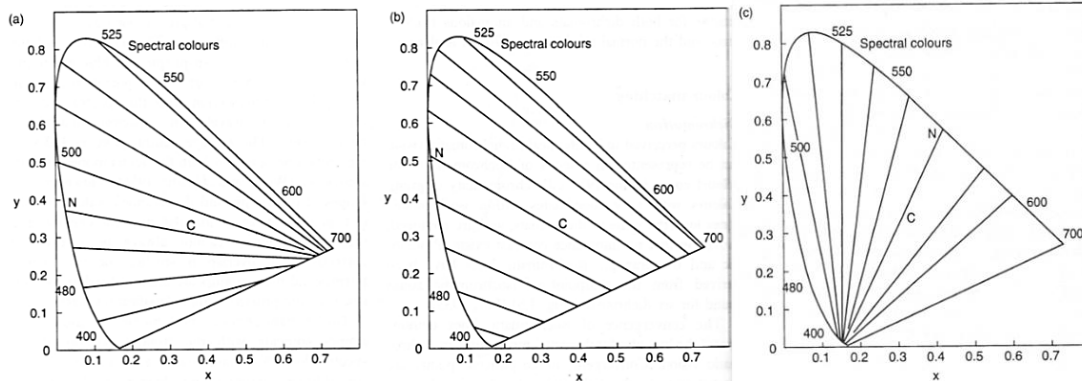


Figura 2.3.2.3. Líneas de confusión para el protanope (a), deuteranope (b) y tritanope (c). (Birch, 2001)

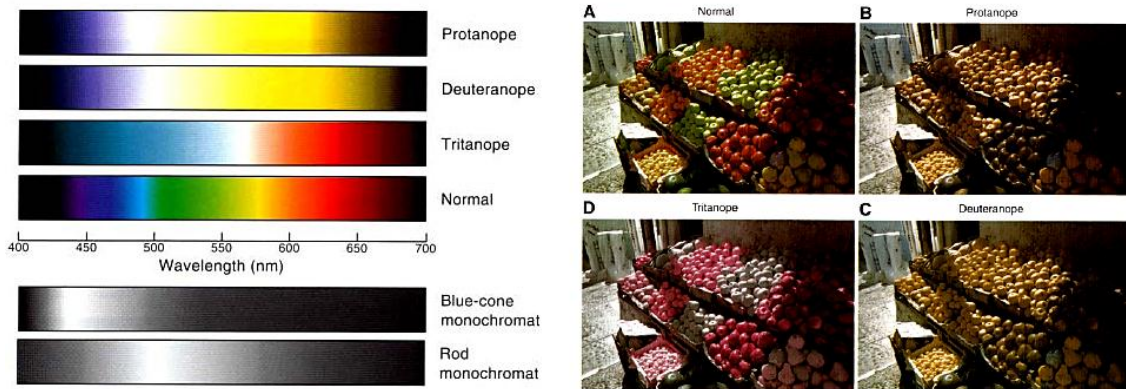


Figura 2.3.2.4. Izquierda: apariencia del espectro visible para los distintos tipos de discromatopsias. Derecha: simulación de una escena para los tres tipos de deficiencia cromática. (Gegenfurtner & Sharpe, 1999)



La lámina de la izquierda<sup>2</sup> se usó como referencia para que fuese reproducida por un protanope y por un deuteranope (Birch, 2001). La lámina del medio está pintada por el protanope y la de la derecha, por el deuteranope. Aquí se puede apreciar la diferencia de los colores empleados por cada individuo.

<sup>2</sup> Obra llamada *Cityscape with Yellow Windows*, pintada por el pintor alemán Paul Klee en 1919.

Los monocrómatas no perciben el color, por tanto, sólo ven en blanco y negro y tonos de gris. Su función visual diurna y crepuscular es normal ya que poseen un tipo de fotopigmento en los conos y otro en los bastones. Excepcionalmente, se han descrito monocrómatas que carecen de bastones, teniendo en este caso ceguera nocturna absoluta.

Los acrómatas, además de no percibir los colores, tienen una visión diurna defectuosa, nistagmo y fotofobia. El máximo de absorción lo presentan a 498 nm, el correspondiente al pigmento visual de los bastones, la rodopsina (Urtubia, 1996).

En referencia al origen de las anomalías en la visión del color, ya se ha citado anteriormente que la deficiencia para la sensibilidad al rojo-verde es de herencia ligada al sexo, y la deficiencia para la sensibilidad al azul es de herencia autosómica (Figura 2.3.2.5). Aproximadamente el 8% de todos los varones muestran deficiencias para el rojo-verde, en cambio, sólo el 0.4% de las mujeres padecen este anomalía. En el caso de padecer una anomalía a la sensibilidad para el azul existirá la misma probabilidad de que la padezcan tanto hombres como mujeres. La tritanopía y la tritanomalía tienen una prevalencia de menos de una de cada 100000 personas aproximadamente. Los porcentajes de afectación para ambos defectos se muestran en la tabla 2.3.2.3 (Urtubia, 1996).

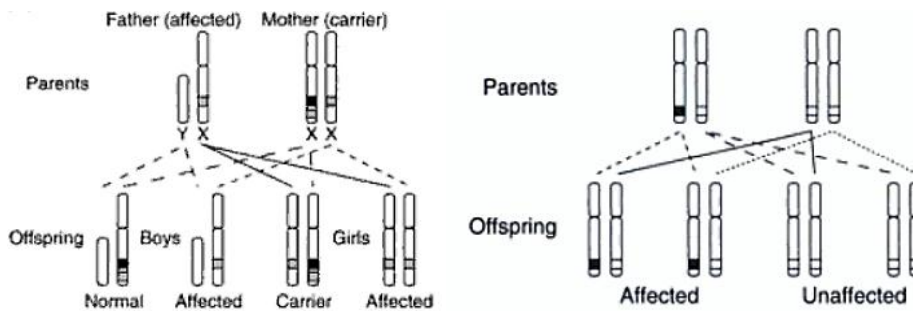


Figura 2.3.2.5. Esquema de la herencia ligada al sexo (izquierda) y de la herencia autosómica (derecha) de la visión defectiva del color. (Gegenfurtner & Sharpe, 1999)

Deficiencias	Según Judd		Según Le Grand		Según Corrons varones	Según Hita	
	varones	mujeres	varones	mujeres		varones	mujeres
Protanomalia	1,0	0,002	1	0,02			
Deuteranomalia	4,9	0,30	4,9	0,30	1,50	5,4	0,3
Tritanomalia	0,00001	0	-	-	-	-	-
Protanopia	1,0	0,02	1	0,02	0,3	1,2	0,1
Deuteranopia	1,1	0,01	1,1	0,01	1,59	1,5	0,00
Tritanopia	0,00001	0	0,002	-	-	-	-
Acromatopsia	0,003	0,002	0,003	0,002	0,06	0,01	0,00

Tabla 2.3.2.3. Frecuencias de anomalías cromáticas en ambos sexos según diversos autores. (Urtubia, 1996)

La frecuencia relativamente alta de deuteranomalia y protanomalia puede ser debida a la ordenación de los genes para los pigmentos sensibles al rojo y al verde, pudiendo producir genes híbridos. Estos genes codificarán opsinas anómalas, haciendo que el máximo de absorción de los nuevos fotopigmentos no corresponda a los respectivos normales de longitud de onda larga o media.

Un grupo de genes localizados en el cromosoma X de los varones con visión normal consiste en una disposición en tándem de un gen de pigmento sensible al rojo y de una a cinco copias (normalmente no más de tres) del gen que codifica el pigmento sensible al verde. La recombinación de estos genes explicaría los genotipos descritos para la visión del color anómala (Figura 2.3.2.6).

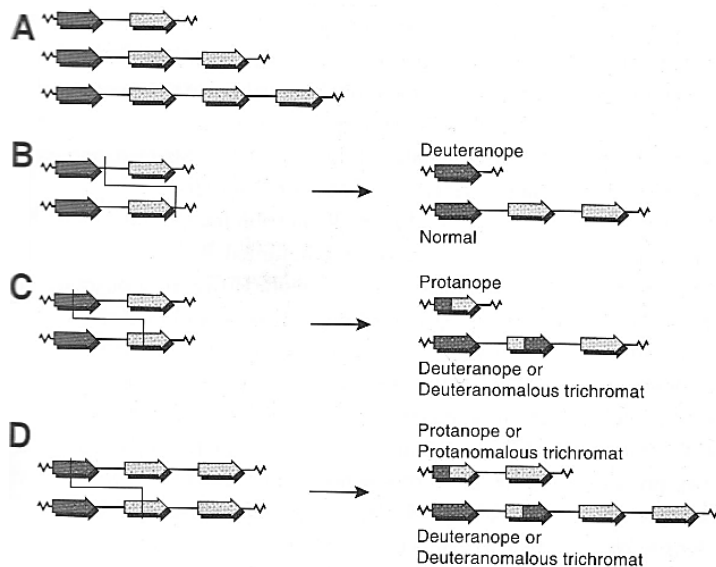


Figura 2.3.2.6. Ejemplos de recombinaciones dentro del tándem de los genes responsables de la visión defectiva del color. Cada gen se representa con una flecha: oscuras para genes del pigmento del cono L y claras para genes del pigmento del cono M. (A): Grupo de genes de los varones con visión del color normal. (B): Recombinación intergénica produciendo una deuteranopía y una ampliación de la disposición de los genes. (C) y (D): Recombinación intragénica produciendo una protanopía, protanomalia, deuteranopía o deuteranomalia. (Gegenfurtner & Sharpe, 1999)

## II. DEFICIENCIAS ADQUIRIDAS EN LA VISIÓN DEL COLOR

Las deficiencias adquiridas son aquellas que aparecen después del nacimiento, a partir de los 3 meses (que es la edad a partir de la cual se puede identificar el defecto). Estas anomalías pueden ser adquiridas como resultado de una patología ocular o general, por una lesión intracraneal o por el uso prolongado de medicamentos. Dichas deficiencias pueden cambiar de tipo y de grado con el tiempo, no son fáciles de clasificar y, además, frecuentemente se producen de forma monocular. Al ser un defecto adquirido, la prevalencia de este tipos de anomalías es la misma en hombres y en mujeres, predominando el defecto tritan (Birch, 2001).

En la tabla 2.3.2.4 se muestra la clasificación de dichas deficiencias con la asociación patológica de cada tipo.

Clasificación	Deficiencia	Asociación
<b>Tipo I</b>	Rojo-verde	Degeneración progresiva de los conos
<b>Tipo II</b>	Rojo-verde + Azul	Anomalías del nervio óptico
<b>Tipo III</b>	Azul	Alteraciones propias de la coroides
	Azul + Rojo-verde	Degeneraciones pigmentarias, anomalías vasculares, glaucoma, papiledema, cataratas

Tabla 2.3.2.4. Clasificación de los defectos adquiridos en la visión del color. (Kaiser & Boynton, 1996)

La forma más común de pérdida adquirida en la discriminación del color se produce de manera natural en el proceso de envejecimiento, causada por las cataratas. El cristalino envejece de manera progresiva, volviéndose más amarillo con el tiempo, de manera que absorbe algunas radiaciones de onda corta. Consecuentemente, se modifica el máximo de absorción del pigmento sensible al azul (Kaiser & Boynton, 1996) (Urtubia, 1996).

Como se ha mencionado anteriormente, algunas patologías sistémicas pueden afectar a la visión del color. Una de ellas es la diabetes, cuyos cambios morfológicos están relacionados con la duración de la enfermedad. Inicialmente se produce una pérdida en la sensibilidad para el azul, y en estadios más tardíos se ve afectada también la sensibilidad para el rojo-verde, quedando esta última más alterada (O'Neill-Biba, y otros, 2010).

Otra enfermedad que afecta a la visión del color es el Parkinson. Existen estudios donde se ha encontrado que el eje más afectado es el rojo-verde (Oh, y otros, 2011), si bien otros autores concluyen que el más afectado es el azul-amarillo (Tabassi, y otros, 2003). Lo que se sabe con certeza es que la discriminación del color está asociada a la función motora (Diederich, y otros, 2002) (Oh, y otros, 2011) (Tabassi, y otros, 2003).

También la esclerosis múltiple puede ocasionar alteraciones en la visión del color (Dain, y otros, 1990). Asimismo, los pacientes con glaucoma severo presentan un defecto tipo III con tritanopía adquirida y pérdida en la discriminación rojo-verde. Estos pacientes tienen una prevalencia del 20-40% de visión del color normal, un 30-50% de defecto en el eje azul-amarillo, un 5% de defecto en el eje rojo-verde y un 20-30% de pérdida general de la discriminación cromática (Pacheco, y otros, 1999). En este sentido, analizar la visión del color es de gran importancia ya que ayuda a detectar los glaucomas precoces (Pacheco, y otros, 1999) (Papaconstantinou, y otros, 2009).

En los casos de degeneración macular asociada a la edad (DMAE) también se confirman los cambios producidos en la visión del color, afectándose inicialmente la pérdida en el eje azul-amarillo y más tardíamente en ambos ejes, rojo-verde y azul-amarillo (O'Neill-Biba, y otros, 2010). Debe resaltarse, igualmente, la descripción de un caso (Young, y otros, 1980) de defecto adquirido por un trauma en la cabeza.

Finalmente, mencionaremos la posible afectación asociada a los medicamentos administrados por vía sistémica (Tabla 2.3.2.5).

#### Afectación de funciones o estructuras oculares por medicamentos administrados por vía sistémica

Afectación	Manifestación clínica	Fármacos implicados
Retina y nervio óptico	Alteraciones de la visión, desde visión borrosa a ceguera	Tioridazina, cloroquina, anticonceptivos, deferroxamina, nifedipina, digitálicos
Nervio óptico y vías visuales	Alteraciones de la visión	Etambutol, isoniacida, cloranfenicol, corticoides

#### Alteración en la visión del color producida por medicamentos administrados por vía sistémica

Grupo	Fármacos
Cardiotónicos	Digoxina
Antibióticos	Tetraciclinas
Antisépticos	Ácido nalidíxico, nitrofurantoína
Antituberculosos	Etambutol
Antiinflamatorios no esteroideos	Ibuprofeno, ketoprofeno, indometacina, naproxeno, sulindaco

Tabla 2.3.2.5. Fármacos que pueden ocasionar alteraciones en la visión del color. (Eladi & March, 2002)

### 2.3.3. Evaluación clínica de la visión del color

Para proceder a la evaluación de la visión del color, es importante saber las necesidades y los objetivos de las pruebas, diferenciándose tres categorías: “screening”, diagnóstico del tipo y grado de la deficiencia de la visión del color y valoración del significado de dicha deficiencia en una vocación o empleo en particular (Dain, 2004).

Las pruebas para la evaluación de la visión del color se pueden clasificar en 4 tipos (Dain, 2004):

- Láminas pseudoisocromáticas: el observador debe identificar un número, una letra o una forma en un fondo basándose sólo en el color. Algunos de estos test son: el test de Ishihara, el City University y el Tritan Album de Lanthony.
- Test de ordenación: el observador debe ordenar los colores basándose en la tonalidad, o agrupar colores por algún atributo, como el Farnsworth D15, el Farnsworth-Munsell de 100 tonos y el SPP (Standard Pseudoisochromatic Plates).
- “Matching test”: el observador debe ajustar dos colores hasta igualarlos, como es el caso de los anomaloscopios.
- Pruebas de nombrar: el observador debe nombrar correctamente el color y/o responder con una acción apropiada sin necesidad de nombrar el color. Un ejemplo de dicha prueba es la linterna de Farnsworth.

En este estudio se han utilizado cuatro de estas pruebas para la evaluación de la visión del color, las cuales se describirán con mayor detalle en la sección de metodología. Dichas pruebas son: el test de Ishihara, el Tritan Album de Lanthony, el Farnsworth D15 y el anomaloscopio (Figura 2.3.3.1).



Figura 2.3.3.1. Arriba-izquierda: Un par de láminas del test de Ishihara. Un individuo con la visión del color normal verá un 15 a la izquierda y un 74 a la derecha; en cambio, un individuo con deficiencia en el eje rojo-verde verá un 17 a la izquierda y un 21 a la derecha. Arriba-derecha: Primera lámina del Tritan Album. Un individuo con la visión del color normal verá un cuadrado de tonalidades púrpura a la derecha; éste podrá ser percibido o no por un individuo con deficiencia a la sensibilidad para el azul dependiendo del grado de afectación. Abajo-izquierda: Anomaloscopio. Abajo-derecha: Test de Farnsworth D15.

Como ya se ha citado en otras ocasiones, la apariencia del color cambia dependiendo del iluminante empleado, por lo que algunas fuentes de luz pueden alterar los resultados de las pruebas. El iluminante estándar para realizar todas las pruebas clínicas de la visión del color es



el iluminante C, a raíz de la lámpara de MacBeth que se diseñó especialmente para esta finalidad. Esta lámpara consiste en una bombilla de tungsteno de 100W equipada con un filtro azul que convierte el espectro en iluminante C, además de proporcionar 300-400 lux sobre la superficie del test (Birch, 2001).

La luz del día, evitando siempre la luz directa del sol, también se puede emplear para las pruebas de la visión del color, aunque pueden existir ligeras variaciones dependiendo del lugar y de la hora del día (Birch, 2001). En el caso de la luz fluorescente, existen estudios que descartan su uso (Luque, y otros, 2001) (Zahiruddin, y otros, 2010), si bien otros autores lo aprueban. Concretamente, el estudio de Hovis y Neumann, sugiere que los fluorescentes con una temperatura de color de 7500 K o una bombilla de tungsteno filtrada con una temperatura de color de 6500 K son adecuados para iluminar la prueba para la visión del color Farnsworth-Munsell D15 (Birch, 2001) (Hovis & Neumann, 1995)

## 2.4. AFECTACIÓN DE LAS DEFICIENCIAS DE LA VISIÓN DEL COLOR EN LA VIDA DIARIA

El color es algo en lo que las personas con una visión del color normal ni siquiera piensan. No se le da la importancia que realmente tiene, pues la alteración de la visión de los colores puede afectar a la vida diaria, dificultando las tareas cotidianas.

Algunas de estas dificultades pueden ocurrir en las actividades diarias, por ejemplo al escoger el color de la ropa, durante la realización de trabajos domésticos y artesanales, en el reconocimiento de flores o plantas y en el momento de reconocer cuándo una fruta o vegetal está maduro. Además, también puede afectar a la conducción, a los estudios y al trabajo, siendo esta dificultad más significativa en los dicrómatas que en los tricrómatas anómalos (Steward & Cole, 1989) (Dain, y otros, 2009).

Existen varios estudios que confirman la dificultad en la educación escolar y en el aprendizaje en niños con anomalías en la visión del color. Gran parte de las experiencias visuales de los niños se basan en la utilización del color, siendo, además, el color muy empleado como instrumento para motivar el aprendizaje en la educación infantil (Logan & Gilmartin, 2004) (Suero, y otros, 2005) (Torrents, y otros, 2011). En la figura 2.4.1 podemos ver un ejemplo.

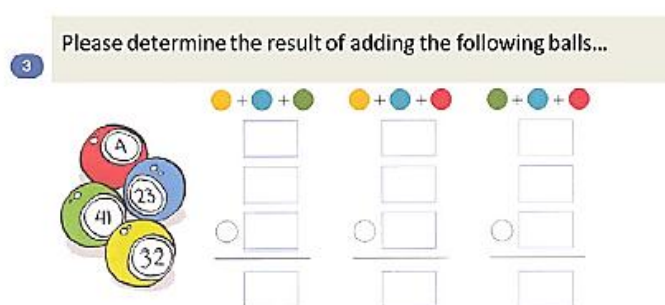


Figura 2.4.1. Ejemplo de un ejercicio donde se emplea el color como herramienta de resolución. (Torrents, y otros, 2011)

Las discromatopsias, además, son motivo de exclusión en muchas profesiones. Evidentemente, en estas profesiones no sólo se evalúa la capacidad de discriminación cromática, sino también se tienen en cuenta otros campos como la agudeza visual, la motilidad ocular y el campo visual, entre otros. Unos ejemplos de dichas profesiones son el Cuerpo

Nacional de Policía y Policías de las Comunidades Autónomas, Cuerpo de la Guardia Civil, servicio de dirección en la plataforma aeroportuaria, pilotos de aviación, navegación aérea, dirección general de la Marina Mercante, Cuerpo de Bomberos, Fuerzas Armadas, personal ferroviario y otras profesiones donde el defecto de la visión del color pueda provocar situaciones de inseguridad o peligro (Boletín Oficial del Estado: BOE-A-2012-4730, BOE-A-2002-12893, BOE-A-2011-15357, BOE-A-2011-5296, BOE-A-2010-17236).

En la conducción de vehículos de motor las discromatopsias están permitidas, es decir, la visión del color normal no es un requisito para la obtención del carnet de conducir (Boletín Oficial del Estado: BOE-A-2009-9481). Sin embargo, se ha documentado que los conductores con deficiencia en la visión del color tienen más dificultades en reconocer las señales de tráfico por su color (Whillans & Allen, 1992) (Tagarelli, y otros, 2004), aunque sólo informan tener este problema un 30% de ellos (Cole, 2004). Además, dichos conductores tienen un tiempo de reacción mayor que los conductores con la visión del color normal (Cole, 2004). Por otro lado, los mismos conductores adoptan diferentes estrategias para evitar estas dificultades, por lo que no consideran que su defecto en la visión del color sea un verdadero problema (Tagarelli, y otros, 2004). En cuanto al riesgo en accidentes de tráfico, no existe una asociación a una deficiencia en la visión del color (Tagarelli, y otros, 2004) (Cole, 2004) (Whillans & Allen, 1992).

### 3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Son cuatro los objetivos de este estudio:

- 1- Determinar cómo afectan las anomalías en la visión del color a los sujetos que las padecen. Saber cómo influyen estas disfunciones en el día a día de sus vidas y las posibles dificultades a las que deban afrontarse al realizar tareas tan cotidianas como elegir la ropa o comprar fruta, así como la conducción y el trabajo.
- 2- A partir de las dificultades halladas, determinar las estrategias desarrolladas por los mismos sujetos para resolver los problemas realizando dichas tareas.
- 3- Determinar la influencia del tipo de iluminación sobre la visión del color evaluando la visión del color bajo dos iluminantes: un iluminante A (luz incandescente) y un iluminante  $D_{65}$  (luz día).
- 4- Determinar la influencia del tipo de iluminación sobre el color calculando las coordenadas cromáticas y la luminancia de algunos colores de dos láminas del test de Ishihara bajo los mismos iluminantes utilizados para la evaluación de la visión del color: un iluminante A (luz incandescente) y un iluminante  $D_{65}$  (luz día).

Como hipótesis de este estudio se espera encontrar que los sujetos con anomalías en la visión del color refieran dificultades en algunas de las tareas mencionadas en el cuestionario, aun sabiendo que estas dificultades diferirán en según el grado de afectación y el tipo de anomalía, acentuándose más en el caso de afectación aguda y en los sujetos dicrómatas.

El iluminante utilizado para realizar los tests de visión del color puede causar una variación en los resultados obtenidos por los observadores, de modo que se espera encontrar tales diferencias en las distintas pruebas realizadas por un mismo sujeto bajo iluminantes diferentes. Comparando los dos iluminantes, se espera hallar que los resultados más coherentes entre las pruebas aparezcan bajo el iluminante  $D_{65}$  (luz día), por ser el más parecido al iluminante recomendado (iluminante C, luz día). Finalmente, el iluminante utilizado para medir el color también causará una variación en los resultados colorimétricos, por lo que se espera obtener diferencias entre dichas medidas.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. PARTICIPANTES

La población total evaluada fue de 109 sujetos (57 hombres y 52 mujeres) de edades comprendidas entre los 28 y los 87 años. Sin embargo, el trabajo se centró especialmente en los sujetos con las edades más avanzadas dado que, de este modo los participantes gozaban de más experiencia para poder desarrollar las diversas estrategias de adaptación. Además, esta población está más afectada por las deficiencias adquiridas de la visión del color, causadas, mayoritariamente, por medicamentos, el desarrollo de cataratas y/u otras patologías.

Los lugares visitados para realizar la evaluación clínica fueron los tres centros de gente mayor existentes en Vilafranca del Penedès, además de la *Universitat de la Gent Gran de Terrassa*. No se nos permitió realizar el estudio en dos de los centros visitados, por lo que se informó a los posibles voluntarios de dichos centros sobre el estudio a realizar y se les facilitó un nombre y un teléfono de contacto. Finalmente, pues, el estudio se realizó en el *Casal de la Gent Gran de Vilafranca* y en la *Universitat de la Gent Gran de Terrassa*. Por otro lado, también se buscaron voluntarios entre los propios familiares y conocidos.

De los 109 individuos evaluados, se encontraron 10 con deficiencia de la visión del color -ninguno de ellos mujer- que se definió como grupo de muestra. Para poder hacer una comparación de los resultados obtenidos, también se incluyó un grupo control de las mismas características del grupo de muestra, es decir, que coincidieran en edad y sexo, pero sin afectación en la visión del color. Los sujetos del grupo control se escogieron aleatoriamente. A los dos grupos se les realizó la evaluación clínica y se les entregó un cuestionario de calidad de vida. Todos los participantes en el estudio prestaron su consentimiento tras ser debidamente informados de los objetivos y procedimientos del mismo.

Por otra parte, se realizó una búsqueda vía internet de individuos con anomalías en la visión del color para realizarles el cuestionario de calidad de vida. Esta búsqueda se realizó en foros sobre el daltonismo, en una página web llamada *Asociación Daltónicos No Anónimos* y en la red social *Facebook*. A partir de esta búsqueda se encontraron 10 individuos, todos varones, con edades entre los 17 y los 62 años con afectación en la visión del color. Se valoró la idea de enviar las pruebas de la visión del color por correo electrónico. Sin embargo, una prueba piloto previa puso en evidencia que la gran dependencia que tiene el color del iluminante imposibilitaba la obtención de resultados fiables y válidos, como especulamos en nuestra hipótesis, por lo que, finalmente, se desistió de realizar estas medidas.

### 4.2. EXAMEN OPTOMÉTRICO Y EVALUACIÓN DE LA VISION DEL COLOR

A todos los participantes se les realizó un examen optométrico general. Para ello se utilizó un test de agudeza visual (AV) optotipo Palomar, una caja y gafas de prueba y el test de estereopsis Randot Stereotests (cartilla propia del test y gafas polarizadas). Así, se realizó una anamnesis completa, se midió la AV con la corrección habitual del paciente colocando el test a 5 metros de distancia, se realizó un examen refractivo en caso de que la AV fuese inferior a 0.8 (decimal) y, por último, se midió la estereopsis, colocándose el test a 40 cm.

La evaluación de la visión del color fue más exhaustiva. Se realizaron cuatro pruebas, las cuales se detallan a continuación:

- **Ishihara's test for color-blindness. 38 Plates Edition. 1993. Kanehara & Co., LTD:**

Este test consiste en láminas pseudoisocromáticas y es la prueba más conocida y utilizada para el "screening" de deficiencias congénitas rojo-verde (Dain, 2004) (Borràs, y otros, 1999). Además, es una prueba que puede realizarse a partir de los 3 años (Birch, 2001) (Borràs, y otros, 1999).

Consta de 38 láminas que llevan impresos una serie de puntos de distintos colores y tamaños que enmascaran un número o unos caminos. Permite clasificar los defectos en protan y deutan (Figura 4.2.1) (Birch, 2001). De las 38 láminas, 25 contienen números (Tabla 4.2.1) y 13 contienen caminos (para los pacientes que no puedan o sepan descifrar los números). Si las respuestas correctas son 17 láminas o más consideramos que el paciente tiene una visión cromática normal; sin embargo, si solamente se han podido descifrar correctamente 13 o menos láminas consideraremos que tiene una visión cromática deficiente.

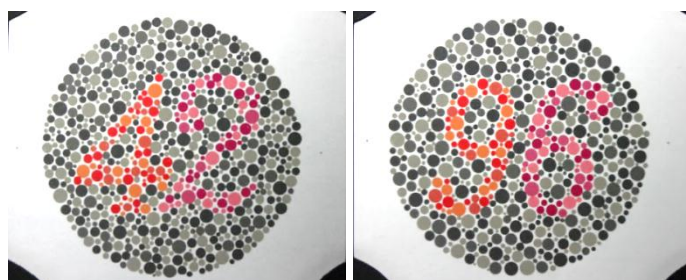


Figura 4.2.1. Dos de las cuatro láminas clasificadoras entre las deficiencias protan o deuter.

BLOQUE	LÁMINAS	VISIÓN CROMÁTICA NORMAL	DEFICIENCIA CROMÁTICA ROJO-VERDE	CEGUERA AL COLOR
1	1	12	12	12
2	2	8	3	-
	3	6	5	-
	4	29	70	-
	5	57	35	-
3	6	5	2	-
	7	3	5	-
	8	15	17	-
	9	74	21	-
4	10	2	-	-
	11	6	-	-
	12	97	-	-
	13	45	-	-
5	14	5	-	-
	15	7	-	-
	16	16	-	-
	17	73	-	-
6	18	-	5	-
	19	-	2	-
	20	-	45	-
	21	-	73	-

BLOQUE	LÁMINAS	VISIÓN CROMÁTICA NORMAL	PROTANOMALÍA		DEUTERANOMALÍA	
			Aguda	Leve	Aguda	Leve
7	22	26	6	(2)6	2	2(6)
	23	42	2	(4)2	4	4(2)
	24	35	5	(3)5	3	3(5)
	25	96	6	(9)6	9	9(6)

Tabla 4.2.1. Posibles respuestas del test de Ishihara. El signo "-" indica que la lámina no se puede ver y los números entre paréntesis indican que son difíciles de ver. (Borràs, y otros, 1999)

Para realizar la prueba es necesario que el paciente utilice su prescripción habitual. El test debe estar uniformemente iluminado –iluminante C (Birch, 2001)- y colocado a 75 cm de forma perpendicular a la línea visual del paciente. Debe advertirse al paciente que las láminas no se pueden tocar con los dedos.

- ***The Lanthony Tritan Album. 1985. Luneau Ophtalmologie. Paris:***

Este test también pertenece a la láminas pseudoisocromáticas e identifica los defectos congénitos tritan y los defectos adquiridos tipo III (Birch, 2001). El test consiste en un cuadrado de puntos grises con diferente luminosidad en una esquina del cual se encuentra otro cuadrado con puntos púrpura. El álbum tiene 6 láminas (de la 0 a la 5): la lámina número 0 contiene un cuadrado naranja como demostración (todos los sujetos lo pueden ver) y las láminas de la 1 a la 5 contienen el cuadrado púrpura cuya saturación va disminuyendo a medida que pasan las láminas, de modo que esta prueba puede identificar el grado del defecto (Birch, 2001).

La puntuación de este test se decide según sea la última lámina vista. Si la lámina número 0 no se ve, normalmente se relaciona a una muy baja AV. Si se ve la número 0 y no la número 1 la puntuación es de 0/5, si se ve la 1 pero no la 2 la puntuación es de 1/5, y así con todas las láminas hasta ver la número 5, dando una puntuación de 5/5 (Figura 4.2.2). Se debe avisar al paciente que las láminas no pueden tocarse con los dedos mientras se hace el examen.

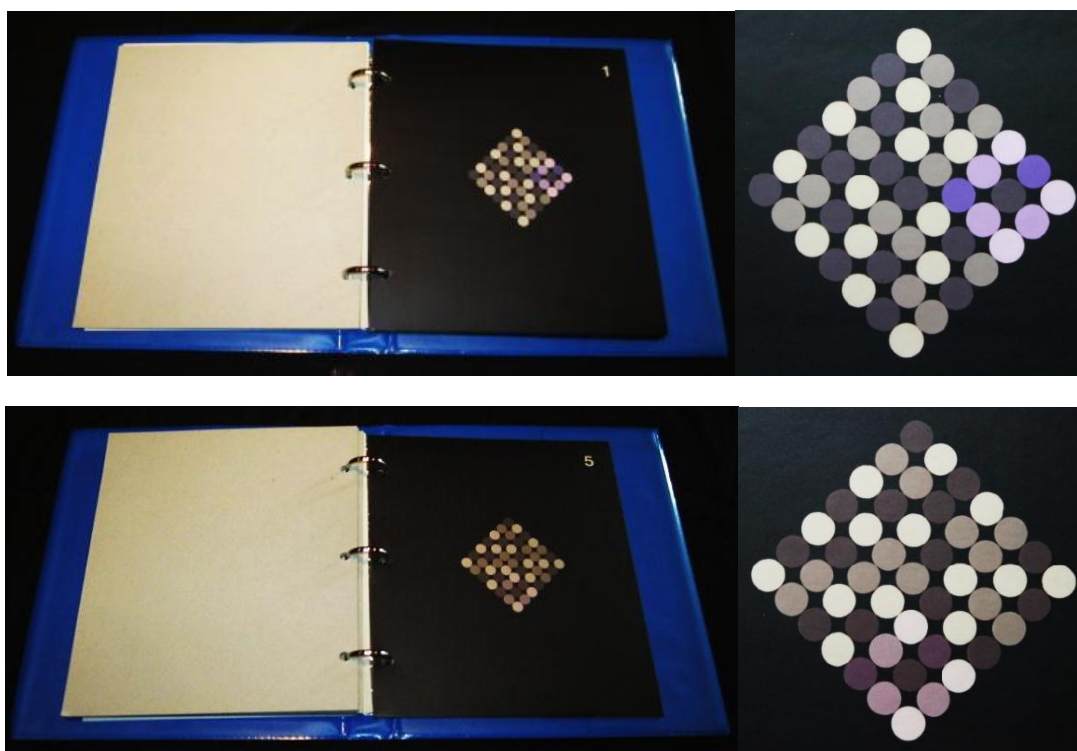


Figura 4.2.2. Láminas 1 y 5 del Tritan Album, donde se observa la disminución de la saturación de los puntos púrpura.

Según las instrucciones del mismo álbum, la iluminación para este test debe ser de al menos 500 lux y tener una temperatura de color del orden de 6000 K, descartándose la luz incandescente y, además, evitándose también la luz directa del sol.

- **Test dichotomique de Farnsworth Type 15D (Farnsworth's dichotomus test 15D type). Luneau Ophthalmologie:**

Este test pertenece a las pruebas de ordenación de colores y se ha diseñado para detectar las anomalías cromáticas y detectar distintos grados de afectación (Borràs, y otros, 1999) (Birch, 2001). Permite valorar la posible existencia de problemas congénitos y adquiridos, detectando anomalías en el eje azul-amarillo y en el eje rojo-verde. Consiste en varias fichas de diferentes colores, con los mismos tonos Munsell de luminosidad 5 y croma 4 (Birch, 2001). Concretamente, este test está compuesto por 16 fichas -una de referencia y 15 para ordenar-, si bien existen distintas versiones de esta prueba, como el test Farnsworth B20 o el Farnsworth-Munsell de 100 tonos. Este estudio escogió el D15 por ser el test más simple y rápido de los test de Farnsworth existentes.

Para la realización de esta prueba se recomienda el iluminante C con un nivel de iluminación no inferior a 270 lux (Luque, y otros, 2001). El paciente utilizará la prescripción habitual, realizando la prueba sobre una mesa a unos 50 cm de distancia. Deberá colocar las fichas, cogiéndolas por la parte externa para no tocar los colores con las manos, en una secuencia lógica de color, es decir, ordenándolas por tonos continuos partiendo de la ficha de referencia (nº 1) y quedando las 15 fichas restantes por colocar (Figura 4.2.3).

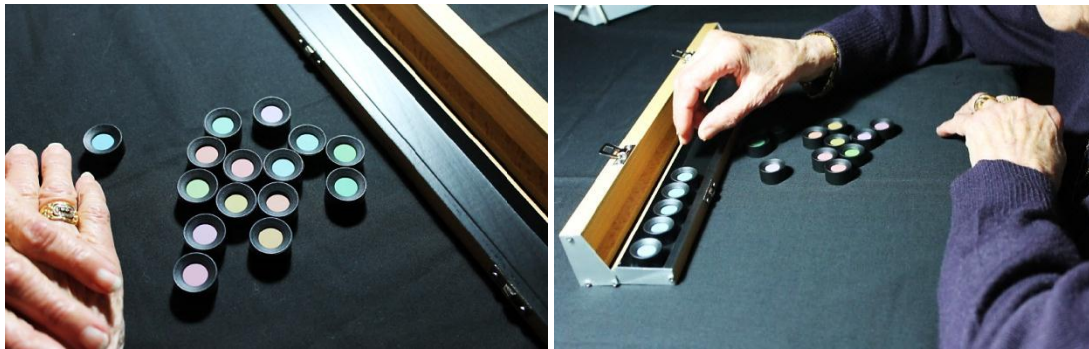


Figura 4.2.3. Paciente realizando el test Farnsworth D15.

Para la interpretación de los resultados es suficiente con unir con una línea los puntos que aparecen en la hoja de resultados siguiendo el orden por el que han sido clasificadas las fichas. La inclinación de las líneas trazadas que se asemeje más a la de las anomalías indicadas en la hoja de resultados sugerirá el tipo de anomalía que presenta el sujeto (Figura 4.2.4).

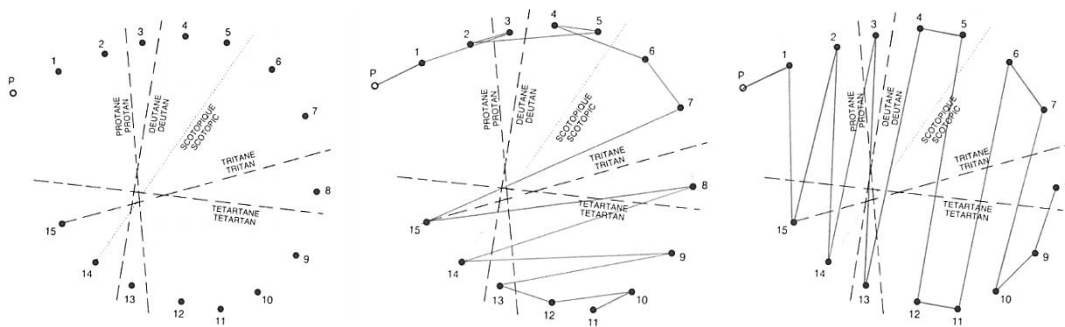


Figura 4.2.4. Izquierda: ficha utilizada para anotar los resultados del test Farnsworth D15. Centro: trazo correspondiente a un sujeto con defecto tritan. Derecha: trazo correspondiente a un sujeto con defecto deuter

- **Anomaloscope. Davico. Inopsa Spain:**

El anomaloscopio pertenece al “matching test” y está diseñado para detectar las deficiencias de color rojo-verde (Birch, 2001). Existen anomaloscopios para la detección de deficiencias en el eje azul-amarillo, si bien se escogió este tipo por tener el defecto rojo-verde una mayor incidencia en la población. Cuando el anomaloscopio se complementa con la información de diferentes pruebas de visión del color, los resultados proporcionados permiten una clasificación más exhaustiva de las deficiencias de color. El instrumento consiste en una pantalla redonda partida por la mitad en la que hay que conseguir la igualación entre un amarillo y una mezcla aditiva entre rojo y verde (Figura 4.2.5).



Figura 4.2.5. Muestra del cambio de color en el semicampo izquierdo, pasando del rojo al naranja amarillento y de éste al verde.

El observador debe realizar una igualación colorimétrica perceptual entre ambos semicampos, variando la proporción de las luces roja y verde (aumentando una o disminuyendo la otra). Además, se puede variar la claridad del semicampo amarillo para ajustar de la forma más perfecta posible la igualación.

Con este test podemos clasificar si el sujeto es tricrómatas anómalo, es decir, si es capaz de igualar la mezcla (aunque en proporciones diferentes a la del sujeto normal), o si es dicrómatas y ve igual todo el intervalo de proporciones. Mediante este test también podremos distinguir entre protanómalo, que será el sujeto que necesite añadir más cantidad de rojo para ver igual la mezcla, y deuteranómalo, que será aquel que añada más verde.

Según las instrucciones de uso, se empieza pulsando “ZERO” y se comprueba que “SCALE” marque 0. El observador debe pulsar “UP” para modificar *L* hasta igualar *L* y *R*, a la vez que rueda “SET-UP” para modificar la claridad de *R*. Si se pasa debe pulsar “DOWN” para igualar. Una vez el paciente perciba como iguales *L* y *R*, debe pulsar “SCALE” para leer el resultado.

Los dicrómatas no notan cambios en *L* pulsando “UP” o “DOWN”. En este caso, con “SCALE” en 0, preguntamos al observador si *L* y *R* tienen la misma luminosidad. Los protanopes verán *L* menos luminoso que *R* y los deuteranopes verán *L* y *R* igual de luminosos.

Finalizado el test, la escala marca una puntuación de 0 a 99, los resultados se muestran en la tabla 4.2.2.

Tricrómatas	
De 59 a 67	Normales
Menor de 50	Protanómalos
Mayor de 75	Deuteranómalos

Tabla 4.2.2. Resultados del anomaloscopio Davico.

Las pruebas para la evaluación de la visión del color se realizaron bajo dos iluminantes diferentes para observar los posibles cambios en los resultados obtenidos: una luz incandescente (Iluminante A: OSRAM Classic A 60W 230V) y una fuente de luz luminiscente simuladora de luz día (Iluminante D<sub>65</sub>: Philips Genie 18W (80W)). Se midió la iluminación de



cada fuente de luz y la luminancia de las distintas pruebas (excepto el anomaloscopio), cada una de ellas expuesta a cada iluminante. Estas medidas se muestran en la tabla 4.2.3. El luxómetro utilizado para ello fue el Mavolux 5032B de Gossen (Figura 4.2.6).



Figura 4.2.6. Luxómetro Mavolux 5032B.

		Iluminante A	Iluminante D <sub>65</sub>
<b>Iluminación (lx)</b>		661	896
<b>Luminancia (cd/m<sup>2</sup>)</b>	Farnsworth D15	32.2	34.9
	Test Ishihara (Lámina 5)	98.7	149.7
	Tritan Album (Lámina 1)	34.4	39.4

Tabla 4.2.3. Valores de iluminación y luminancia de los dos iluminantes utilizados, A y D<sub>65</sub>.

### 4.3. CUESTIONARIO DE CALIDAD DE VIDA

Al finalizar las pruebas se entregó un cuestionario de calidad de vida a los 10 sujetos con deficiencia en la visión del color, así como a los sujetos que formaban el grupo control. Dicho cuestionario se confeccionó a partir de distintos artículos (Spalding, 2002) (Steward & Cole, 1989) (Tagarelli y otros, 2004), en los cuales se añadió un apartado en el que los sujetos podían comentar las soluciones a los posibles problemas causados por las anomalías de la visión del color.

El cuestionario de calidad de vida trata de determinar cómo afecta la disfunción de la visión del color a la vida diaria. Se abarcan temas como las tareas cotidianas, los estudios y el trabajo, además de la conducción. El simple hecho de elegir la ropa puede suponer un problema para estos individuos, como también el hecho de ir a comprar fruta o vegetales, por no diferenciar por el color si son maduros o no. También pueden tener dificultades en la conducción ya que se usa el color en muchas de las señales de tráfico, las cuales se pueden confundir. Dicho cuestionario está incluido en los anexos del estudio.

### 4.4. ESTUDIO COLORIMÉTRICO DEL TEST DE ISHIHARA BAJO DOS ILUMINANTES DISTINTOS

Se realizaron las medidas de los colores de dos láminas del test de Ishihara con dos iluminantes. Se escogió este test por ser el más conocido y utilizado para la evaluación de la visión del color.

Para ello se utilizó el espectrofotómetro SpectroScan PR 715 de Photo Research y la cabina de iluminación controlada VeriVide (Figura 4.4.1), de la cual se seleccionó el iluminante  $D_{65}$  y el TL84 P15 de los cuatro disponibles - $D_{65}$  (luz día), TL84 P15 (incandescente), F (fluorescente) y UV (ultravioleta)-, ya que son los iluminantes utilizados en las pruebas de la visión del color de este estudio.



*Figura 4.4.1. Espectrofotómetro SpectroScan PR 715 y cabina de iluminación VeriVide, midiendo el color de la lámina 25 del test de Ishihara.*

## 5. RESULTADOS

Para la presentación de los resultados veremos, en primer lugar, las deficiencias en la visión del color detectadas en el grupo de estudio, así como las estrategias de adaptación a las mismas reportadas en el cuestionario de calidad de vida. A continuación trataremos el análisis colorimétrico de las láminas del test de Ishihara.

### 5.1. EVALUACIÓN DE LAS DEFICIENCIAS EN LA VISIÓN DEL COLOR

Se analizaron los resultados obtenidos respecto a las deficiencias en la visión del color de los sujetos evaluados. Los 10 varones con déficit en la visión del color eran conscientes de ello y, además, en todos los casos se trató de deficiencias congénitas. Las edades de los sujetos de muestra oscilaron entre los 32 y los 67 años (Figura 5.1.1). Se decidió incluir también a los sujetos más jóvenes debido a la escasez de la muestra poblacional obtenida.

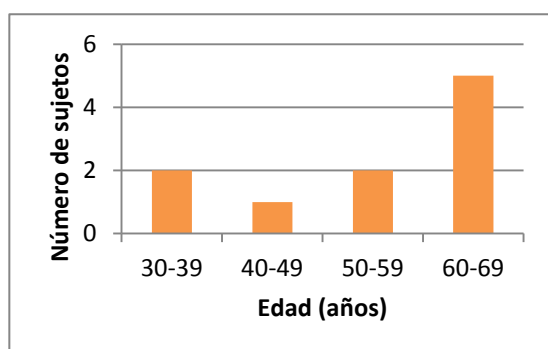


Figura 5.1.1. Distribución de edades de los sujetos con deficiencia en la visión del color.

Entre los sujetos de la muestra se hallaron 4 deuteranómalos, 5 deuteranopes y 1 sujeto con defecto tritan. Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas se muestran en la tabla 5.1.1. En estos resultados se aprecian los cambios entre un iluminante y otro, mayoritariamente en el test de Farnsworth D15, donde los resultados cambian totalmente según el iluminante, inclinándose hacia la protanomalia/protanopia bajo luz día en el caso de los defectos deuter. De los individuos evaluados, se observó que 6 de los 9 sujetos deuter mostraron un perfil protan con el iluminante  $D_{65}$ , mientras que el sujeto tritan no experimentó cambio alguno según el iluminante utilizado. Ninguno de los sujetos del grupo control evidenció deficiencias en la visión del color bajo los dos iluminantes empleados.

SUJETO	TEST	ILUMINANTE A	ILUMINANTE $D_{65}$
1	Ishihara	Deuter agudo	Deuter agudo
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	-	Deuter
	Anomaloscopio	Protanómalo	
2	Ishihara	Deuter agudo	Deuter agudo
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	-
	Anomaloscopio	Deuteranope	
3*	Ishihara	Deuter leve	Deuter leve
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	Protan
	Anomaloscopio	Deuteranope	
4*	Ishihara	Deuter agudo	Deuter leve
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	Protan
	Anomaloscopio	Deuteranómalo	

5	Ishihara	Deuter agudo	Deuter agudo
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	Normal	Normal
	Anomaloscopio	Deuteranómalo	
6*	Ishihara	Deuter agudo	Deuter leve
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	Protan
	Anomaloscopio	Deuteranómalo	
7*	Ishihara	Deuter agudo	Deuter agudo
	Tritan Album	5/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	Protan
	Anomaloscopio	Deuteranope	
8*	Ishihara	Deuter agudo	Deuter agudo
	Tritan Album	4/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	Protan
	Anomaloscopio	Deuteranope	
9	Ishihara	Normal	Normal
	Tritan Album	1/5	1/5
	Farnsworth D15	Tritan	Tritan
	Anomaloscopio	Normal	
10*	Ishihara	Deuter agudo	Protan agudo
	Tritan Album	4/5	5/5
	Farnsworth D15	Deuter	Protan
	Anomaloscopio	Deuteranope	

Tabla 5.1.1. Resultados obtenidos de las cuatro pruebas -test de Ishihara, Tritan Album, Farnsworth D15 y anomaloscopio- bajo los dos iluminantes -A y D<sub>65</sub>- de los diez sujetos con anomalía en la visión del color. Los resultados se marcan con distintos colores: el color blanco indica un resultado normal, el color verde indica un defecto deuter, el color rojo indica un defecto protan y el color azul indica un defecto tritan. El asterisco indica los sujetos los cuales han cambiado de anomalía según la fuente de luz.

## 5.2. RESULTADOS DEL CUESTIONARIO DE CALIDAD DE VIDA

El cuestionario que rellenaron los sujetos contenía una serie de preguntas sobre las posibles dificultades que han experimentado a lo largo de su vida. Abarcaba tareas del día a día -como seleccionar la ropa, saber si una fruta está madura o saber interpretar un mapa del metro, por ejemplo- y tareas realizadas en el trabajo o en la conducción.

Las respuestas al cuestionario se dividieron en tres grupos. El grupo 1 está compuesto por los sujetos con anomalía en la visión del color descritos anteriormente (10 individuos). El grupo 2 son los participantes vía internet con defectos en la visión cromática sin determinar (10 individuos). El grupo 3 está formado por 10 sujetos con la visión del color normal. El número de individuos que afirma tener dificultades en las tareas se muestra en la tabla 5.2.1.

Pregunta	Grupo 1 (n=10)			Grupo 2 (n=10)	Grupo 3 (n=10)	Total Grupo 1+2 (n=20)
	Deuteranómalos (n=4)	Deuteranopes (n=5)	Tritan (n=1)			
En la escuela, ¿tuviste dificultades en las tareas a causa de los colores?	3	2	0	3	0	8
¿Has tenido dificultades en seleccionar los colores de la ropa, accesorios, coches, pinturas, muebles...?	2	2	0	6	0	10

¿En trabajos artesanales y hobbies, has tenido problemas en distinguir los colores del material, cables, lana, videojuegos...?	1	4	1	5	0	11
¿Te cuesta identificar plantas o flores a causa del color?	0	3	0	3	0	6
¿Encuentras difícil leer un mapa?	0	1	0	2	0	3
¿Sabes distinguir cuándo la fruta o los vegetales están maduros por el color?	1	2	0	6	0	9
¿Sabes si la carne está cocida por su color?	1	3	0	3	0	7
¿En actividades deportivas, ya sea como espectador o como participante, tienes dificultades a causa del color?	1	2	0	4	0	7
¿Te cuesta ajustar el balance de color del televisor o retocar y ajustar las fotografías?	0	3	0	3	0	6
¿Sabes reconocer si la piel empieza a quemarse?	0	2	0	2	0	4
¿Has tomado la medicina equivocada a causa de las dificultades con el color?	0	0	0	0	0	0
Tu defecto en la visión del color, ¿ha afectado al escoger una carrera?	1	2	0	3	0	6
¿Se te ha impedido algún trabajo a causa de este defecto?	0	0	0	2	0	2
En tu trabajo actual, ¿tienes dificultades con el color?	0	0	0	2	0	2
¿Y en trabajos anteriores?	0	1	0	1	0	2
¿Has tenido dificultades en distinguir el color de las luces de las señales de tráfico?	0	3	0	3	0	6
¿Has confundido las luces de tráfico con las de la calle?	0	2	0	2	0	4
¿Encuentras que las luces de freno de otros coches son difíciles de ver?	0	2	0	1	0	3
¿Encuentras las luces de aviso o peligro temporales difíciles de ver?	0	1	0	1	0	2
¿Te cuesta ver las luces del panel de mandos del coche?	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.2.1. Número de sujetos que refieren dificultades a causa del color.

Algunos de los sujetos con deficiencia en la visión del color admiten tener dificultades en determinadas tareas mencionadas en el cuestionario, mientras que el grupo control no refiere ningún problema. Obviamente, dicho grupo prescinde de desarrollar cualquier estrategia.

Pregunta	Estrategias desarrolladas
En la escuela, ¿tuviste dificultades en las tareas a causa de los colores?	Pedir ayuda a compañeros o profesores. Etiquetar los colores con sus nombres.
¿Has tenido dificultades en seleccionar los colores de la ropa, accesorios, coches, pinturas, muebles...?	Pedir ayuda.
¿En trabajos artesanales y <i>hobbies</i> , has tenido problemas en distinguir los colores del material, cables, lana, videojuegos...?	Pedir ayuda. Abstenerse.
¿Te cuesta identificar plantas o flores a causa del color?	Pedir ayuda.
¿Encuentras difícil leer un mapa?	Abstenerse.
¿Sabes distinguir cuándo la fruta o los vegetales están maduros por el color?	Pedir ayuda. Palpar y oler.
¿Sabes si la carne está cocida por su color?	Pedir ayuda. Cortarla para comprobar la textura.
¿En actividades deportivas, ya sea como espectador o como participante, tienes dificultades a causa del color?	Como espectador: sin solución. Como participante: abstenerse.
¿Te cuesta ajustar el balance de color del televisor o retocar y ajustar las fotografías?	Abstenerse. Retoques en modo automático. Tomar las fotografías en blanco y negro.
¿Sabes reconocer si la piel empieza a quemarse?	Retirarse del sol cuando se nota escozor o picor en la piel.
Tu defecto en la visión del color, ¿ha afectado al escoger una carrera?	Exclusión en los <i>Mossos d'Esquadra</i> y en el Cuerpo de Bomberos.
En tu trabajo actual, ¿tienes dificultades con el color?	Pedir ayuda. Pedir la referencia del color (vendedor). Pedir el cambio de los colores utilizados en el material empleado (camarero).
¿Y en trabajos anteriores?	Pedir ayuda.
¿Has tenido dificultades en distinguir el color de las luces de las señales de tráfico?	Acercarse a las señales de tráfico. Memorizar la posición de las luces de los semáforos. Reducir la velocidad. Prestar mayor atención.
¿Has confundido las luces de tráfico con las de la calle?	Acercarse a las señales de tráfico. Reducir la velocidad. Prestar mayor atención.
¿Encuentras que las luces de freno de otros coches son difíciles de ver?	Acercarse a las señales de tráfico. Reducir la velocidad. Prestar mayor atención.
¿Encuentras las luces de aviso o peligro temporales difíciles de ver?	Acercarse a las señales de tráfico. Reducir la velocidad. Prestar mayor atención.

Tabla 5.2.2. Estrategias desarrolladas por los sujetos con dificultades en algunas de las tareas cotidianas.

Las estrategias desarrolladas por los sujetos se muestran en la tabla 5.2.2. Tras analizar los resultados del cuestionario, se observó que la “solución” más empleada frente a las dificultades experimentadas por los sujetos con la visión del color anómala es la de preguntar o pedir ayuda, ya sea a un familiar, amigo, conocido o a la persona que le acompañe en ese momento. En muchas circunstancias, también, el sujeto opta por abstenerse de realizar la tarea, ya sea por imposibilidad o por aburrimiento o pereza.

A la hora de utilizar los colores en la escuela, algunos sujetos optaban por etiquetar los colores con sus nombres para evitar preguntar constantemente a los compañeros o profesores qué colores usar. De modo que coloreaban según los colores etiquetados, evitando, por ejemplo, los cielos color violeta y los árboles de hojas marrones y troncos verdes.

En cuanto al trabajo, cada sujeto ha desarrollado sus estrategias. Por ejemplo, un sujeto trabaja de vendedor de artículos para artes gráficas, entre ellos la tinta, y nos informó que siempre pide el color por su referencia para evitar confusiones. El otro caso que referenció

tener dificultades para distinguir los colores trabaja de camarero, su problema era que no podía diferenciar los manteles de las mesas y los colores de las notas de los pedidos. En cuanto informó de su disfunción en la visión del color, se cambiaron los colores por otros que él pudiera diferenciar sin dificultades.

En la conducción, la dificultad mayoritaria consiste en diferenciar las luces de los semáforos a larga distancia y/o de noche. Para distinguirlas, los sujetos deben acercarse y ver qué posición ocupa la luz encendida, lo que implica, en algunos casos, tener mayor precaución a la hora de conducir.

### 5.3. ESTUDIO COLORIMÉTRICO DEL TEST DE ISHIHARA BAJO DOS ILMINANTES DISTINTOS

En la tabla 5.3.1 se muestran las medidas de los colores de la lámina 5 del test de Ishihara (Figura 5.3.1) para un campo de 2° bajo iluminante D<sub>65</sub> y TL84 P15 (A), incluyendo la luminancia (Y) y las coordenadas cromáticas (x, y) de cada color medido. Se representan los colores en el diagrama cromático junto con las líneas de confusión de los dicrómatas, bajo iluminante D<sub>65</sub> (Figura 5.3.2) e iluminante A (Figura 5.3.3).

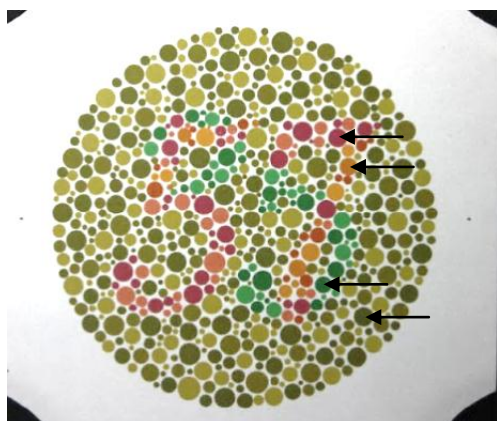


Figura 5.3.1. Lámina 5 del test de Ishihara. Un individuo con la visión del color normal debe ver el número 57. Un individuo con deficiencia en el eje rojo-verde debería ver el número 35. Las flechas negras indican los colores medidos, de arriba abajo: fucsia, naranja oscuro, verde oscuro y verde oliva oscuro.

D <sub>65</sub>	Fucsia	Naranja oscuro	Verde oscuro	Verde oliva oscuro
Y	22.60	28.17	21.89	25.53
x	0.38	0.41	0.31	0.36
y	0.32	0.37	0.40	0.40

A	Fucsia	Naranja oscuro	Verde oscuro	Verde oliva oscuro
Y	25.33	31.63	21.01	26.28
x	0.52	0.53	0.43	0.48
y	0.37	0.40	0.45	0.43

Tabla 5.3.1. Medidas de algunos colores de la lámina 5 (imagen izquierda) del test de Ishihara bajo el iluminante D<sub>65</sub> (derecha-arriba) y A (derecha-abajo).

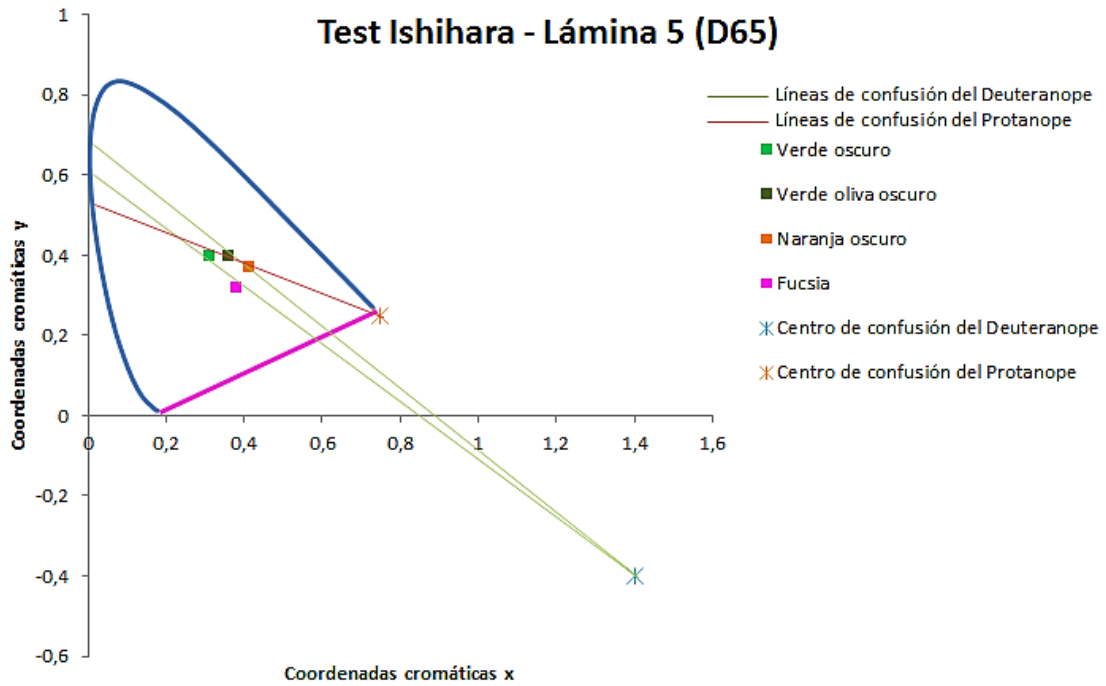


Figura 5.3.2. Representación en el diagrama cromático de los colores medidos de la lámina 5 del test de Ishihara bajo iluminante  $D_{65}$ .

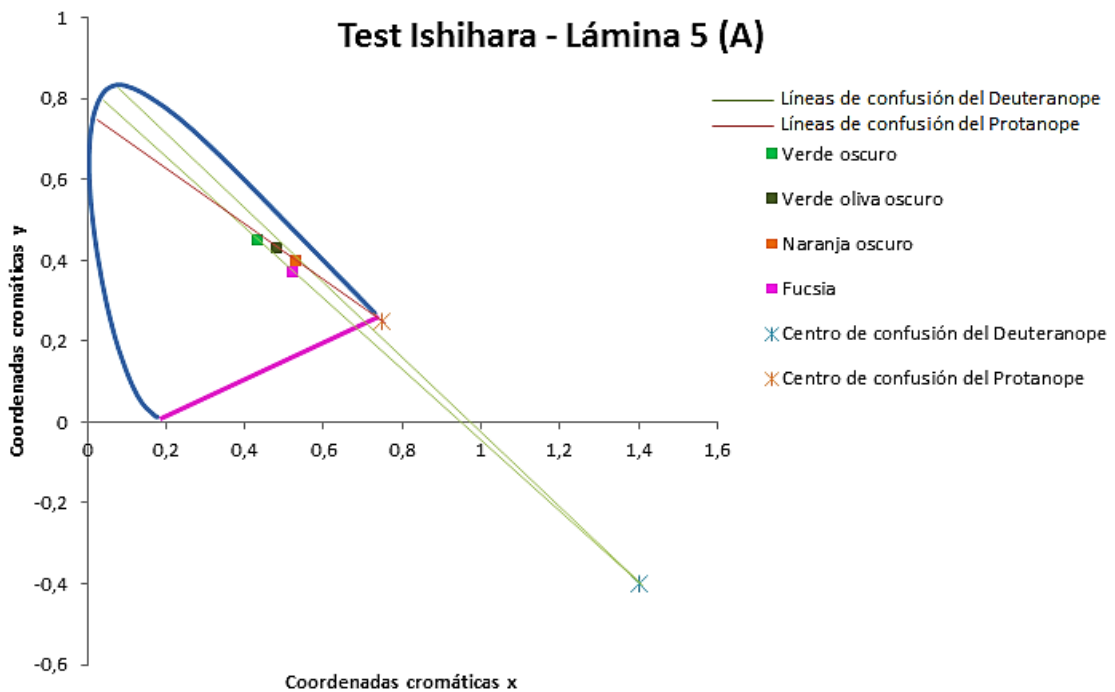


Figura 5.3.3. Representación en el diagrama cromático de los colores medidos de la lámina 5 del test de Ishihara bajo iluminante A.



Del mismo modo, se midieron los colores de la lámina 25 (Figura 5.3.4). Estos resultados se muestran en la tabla 5.3.2, donde se incluyó también la luminancia (Y) y las coordenadas cromáticas (x, y), y se representaron en el diagrama cromático para cada iluminante, D<sub>65</sub> (Figura 5.3.5) y A (Figura 5.3.6).

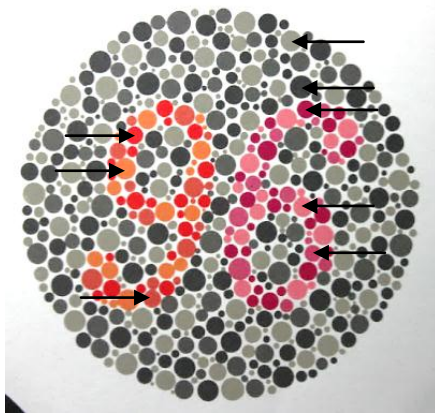


Figura 5.3.4. Lámina 25 del test de Ishihara. Un individuo con la visión del color normal debe ver el número 96. Un individuo con deficiencia protan, debería ver el 6 y podría, o no, ver el 9. Un individuo con deficiencia deuter, debería ver el 9 y podría, o no, ver el número 6. Las flechas negras indican los colores medidos, de arriba abajo: gris claro, gris oscuro, fucsia, rojo, naranja, rosa claro, rosa medio y rojo medio.

D <sub>65</sub>	Rosa claro	Rosa medio	Fucsia	Naranja	Rojo medio	Rojo	Gris claro	Gris oscuro
Y	41.70	30.32	17.55	40.43	30.84	23.48	37.73	15.06
x	0.39	0.39	0.42	0.43	0.43	0.49	0.33	0.32
y	0.32	0.31	0.28	0.36	0.34	0.32	0.35	0.34

A	Rosa claro	Rosa medio	Fucsia	Naranja	Rojo medio	Rojo	Gris claro	Gris oscuro
Y	47.27	34.92	21.82	46.58	36.32	30.62	38.36	15.20
x	0.53	0.53	0.57	0.55	0.55	0.60	0.46	0.46
y	0.37	0.37	0.34	0.39	0.37	0.35	0.41	0.41

Tabla 5.3.2. Medidas de algunos colores de la lámina 25 del test de Ishihara bajo el iluminante D<sub>65</sub> (arriba) y A (abajo).

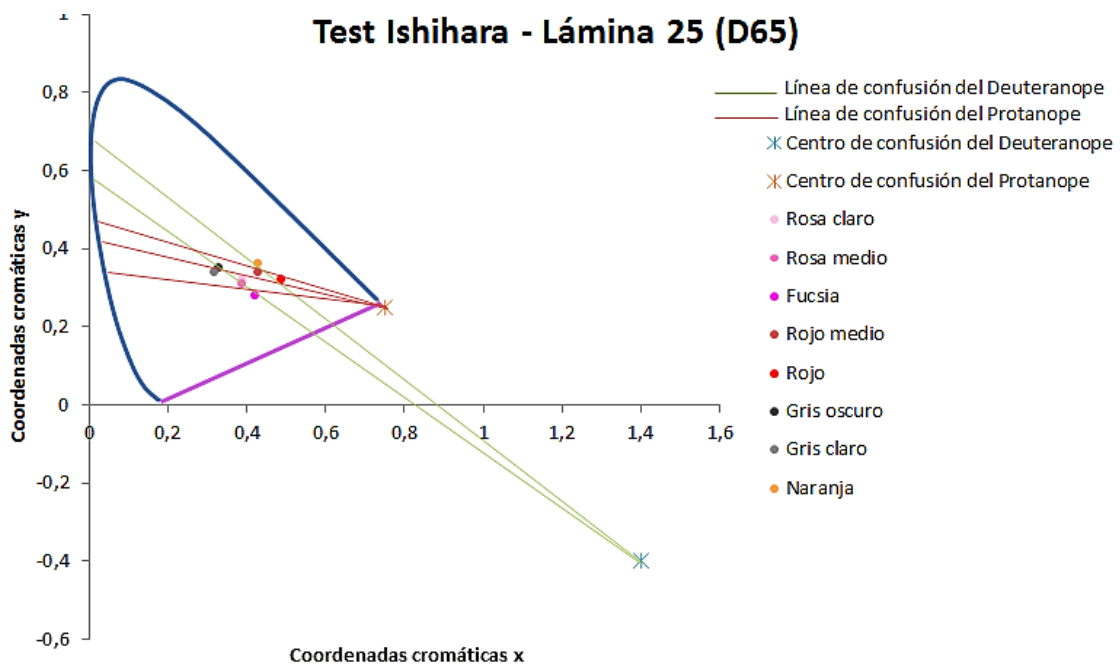


Figura 5.3.5. Representación en el diagrama cromático de los colores medidos de la lámina 25 del test de Ishihara bajo iluminante D<sub>65</sub>.

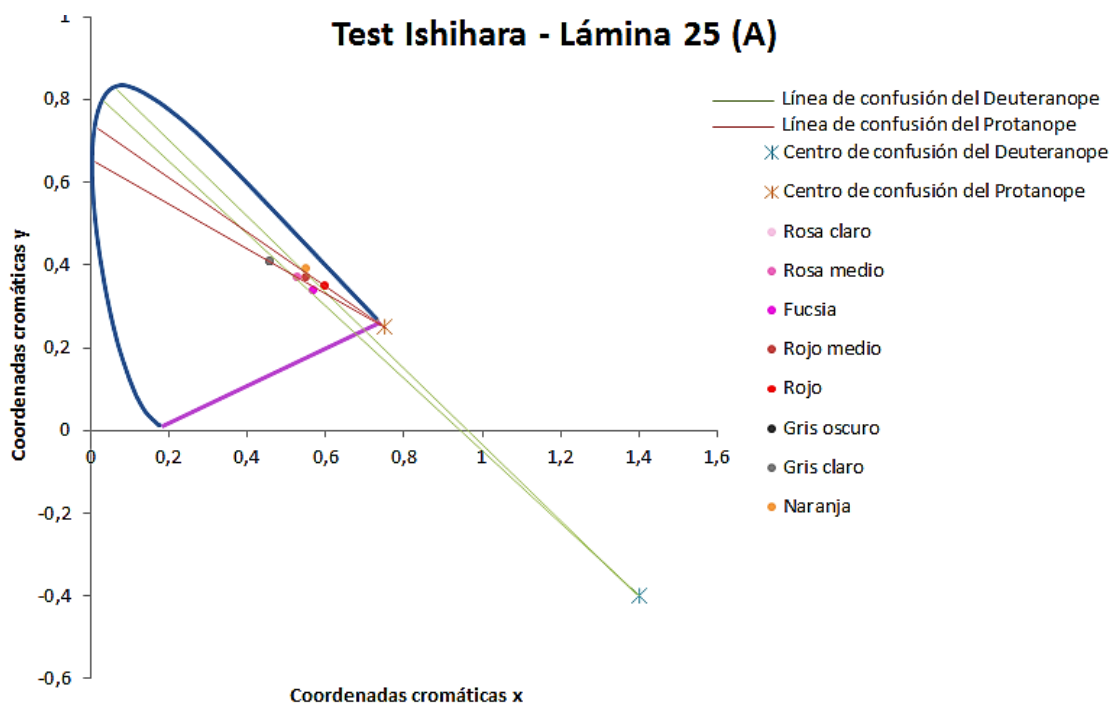


Figura 5.3.6. Representación en el diagrama cromático de los colores medidos de la lámina 25 del test de Ishihara bajo iluminante A.

Los resultados obtenidos sobre las medidas de los diferentes colores de las láminas del test de Ishihara indicaron un cambio importante tanto en la luminancia como en las coordenadas cromáticas de cada color. De manera que se confirmó la afirmación de que la percepción del color es dependiente del iluminante.

En el caso de la lámina 5 se confunden algunas porciones de los números de color naranja con el color verde oliva del fondo, diferenciando ambas anomalías –defecto protan y deuter- los rosas y los verdes más vivos del fondo, por lo que en vez de visualizar el número 57 distinguirán el número 35. Bajo iluminante  $D_{65}$  las diferencias parecen más obvias, ya que los colores se encuentran a mayor distancia entre ellos en el diagrama cromático, por lo que se distinguen con más facilidad. Sin embargo, bajo iluminante A, los colores se encuentran más juntos entre ellos, lo que puede dificultar su distinción, además de trasladarse a la zona de los colores naranjas y rojos en el diagrama cromático.

Por otro lado, la lámina 25 es la que clasifica entre los defectos protan y deuter. Las líneas de confusión de los dicrómatas nos indican cuáles son los colores que confunden estos sujetos. En el caso del protanope, los colores que confunde son los contenidos en el número 9, los rojos, con los grises del fondo, si bien distinguirá los rosas sobre el fondo gris, por lo que debería ver el número 6. En el caso del deuteranope, confundirá los colores rosas del número 6 con el fondo gris, por lo que no podrá distinguir este número, pero sí el número 9, ya que podrá diferenciar los colores rojos del fondo gris. De nuevo, los colores se encuentran más distanciados bajo iluminante  $D_{65}$  y trasladados hacia los colores naranjas y rojos, y más juntos, bajo iluminante A.

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio colorimétrico del test de Ishihara demuestra la importancia que tiene la luz sobre el color. Como ya se mencionado, el iluminante recomendado para evaluar la visión del color es el iluminante C, el cual simula luz día (Birch, 2001). Este estudio ha utilizado el iluminante  $D_{65}$  (luz día) y el iluminante A (luz incandescente) por ser dos iluminantes totalmente diferentes entre ellos, y así, conseguir una comparación de los resultados obtenidos entre ambos. A partir de estos datos, se demuestra que los resultados son más parecidos a los especificados por los fabricantes de las pruebas de la visión del color bajo el iluminante  $D_{65}$ . Sin embargo, la luz incandescente –de color anaranjada- provoca que todos los colores medidos bajo esta iluminación se desplacen hacia la zona de los colores naranjas y rojos en el diagrama cromático y, por consiguiente, se modifica el color medido. Este hecho puede causar mayor confusión en los pacientes a la hora de realizar los tests y, por tanto, producir falsos errores. Con esto, concluimos que debe usarse el iluminante  $D_{65}$  para realizar la evaluación de la visión del color, ya que actualmente el iluminante C no se usa con frecuencia.

La evaluación de la visión del color también se hizo bajo los dos iluminantes citados. Los sujetos con la visión del color normal no mostraron ningún cambio en los resultados. Este hecho puede ser debido a la capacidad que tiene el sistema visual humano de ajustar un amplio rango de colores del iluminante para preservar de forma aproximada la apariencia de los objetos. Este proceso se conoce como *adaptación cromática* y tiene como consecuencia la *constancia de color* (Kaiser & Boynton, 1996). Este último término se aplica cuando el color del objeto permanece sin cambios a pesar de variaciones significativas en el color de la iluminación y en el nivel de luminancia, es decir, los colores tienden a verse igual en cualquier condición de observación. Otro concepto es la *memoria de color*, el cual se refiere a que algunos objetos tienen un color asociado con ellos en la memoria, pero esto no implica que el color por memoria coincida con el color real de los objetos. La adaptación cromática y la memoria de color contribuyen a la constancia del color. La adaptación cromática se produce tanto en sujetos discromatópicos como en sujetos sin anomalías cromáticas, aunque la percepción final difiere entre ambos tipos de observadores. Ello podría justificar, al menos en parte, las diferencias que se obtienen entre ambos tipos de sujetos.

Los sujetos con anomalía en la visión del color mostraron cambios en los resultados de las pruebas según el iluminante utilizado. Por una parte, los resultados del test de Ishihara se mantuvieron bastante parecidos, ya que los 9 sujetos con defecto en el eje rojo-verde mostraron el mismo defecto bajo los dos iluminantes y sólo 2 de ellos mostraron un cambio en la gravedad del defecto, siendo leve bajo iluminante  $D_{65}$  y agudo bajo iluminante A, hecho que indica la mejora de la visión del color bajo luz día y el empeoramiento bajo luz incandescente. Por otra parte, nos sorprendieron los resultados obtenidos con el test de Farnsworth D15. Esta prueba, como todas las demás, se recomienda realizarla bajo iluminante C, el cual simula la luz día. Sin embargo, en este estudio se ajustan mejor los resultados obtenidos bajo el iluminante A que bajo el iluminante  $D_{65}$ . Las deficiencias de los sujetos clasificados como tipo deuter cambian totalmente, de manera que su anomalía se inclina hacia el tipo protan en 6 de los 9 sujetos con defecto en el eje rojo-verde. A pesar del número limitado de sujetos de la muestra de este estudio, creemos interesante sugerir que se realice una revisión de las instrucciones de administración del test Farnsworth D15 en lo que respecta a la fuente de luz. Futuros estudios podrían corroborar tal necesidad mediante una muestra más amplia de sujetos.

Como ya se ha referenciado en otros artículos, las personas con anomalías en la visión del color de este estudio informan tener más dificultades al realizar tareas en las que el color se ve implicado. También se confirma el hecho de que los dicrómatas tienen más dificultades que los tricrómatas anómalos, como mencionan otros autores (Steward & Cole, 1989) (Dain, y otros, 2009). El 55% de los individuos con afectación en la visión del color refieren tener dificultades a

la hora de realizar trabajos artesanales y *hobbies*. Actividades tan simples como los juegos y videojuegos, la pintura, la fotografía o la electrónica, son actividades que pueden resultar muy satisfactorias, sin embargo, las personas con deficiencia en la visión del color no pueden realizar muchas de estas tareas por la confusión de los colores, hecho que puede resultar frustrante para algunos. El 50% de los sujetos refieren mayor dificultad en escoger el color de la ropa, pinturas o accesorios. Elegir la ropa es algo que se hace diariamente, por lo que estos individuos necesitan pedir ayuda cada día, con lo cual, dependen de terceros. Los individuos que no quieren o pueden pedir ayuda a otra persona optan por vestirse con colores fácilmente reconocibles para ellos, como puede ser el blanco, el negro o el azul en algunos casos, o simplemente despreocuparse por el tema. Un 45% de los individuos no saben distinguir por su color cuándo la fruta o los vegetales están maduros, aunque han aprendido a resolver este problema utilizando otros sentidos como el olfato y el tacto. Un 40% admite haber tenido dificultades en la escuela, sin embargo, la solución más rápida que encontraron fue la de preguntar al compañero los colores utilizados.

Por otro lado, no todo son malas noticias para estos individuos. El diseñador portugués Miguel Neiva ha creado un código de colores, por lo que elegir lápices de color, identificar las líneas del metro y orientarse en el hospital es más fácil para los individuos con deficiencia en la visión del color de Oporto, en el norte de Portugal. Este código, el cual quiere extenderse al mundo entero, se llama *ColorADD* y se basa en los colores primarios (<http://www.coloradd.net>). Una barra diagonal simboliza el amarillo, mientras que el rojo y el azul están representados por triángulos que apuntan en sentidos opuestos. Combinados como en la paleta de un pintor, la barra y el triángulo hacia la derecha forman el verde, y así sucesivamente para los siete colores del arcoíris. El hospital Sao Joao de Oporto, uno de los más grandes del país, fue la primera institución en adoptar este código en las bandas de color que indican los diferentes servicios. De momento, el código de colores para daltónicos está disponible en el catálogo de fabricantes de pintura o de materiales de cerámica, así como en zapatería y prendas de vestir y en el metro de Oporto (Figura 6.1). Este código de colores sólo existe en Portugal, si bien pretende extenderse mundialmente como ya se ha mencionado con anterioridad. Es un concepto simple y fácil, y facilita en gran medida la vida de las personas con anomalías en la visión del color, incrementando su independencia.

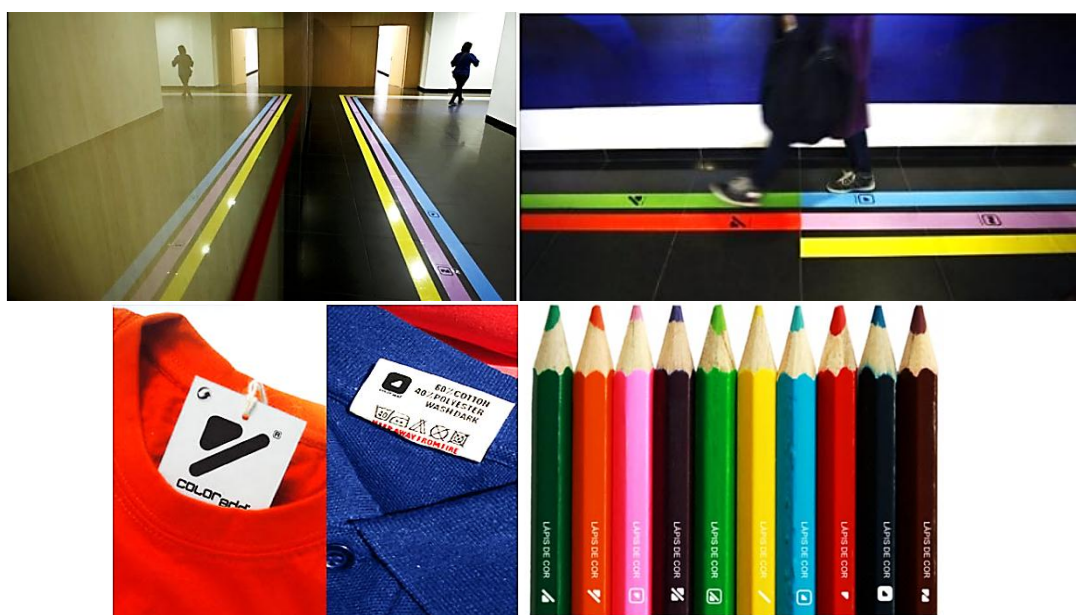


Figura 6.1. Arriba-izquierda: Hospital Sao Joao de Oporto. Arriba-derecha: metro de Oporto. Abajo-izquierda: prendas de vestir con el código de color en sus etiquetas. Abajo-derecha: lápices de colores marcados con el código de color.

También se han adaptado a las personas con deficiencia en la visión del color algunos videojuegos, como *Battlefield 3* y *Call of Duty: Modern Warfare 3*, éstos son videojuegos en los que compiten dos equipos. Normalmente los participantes de un equipo se marcan con el color rojo y los otros con el verde. Ambos colores, en la versión normal del videojuego, son brillantes, por lo que generaban confusión entre la población daltónica, de tal forma que se ha adaptado un modo para daltónicos, solucionando el problema con el cambio de los colores utilizados en el videojuego, imponiendo que el color de un equipo sea más oscuro y con sombreado alrededor y así diferenciar los participantes del mismo equipo del jugador de los del equipo contrario (Figura 6.2).



Figura 6.2. Izquierda: modalidad normal del videojuego Battlefield 3, el círculo rojo señala el color verde brillante utilizado para marcar un jugador. Derecha: modalidad adaptada para el daltonismo del videojuego Battlefield 3, el círculo rojo señala el color verde más apagado y con sombreado.

Como conclusión indicaremos que los resultados de este estudio indican que algunas de las personas con deficiencia en la visión del color tienen dificultades al realizar tareas. Estas tareas pueden ser tan básicas como ir a comprar ropa o comida, como identificar flores o ajustar el color en las fotografías. También pueden tener dificultades en el trabajo, ya sea al escoger una profesión –en algunos casos, por impedimento, no han podido formar parte del Cuerpo de Bomberos o de los *Mossos d'Esquadra*- o en el trabajo actual. La conducción también se ve afectada por estos individuos, ya que muchas de las señales de tráfico se rigen por el color. A la mayoría de los casos de este estudio no les preocupa en exceso esta anomalía de la visión del color y no piensan que suponga un grave problema para la vida diaria. Solucionan sus dificultades a su manera y, si no, se abstienen de realizar la tarea que les provoca la dificultad, sin demasiados quebraderos de cabeza. Sin embargo, existen personas muy afectadas por este defecto que se sienten frustradas por no poder ser del todo independientes.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Backhaus, W. G., Kliegl, R., & Werner, J. S. (1998). *Color Vision: perspectives from different disciplines*. Walter de Gruyter.
- Birch, J. (2001). *Diagnosis of Defective Colour Vision*. Butterworth Heinemann.
- Borràs, M., Castañé, M., Ondategui, J., Pacheco, M., Peris, E., Sánchez, E., Varón, C. (1999). *Optometría. Manual de exámenes clínicos*. Edicions UPC. Tercera edición.
- Capilla, P., Artigas, J., & Pujol, J. (2002). *Fundamentos de colorimetría*. Universitat de València.
- Castro, A., Romero, M., & Domínguez, M. (1992). Estudio epidemiológico de las discromatopsias congénitas en escolares. *Revista de la sanidad e higiene pública*, 66:5-6:273-279.
- Cole, B. (2004). The handicap of abnormal colour vision. *Clinical and Experimental Optometry*, 87:4-5:258-275.
- Curcio, C., Millican, L., Allen, K., & Kalina, R. (1993). Aging of the Human Photoreceptor Mosaic: Evidence for Selective Vulnerability of Rods in Central Retina. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 34:12:3278-3296.
- Dain, S. (2004). Clinical colour vision tests. *Clinical and Experimental Optometry*, 87:4-5:276-293.
- Dain, S., Rammohan, K., Benes, S., & King-Smith, E. (1990). Chromatic, Spatial, and Temporal Losses of Sensitivity in Multiple Sclerosis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 31:3:548-558.
- Dain, S., Wood, J., & Atchison, D. (2009). Sunglasses, Traffic Signals, and Color Vision Deficiencies. *Optometry and Vision Science*, 86:4:296-305.
- Diederich, N., Raman, R., Leurgans, S., & Goetz, C. (2002). Progressive worsening of spatial and chromatic processing deficits in Parkinson disease. *Archives of Neurology*, 59: 1249-1252.
- Eladi, J., & March, M. (2002). *Farmacología ocular*. Edición UPC. Segunda edición.
- Eperjesi, F., Fowler, C., & Evans, B. (2002). Do tinted lenses or filters improve visual performance in low vision? A review of the literature. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22: 68-77.
- Gegenfurtner, K., & Sharpe, L. (1999). *Color Vision: From Genes to Perception*. Cambridge University Press.
- Hofer, H., Carroll, J., Neitz, J., Neitz, M., & Williams, D. (2005). Organization of the Human Trichromatic Cone Mosaic. *The Journal of Neuroscience*, 25(42): 9669–9679.
- Hovis, J. (1997). Long Wavelength Pass Filters Designed for the Management of Color Vision Deficiencies. *Optometry and Vision Science*, 74:4:222-230.
- Hovis, J., & Neumann, P. (1995). Colorimetric Analyses of Various Light Sources for the D-15

- Color Vision Test. *Optometry & Vision Science*, 72:9:667-678.
- Kaiser, P., & Boynton, R. (1996). *Human Color Vision*. Optical Society of America.
- Kanski, J. J. (2006). *Oftalmología Clínica*. Elsevier. Quinta edición.
- Komáromy, A., Alexander, J., Rowlan, J., Garcia, M., Chiodo, V., Kaya, A., Tanaka, J., Acland, G., Hauswirth, W., Aguirre G. (2010). Gene therapy rescues cone function in congenital achromatopsia. *Human Molecular Genetics*, 19:13: 2581–2593.
- Logan, N., & Gilmartin, B. (2004). School vision screening, ages 5-16 years: the evidence-base for content, provision and efficacy. *Ophthalmic and Physiological Optics Research Group*, 24: 481-492.
- Luque, M., Fez, M. d., & Díez, M. (2001). Directrices para la administración y puntuación del test Farnsworth-Munsell de 100 tonos. *Ver y Oír*, 413-420.
- Malacara, D. (2002). *Color Vision and Colorimetry: theory and applications*. Spie-The International Society for Optical Engineering.
- Mancuso, K., Hauswirth, W., Li, Q., Connor, T., Kuchenbecker, J., Mauck, M., Neitz, J., Neitz, M. (2009). Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates. *National Institutes of Health Public Access*, 461(7265):784–787.
- Martin, P., & Grünert, U. (1999). Analysis of the Short Wavelength-Sensitive (“Blue”) Cone Mosaic in the Primate Retina: Comparison of New World and Old World Monkeys. *The Journal of Comparative Neurology*, 406:1–14.
- Mollon, J., & Cavonius, L. (2012). The Lagerlunda Collision and the Introduction of Color Vision Testing. *Elsevier*, 57:2:178-194.
- Oh, YS., Kim, JS., Chung, SW., Song, IU., Kim, YD., Kim, YI., Lee KS. (2011). Color vision in Parkinson's disease and essential tremor. *European Journal of Neurology*, 18:577-583.
- Ohta, N., & Robertson, A. (2005). *Colorimetry: fundamentals and applications*. Association with the Society for Imaging Science and Technology.
- O'Neill-Biba, M., Sivaprasad, S., Rodriguez-Carmona, M., Wolf, J., & Barbur, J. (2010). Loss of chromatic sensitivity in AMD and diabetes: a comparative study. *Ophthalmic and Physiological Optics. The Journal of the College of Optometrists*, 30:705-716.
- Oriowo, M., & Alotaibi, A. (2011). Chromagen lenses and abnormal colour perception. *The South African Optometrist*, 70(2):69-74.
- Pacheco, M., Sahraie, A., & Edgar, D. (1999). Acquired colour vision defects in glaucoma—their detection and clinical significance. *British Journal of Ophthalmology*, 83:1396–1402.
- Papaconstantinou, D., Georgalas, I., Kalantzis, G., Karmiris, E., Koutsandrea, C., Diagourtas, A., Ladas, I., Georgopoulos G. (2009). Acquired color vision and visual field defects in patients with ocular hypertension and early glaucoma. *Clinical Ophthalmology*, 3:251–257.
- Spalding, A. (2002). Doctors with Daltonism and the implications for counselling. *Optometry Today*, 23-25.
- Spalton, D. J., Hitchings, R. A., & Hunter, P. A. (2006). *Atlas de Oftalmología Clínica*. Madrid:

Elsevier España.

- Steward, J., & Cole, B. (1989). What do colour vision defectives say about every tasks? *Optometry & Vision Science*, 66:5:288-295.
- Suero, M., Pérez, Á., Díaz, F., Montanero, M., Pardo, P., Gil, J., Palomino, M. (2005). Does Daltonism influence young children's learning? *Elsevier*, 15:89-98.
- Tabassi, S., Sepanlou, S., & Lotfi, J. (2003). Acquired color vision deficiency in Parkinson's disease. *Acta Medica Iranica*, 41:3:143-146.
- Tagarelli, A., Piro, A., Tagarelli, G., Lantieri, P., Risso, D., & Olivieri, R. (2004). Colour blindness in everyday life and car driving. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 82:436-442.
- Torrents, A., Bofill, F., & Cardona, G. (2011). Suitability of school textbooks for 5 to 7 year old children with colour vision deficiencies. *Elsevier*, 21:607-612.
- Urtubia, C. (1996). *Neurobiología de la visión*. Edicions UPC.
- Weatherall, I., & Coombs, B. (1992). Skin color measurements in terms of CIELAB color space values. *The Society for Investigative of Dermatology*, 99:468-473.
- Whillans, M., & Allen, M. (1992). Color Defective Drivers and Safety. *Optometry and Vision Science*, 69:6:463-466.
- Young, R., Fishman, G., & Chen, F. (1980). Traumatically acquired color vision defect. *The Association for Research in Vision & Ophthalmology*, 19:5:545-549.
- Zahiruddin, K., Banu, S., Dharmarajan, R., Kulothungan, V., Vijayan, D., Raman, R., Sharma, T. (2010). Effect of Illumination on Colour Vision Testing with Farnsworth-Munsell 100 Hue Test: Customized Color Vision Booth versus Room Illumination. *The Korean Ophthalmological Society*, 24:3:159-162.



## ANEXOS

## CONSENTIMENT INFORMAT

El Departament d'Òptica i Optometria de la Universitat Politècnica de Catalunya dóna suport a la pràctica d'obtenir el consentiment informat dels participants en projectes d'investigació o en treballs docents.

Per tant, aquest informe té com objectiu ajudar-lo a decidir si vostè, Sr/a ....., participarà en el desenvolupament del present Treball Final de Màster, *Avaluació de les estratègies d'adaptació a disfuncions de la visió del color*, com a part del Màster en Optometria i Ciències de la Visió realitzat a la Facultat d'Òptica i Optometria de Terrassa.

Pla de treball del Treball Final de Màster:

- Dia 1:  
Examen optomètric abreujat (Agudesa Visual i Esteropsi) i examen de la visió del color sota dues il·luminacions diferents (llum incandescent i llum dia).
- Dia 2:  
Resposta a un breu qüestionari de qualitat de vida.

Li agrairíem la seva participació, tot i ser estrictament voluntària. Li assegurem que romandrà completament anònim i que els resultats seran identificats només mitjançant l'edat i el sexe del participant.

Agraïm el seu interès i cooperació.

Atentament,

Isaura Coca Torrents

Signatura del Participant

Data i lloc

**CUESTIONARIO PARA LA VISIÓN DEL COLOR**

Sexo:

Edad:

Marca con una "X" tu respuesta, si es necesario indica la solución que empleaste.

1. ¿A qué edad te diagnosticaron el defecto en la visión del color?

2. En la escuela, ¿tuviste dificultades en las tareas a causa de los colores?

NO

SÍ

Solución

3. ¿Has tenido dificultades en seleccionar los colores de la ropa, accesorios, coches, pinturas, muebles...?

NO

SÍ

Solución

4. ¿En trabajos artesanales y *hobbies*, has tenido problemas en distinguir los colores del material, cables, lana, videojuegos...?

NO

SÍ

Solución

5. ¿Te cuesta identificar plantas o flores a causa del color?

NO

SÍ

Solución

6. ¿Encuentras difícil leer un mapa?

NO   
SÍ

Solución

7. ¿Sabes distinguir cuándo la fruta o los vegetales están maduros por el color?

NO   
SÍ

Solución

8. ¿Sabes si la carne está cocida por su color?

NO   
SÍ

Solución

9. ¿En actividades deportivas, ya sea como espectador o como participante, tienes dificultades a causa del color?

NO   
SÍ

Solución

10. ¿Te cuesta ajustar el balance de color del televisor o retocar y ajustar las fotografías?

NO   
SÍ

Solución

11. ¿Sabes reconocer si la piel empieza a quemarse?

NO   
SÍ

Solución

12. ¿Has tomado la medicina equivocada a causa de las dificultades con el color?

NO   
SÍ

Solución

13. Tu defecto en la visión del color, ¿ha afectado al escoger una carrera?

NO   
SÍ

Solución

14. ¿Se te ha impedido algún trabajo a causa de este defecto?

NO   
SÍ

Solución

15. En tu trabajo actual, ¿tienes dificultades con el color?

NO   
SÍ

Solución

16. ¿Y en trabajos anteriores?

NO   
SÍ

Solución

17. ¿Has tenido dificultades en distinguir el color de las luces de las señales de tráfico?

NO   
SÍ

Solución

18. ¿Has confundido las luces de tráfico con las de la calle?

NO   
SÍ

Solución

19. ¿Encuentras que las luces de freno de otros coches son difíciles de ver?

NO   
SÍ

Solución

20. ¿Encuentras las luces de aviso o peligro temporales difíciles de ver?

NO   
SÍ

Solución

21. ¿Te cuesta ver las luces del panel de mandos del coche?

NO   
SÍ

Solución

**Comentarios personales:**