

Tests de visión cromática asistidos por computadora

Walter Sotil¹ y Nestor Calvo¹

¹ Cátedra de Computación Gráfica - Ingeniería en Informática - FICH - UNL

Palabras clave: discromatopsia, daltonismo, diagnóstico.

Resumen. En este trabajo se presentan algunas técnicas para el diagnóstico de la discromatopsia. A pesar que en los últimos años en el área de la oftalmología ha habido grandes avances tecnológicos, los tests de evaluación de la visión cromática continúan siendo una herramienta diagnóstica manejada en la mayoría de los centros de salud según la manera tradicional. Recientemente han surgido algunas alternativas informáticas en este campo, pero no lograron tener gran impacto. En el presente trabajo se describen algunas técnicas nuevas para efectuar el diagnóstico de disfunciones en la percepción del color asistidas por computadora. Se exploran los algoritmos, alcances y limitaciones de estas técnicas.

Introducción

En la realización de los tests clásicos para el diagnóstico de discromatopsia acontecen con frecuencia varios inconvenientes. Por un lado, la manipulación de las láminas pseudoisocromáticas hace que estas se puedan deteriorar con el uso repetido y que pierdan debido a ello la fiabilidad requerida para efectuar el test. En segundo lugar, el tiempo que usa el individuo en hacer la prueba, sumado al tiempo que emplea el profesional en analizar los errores cometidos, constituye una gran desventaja de estas pruebas cromáticas frente a la inmediatez de las modernas técnicas diagnósticas usadas en la evaluación de otros tipos de anomalías en el área oftalmológica, en las que todo el proceso se encuentra informatizado. Por último, la iluminación ambiente de la consulta sigue siendo una complicación importante, debido a que no siempre se dispone de la más adecuada, lo cual introduce un elemento perturbador para la correcta percepción de los tonos.

En este sentido, es indiscutible la necesidad de aplicar herramientas informáticas que minimicen estos inconvenientes y agilicen la obtención de los resultados. Las computadoras pueden ser usadas para interpretar con rapidez los tests realizados a la manera clásica, para realizar dichos tests sobre la misma pantalla de la computadora sin necesidad de emplear fichas ni láminas o, mejor aún, se podrían diseñar nuevos tests enfocados específicamente en obtener provecho de las computadoras.

1 Objetivos y métodos

En este trabajo se presentan algunas técnicas nuevas para efectuar el diagnóstico asistido por computadora de las disfunciones en la percepción del color.

El objetivo es que, mediante la ayuda del poder de cálculo de las computadoras actuales y el gran avance en hardware que ha habido, se logren minimizar los problemas surgidos en los tests realizados de manera clásica, disminuyendo el tiempo empleado en el diagnóstico y análisis de los resultados.

Se exploran los algoritmos, alcances y restricciones de estas nuevas técnicas.

Los desarrollos propuestos finalmente se incorporaron a una aplicación multiplataforma.

2 Conceptos preliminares

2.1 Color

Podemos asumir que hay dos definiciones de “color”, una cuantitativa o física y la otra subjetiva, que responde a la percepción de un humano.

Para la física, un color se forma mediante una mezcla de ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda, es una distribución o espectro $I(\lambda)$ de intensidades de energía luminosa en función de la longitud de onda. El ojo humano sólo percibe las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm. Las longitudes de onda “puras” corresponden a los colores del arcoíris, el resto de los colores se forman por mezcla.

El humano diferencia y clasifica los colores mediante nombres, que tienen una correspondencia con determinadas mezclas de longitudes de onda. En general, la mayoría de los humanos coincide, al menos en las denominaciones más usuales. El color percibido depende del contexto, como muestran algunas ilusiones ópticas, pero en general se puede asumir que un sujeto estándar en un contexto estándar identifica los colores con distribuciones de longitud de onda.

2.2 Sistema visual humano

Las células que absorben la luz en la retina del ojo humano son los conos y bastones. Por simplicidad, aunque no sea el cuadro exacto, se asumirá que los conos y bastones poseen pigmentos (opsinas) que filtran (absorben) selectivamente la luz incidente, de modo que se puede definir para cada uno una curva o espectro de transmitancia o transmisión porcentual. Los bastones se saturan con luz diurna y prácticamente no ejercen influencia en la percepción del color. Por su parte, los conos se dividen en tres grupos, y los conos de cada grupo pueden suponerse idénticos; un grupo se denomina B (blue) o S (short) tiene el pico de sensibilidad en los 420nm, otro G (green) o M (mid) en los 530nm y el grupo R (red) o L (large) en 558nm. Además, el medio ocular, entre la entrada de luz por la córnea y la llegada a la retina, tiene su propio espectro de absorción; por lo que, in-vivo, estos valores se corren hacia el rojo a 440, 545 y 565nm respectivamente. El pico de sensibilidad de los bastones in-vivo está alrededor de 498nm. Por otro lado, la distribución de estos tres tipos de conos (y de bastones) por la retina es altamente variable; por lo cual, cualquier análisis de sensibilidad global depende del campo visual.

En una simplificación fisiológica, se puede asumir que un pequeño conjunto de conos en una pequeña área de la retina envía al cerebro tres señales correspondientes a lo percibido por los tres tipos de conos y el cerebro interpreta esto como un determinado color. En realidad entran en juego otras células intermedias y el contexto, pero, como ya se dijo, será obviado en este análisis.

Esta es la razón por la cual el “espacio” de color percibido por el ojo humano estándar es tridimensional y se relaciona con antigua teoría tricromática de Young–Helmholtz (primera mitad del S IXX) que admite la posibilidad de utilizar rojo, verde y azul (R, G y B) como primarios, que al ser mezclados reproducen una amplia gama de colores. Pero enseguida se verá que este no es el cuadro completo.

En 1931 Wright–Guild realizaron un experimento que resultó clave para cuantificar las proporciones de R, G y B que se requieren para reproducir cada color visible. En campo visual dividido en dos presentaban un objeto o color de referencia en una mitad y tres luces R G y B mezcladas en la otra mitad. El observador debía ajustar las intensidades de las tres luces para reproducir el color. El resultado fue que la gran mayoría de los colores eran reproducibles, algunos no y otros, requerían el agregado de luz roja al campo de referencia para así sí poder ser reproducidos. Los datos fueron volcados en un espacio tridimensional estandarizado por la Commission internationale de l'éclairage (CIE) que, con ligeras modificaciones, aún se utiliza para cuantificar los colores.

El conjunto de colores que puede distinguir un ojo humano se agrupa en una zona de ese espacio tridimensional, que se representa normalmente mediante el diagrama de cromaticidad CIE. Los dispositivos de lectura electrónica (CCD o Charged Coupled Device de escáneres y cámaras digitales) no pueden captar todos los colores que el ojo humano es capaz de distinguir. A su vez, los dispositivos de reproducción (monitores,

displays, proyectores, impresoras) tampoco pueden reproducirlos todos. Cada dispositivo sólo es capaz de reproducir una parte o subconjunto de la gama de colores que el ojo humano es capaz de ver, cada dispositivo tiene un gamut o rango de colores reproducible.

El gamut de un determinado dispositivo cubre una zona determinada del gamut del ojo humano estandarizado. En tal sentido, cualquier representación gráfica del diagrama CIE completo es falsa, pues el monitor o el papel en el cual está impreso, no puede reproducir todos los colores identificables por el ojo, por lo tanto la figura es solamente indicativa de donde se encuentran los colores.

En la figura de abajo, cada uno de los triángulos blancos dentro del diagrama de cromaticidad indica los colores que dos monitores distintos son capaces de reproducir.

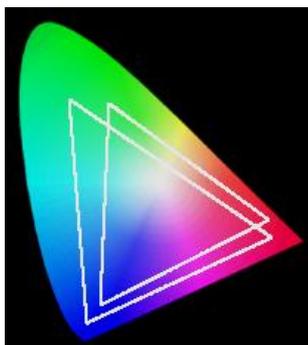


Fig. 1. Gamuts de dos monitores diferentes.

Siendo el espacio de colores de la física de dimensión infinita (distribución) mientras que el percibido es tridimensional, existirán distintas distribuciones que se perciben del mismo modos, estas se denominan metámeros, diferentes colores físicos que se presentan al humano como el mismo color.

2.3 Discromatopsia y daltonismo

La discromatopsia es una alteración en el mecanismo antes descrito para la visión de los colores. Puede ser congénita, como en el daltonismo, o adquirida, debido por ejemplo a enfermedades del nervio óptico o a alteraciones cromáticas que se pueden producir a partir de cierta edad.

El daltonismo es un defecto genético que provoca dificultad para distinguir los colores. El nivel de afectación es bastante variable y puede ir desde la acromatopsia o incapacidad para discernir cualquier color, visualizando sólo tonos de gris, hasta un ligero grado de dificultad para distinguir algunos matices de rojo, verde o azul.

Contrariamente a lo que se supone generalmente, esta anomalía genera problemas para los afectados en muy diversos ámbitos, por ejemplo: al discriminar el grado de madurez de determinados alimentos, al identificar códigos de colores de planos, al interpretar gráficos con diversas combinaciones de colores en los libros (El color en el material escolar, Bofill Gracià, pag 41), o al elegir determinadas profesiones para las que es preciso superar un reconocimiento médico que implica identificar correctamente los colores (aviación, marina). Es por ello que los tests de diagnóstico de discromatopsia continúan siendo imprescindibles las pruebas de acceso a muchas profesiones, o simplemente para la confirmación de su presencia en individuos que así lo solicitan. En los niños, la detección precoz de las alteraciones de la visión cromática puede ser determinante para evitar problemas que perjudicarían su desarrollo y educación, resaltando que gran parte de la información contenida en los libros de texto aparece codificada en color, lo que dificulta el aprendizaje, y finalmente, la educación de los niños con alteraciones cromáticas.

Las alteraciones genéticas que provocan modificaciones en los pigmentos se denominan de acuerdo al tipo de cono envuelto (L,M,S → protos, deuteros, tritos) y a la severidad (anomalía o anopia); así, la deuteranomalía es la anomalía en la percepción provocada por un deficiencias en el pigmento M, la protanopia es la ausencia de pigmento L.

Los genes que codifican los pigmentos para los conos S y los bastones no tienen nada en particular, pero los que codifican los pigmentos para los M y L están juntos, uno después del otro en el cromosoma X. Para peor, estos dos genes tienen solamente 15 puntos (codones) diferentes, de los cuales solo 7 parecen estar envueltos en la transducción de la luz. Esto hace, en primer lugar, que la proporción de alteraciones sea muy común, pero por otro, que así resulte sólo en la población masculina, que, en una proporción aproximada al 8% (uno de cada 12 individuos) confunden en algún grado los colores en el rango de los conos M y L, es decir rojo - verde. (Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness, Sharpe, pag 28).

En el siguiente gráfico se puede visualizar un árbol genealógico, que indica el modo de herencia del daltonismo, que se encuentra relacionado con los tres cromosomas X de ambos padres. Allí se aprecian dos características intrínsecas al modo de herencia: por un lado, como se mencionó, la alteración es mucho más habitual en hombres, y por otro lado, a menos que haya una mujer portadora, puede saltarse una generación antes de volver a manifestarse. (Uso de Términos de Color Básicos en Daltónicos Dicrómatas y Personas de Edad Avanzada, Moreira). En círculos se indican las mujeres y en cuadrados los hombres, mientras que la manifestación de la anomalía se muestra con el color negro, y el color gris caracteriza a las mujeres portadoras de la afección. Xn indica un cromosoma normal mientras que Xp indica uno portador de anomalías.

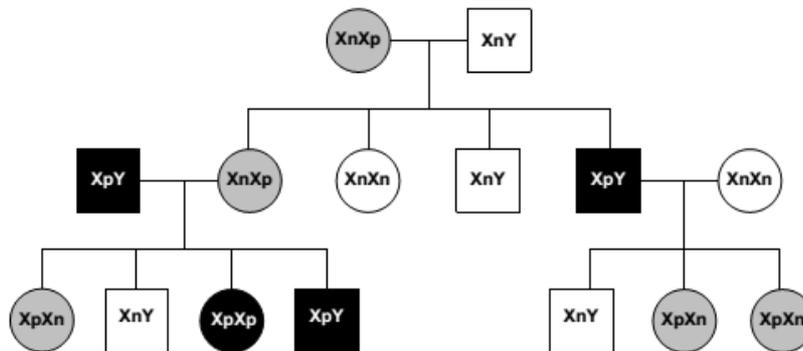


Fig. 2. Árbol genealógico que muestra el modo de herencia de las alteraciones de la visión del color relacionadas al cromosoma X. Círculos: mujeres, cuadrados: hombres. El color negro muestra la manifestación de la anomalía, el gris señala a las mujeres portadoras de la afección. Xn / Xp = Cromosoma X normal / portador de anomalías.

Para identificar los colores percibidos por los daltónicos, es necesario determinar el conjunto de estimulaciones metaméricas, esto es: productoras de la misma experiencia de color a pesar de ser físicamente diferentes. Así un daltónico podría indicar que para él son del mismo color, y por tanto metaméricos, los estímulos lumínicos que normalmente recibirían las denominaciones de verdoso, amarillento y rojizo. Para este individuo algunos de estos estímulos producirían la misma sensación.

De acuerdo a lo anterior, existen distintos tipos de daltonismo, pudiéndose establecerse una distinción entre los casos más graves (dicromáticos) y los que no lo son (tricromáticos anómalos). Entre los primeros la causa más común del problema sería la ausencia en retina de uno de los tres tipos de conos o la identificación de dos tipos en uno solo por falta de diferenciación de las opsinas correspondientes, utilizándose el sufijo "anopia" para indicar este hecho en las denominaciones técnicas. Por ello, si se considera como primer tipo de cono al que es especialmente sensible a las longitudes de onda largas y como segundo al que lo es a las medias, parece adecuado denominar protanopia y deutanopia a los tipos de daltonismo derivados de la ausencia del primer y segundo tipo de cono puesto que, en griego, proto y deuta significan primero y segundo. Por otro lado, se encuentra la tritanopia, que es una condición muy poco frecuente en la que están ausentes los fotorreceptores de la retina para el color azul. Indudablemente, la ausencia de uno de estos tipos de conos debe conducir a que se experimente un número mucho mayor de metaméros de lo que es normal, debido a que es más fácil conseguir que dos estimulaciones afecten de la misma manera a dos (lo que sucede en los dicromáticos) que a tres (lo que sucede en los tricromáticos anómalos) tipos de conos. Esta sería la razón por la que un sujeto daltónico percibiría como semejantes o metaméricas estimulaciones que en un individuo tricromático común darían lugar

a experiencias de color nítidamente diferenciadas (Tida: un test infantil para evaluar las disfunciones en la percepción del color, Lillo).

Las denominaciones más comúnmente utilizadas para referirse a los daltonismos atenuados son las de protanomalia y deutanomalia, pudiendo por ello deducirse que la causa de estos problemas es la existencia de algún tipo de problema o anomalía relacionado con el primer (prota) o segundo (deuta) tipo de cono. Las mediciones microespectrofotométricas efectuadas (New observations concerning red-green color defects, Pokorny, Smith) han mostrado que la causa de este tipo de alteraciones reside en el incremento del grado de superposición existente entre las curvas de respuesta espectral de protoconos y deutaconos.

A modo de síntesis, se puede decir que los dicrómatas se clasifican en protanopes, deuteranopes y tritanopes, mientras que los tricrómatas anómalos se dividen en protanómalo, deuteranómalo y tritanómalo.

2.4 Las líneas de confusión

Como se mencionó, un dicrómatas confunde algunos colores que un tricrómatas sin anomalías puede distinguir. Enfocándonos en el diagrama de cromaticidad CIE xy, se denomina línea de confusión al lugar geométrico definido por diferentes estímulos que, mediante ajustes en su luminancia, pueden ser igualados a uno dado por un observador dicrómatas. Estas son líneas de cromaticidad constante para un dicrómatas. Por lo tanto, el hecho de que dos puntos (estímulos) caigan sobre una determinada línea de confusión implica que, ajustando la luminancia, son indiscernibles para el sujeto con visión defectiva del color. Para explicar el necesario ajuste de luminancia, cabe destacar que la luminancia total es integral de las intensidades en el espectro de luz recibida; dado que un dicrómatas recibe distinta distribución, la intensidad total no será la misma que para un tricrómatas estándar. Siendo que el diagrama CIE xy está construido a intensidad constante para un tricrómatas estándar, se hace necesario el ajuste de intensidad para definir las líneas de confusión.

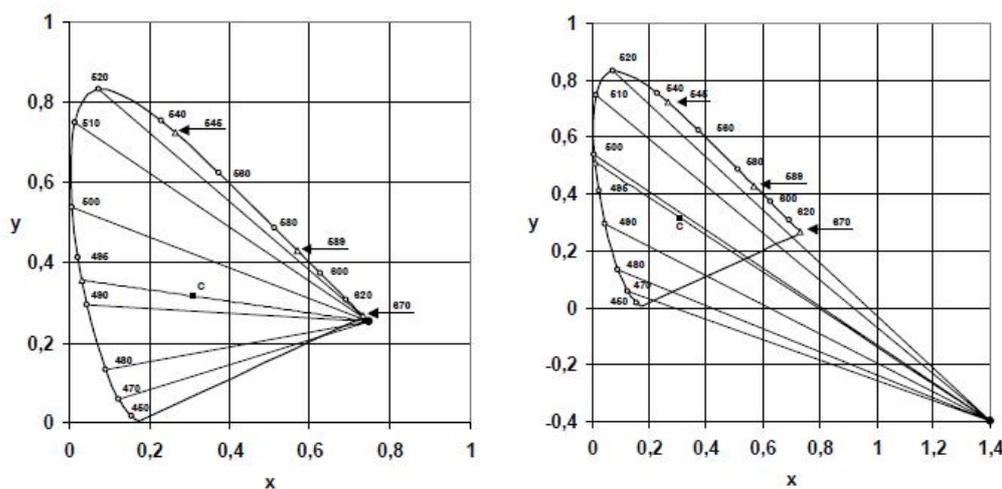


Fig. 3. Líneas de confusión representadas en el diagrama de diagrama de cromaticidad CIE xy1931. Izquierda: Líneas de confusión protanope. Derecha: Líneas de confusión deutanope (Uso de Términos de Color Básicos en Daltónicos Dicrómatas y Personas de Edad Avanzada, Moreira).

En la figura 3 se representan gráficamente el diagrama de cromaticidad CIE xy1931, y las diferentes líneas de confusión para los estímulos espectrales de 470, 480, 490, 500, 510 y 520 nm.

En el caso de los observadores tricrómatas anómalos, su reducción en la discriminabilidad cromática sigue siendo caracterizable en términos de líneas de confusión. Mientras que las confusiones de los dicrómatas se extienden a lo largo de toda la línea, las de los tricrómatas anómalos sólo se extienden a lo largo de parte de esta línea, estando la magnitud de dicha extensión directamente relacionada con la gravedad de la alteración (Uso de Términos de Color Básicos en Daltónicos Dicrómatas y Personas de Edad Avanzada, Moreira).

Cada conjunto de líneas de confusión protán, deután y tritán converge en puntos denominados puntos de confusión o copuntuales. La localización exacta de dichos puntos en el diagrama de cromaticidad CIE xy1931

no es conocida, pudiendo cambiar levemente de unos individuos a otros, habiéndose propuesto y usado diversos valores en la literatura, en particular para el punto de confusión deután (Problemas de aprendizaje derivados de la visión defectiva del color: un ejemplo práctico, Melgosa, pag 717). En el presente trabajo usaremos las posiciones dadas por Smith y Pokorny en 1975 para los puntos de confusión protán y deután: $x_p=0.7465$, $y_p=0,2535$; $x_d=1.4$, $y_d=-0,4$.

2.5 Diagnósticos de discromatopsia tradicionales

Se dispone de varios métodos para evaluar la visión cromática, siendo el más utilizado las láminas pseudoisocromáticas de Ishihara. Consiste en una serie de 38 láminas, donde cada una posee puntos coloreados de tamaño e intensidad variable que delimitan números o líneas que el ojo normal distingue, pero el patológico no, ya que los ve del mismo color. En los niños y analfabetos se solicita acompañar con un pincel la trayectoria dibujada. Este test permite determinar si el individuo posee discromatopsia.

Otros métodos utilizan los tests de ordenamiento, en donde la tarea que debe realizar el individuo consiste en disponer un conjunto de muestras coloreadas según un determinado criterio (por ejemplo, ordenarlas por tonos o por colorido). Lo más usual es elegir algunos de los colores a lo largo de las líneas de confusión de los dicrómatas, con el objeto de facilitar la clasificación de los sujetos. Dentro de este grupo de tests, los más utilizados son el Farnsworth-Munsell, en sus versiones de 15 (D-15), 28 tonos (FM28-Hue) y de 85 tonos (FM100-Hue). La prueba resulta más difícil que el test de Ishihara, pero también presenta mayor capacidad diagnóstica.

El test FM100-Hue permite distinguir entre anomalías del tipo protán, deután y tritán, es decir que tiene un elevado poder diagnóstico. La fiabilidad de los resultados obtenidos con el test FM100-Hue depende de su correcta administración y puntuación, lo que conlleva a un especial entrenamiento del profesional que efectúa el test y es una prueba compleja para el sujeto explorado que además requiere mucho tiempo para su realización. Este test permite clasificar los defectos congénitos y su severidad debido a que cada una de las tres formas de discromatopsia produce fallo específico.

El anomaloscopio Nagel es el más poderoso de los métodos diagnósticos. Es un aparato diseñado para la evaluación clínica de los individuos con alteraciones de la visión del color, que utiliza colores espectrales obtenidos mediante prismas que descomponen la luz blanca. El usuario debe comparar diversos tonos. Se trata de un dispositivo muy preciso que permite apreciar si existe déficit en la visión del color y su gravedad. Es el único método que hace posible distinguir a un dicrómata de un tricrómata anómalo. Sin embargo su empleo está restringido por el elevado costo debido a la complejidad de sus mecanismos internos; solo está disponible en algunos laboratorios de investigación, no siendo viable su uso en la práctica optométrica diaria.

El Anomaloscopio Nagel Tipo I presenta al observador un campo amarillo (589nm) que debe igualar (match) mediante la mezcla de rojo (679nm) y verde (544nm) (Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness, Sharpe, pag 26). Tiene dos controles, uno permite variar la cantidad de luz amarilla y el segundo ajusta la proporción de luz roja a verde, es decir, hay dos variables: la intensidad del amarillo y la proporción rojo/verde.

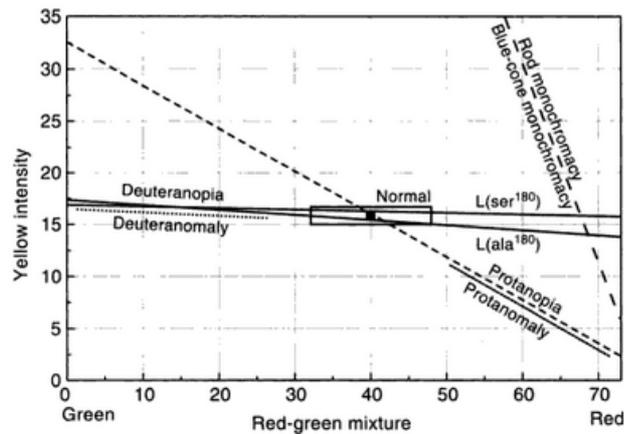


Fig. 4. Diferentes anomalías tipificadas en un Anomaloscopio Nagel Tipo I (Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness, Sharpe).

En el test, la mayoría de los tricromatas sin anomalías eligen el mismo valor relativo para cada intensidad de amarillo, con muy ligeras variaciones. Los individuos con deuteranomalía definen proporciones con mayor contenido de rojo, pero en forma más o menos independiente de la luminosidad. Los individuos con protanomalía, en cambio, aumentan la proporción de verde con la luminosidad. Como regla, la deuteranomalía requiere mucho rojo, tanto más cuanto más oscuro, la protanomalía requiere más verde, pero en proporción independiente de la intensidad. En los resultados que se muestran abajo puede notarse como aumenta la imprecisión con la luminosidad llegando prácticamente a la anopia, es decir que da lo mismo cualquier combinación. Probablemente la ayuda de los bastones permitió discernir un poco mejor a baja intensidad.

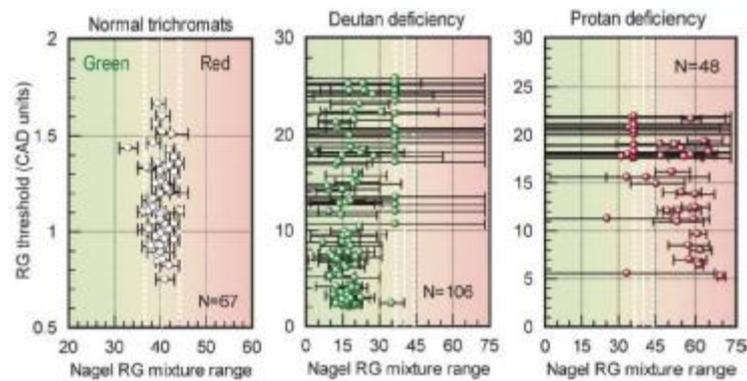


Fig. 5. Diferentes matches obtenidos en un Anomaloscopio Nagel Tipo I.

3 Pasos del procedimiento propuesto

A continuación se analizan algunas técnicas propuestas que se idearon. En 3.1 se presenta un test capaz de detectar la existencia de anomalías y en 3.2 uno que permite clasificar las discromatopsias.

3.1 Diagnóstico computarizado de la existencia de discromatopsia, basado en el anomaloscopio

La intención inicial de este algoritmo fue replicar en la pantalla de la computadora la funcionalidad del anomaloscopio, que, como ya se aclaró, solo existe en laboratorios especializados.

Las fuentes de luz del anomaloscopio generan distintos colores que barren diferentes zonas del diagrama de cromaticidad CIE, muchas de las cuales se corresponden con colores que no son reproducibles por un monitor estándar, ya que son exteriores al gamut del monitor. Por tal razón, se concluye que no es posible reproducir un anomaloscopio en el monitor de una computadora.

Al diseñar un software para test de discromatopsia, se deberán utilizar colores pertenecientes a un rango en la intersección común de los monitores estándar o displays de aparatos portátiles como celulares y otros. Para lograrlo utilizaremos colores variables sin llegar a los extremos del gamut estandarizado sRGB (Smartphone Color Gamuts).

Para poder realizar el test se adaptó el gamut del experimento a una zona factible para estos dispositivos, pero que provoque las confusiones que permitan diagnosticar la existencia de discromatopsia.

Al sujeto se le presentan dos campos, uno con un color fijo y el otro variable, recorriendo una zona perteneciente al cubo de color definido por el estándar sRGB (Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness, Sharpe). Se elige como color fijo un punto $(L,L,0)$ en la línea que va desde el vértice $R=G=B=0$ hasta el $R=G=1$ y $B=0$, es decir, entre el negro y el amarillo, pasando por el verde oliva. El sujeto debe intentar igualar ese color, teniendo para ello la posibilidad de alterar el color variable en el plano $B=0$.

En un principio también se incluyó para el campo fijo, el segmento que va desde el amarillo al blanco: $R=G=1$ y $B=0$ hasta el $R=G=B=1$, pero luego de evaluar la ineffectividad del test en este último tramo, se decidió descartarlo para reducir el tiempo de la prueba y simplificar la tarea de diagnóstico.

A nivel de diseño de la interfaz gráfica, se incorporaron dos semicírculos, uno izquierdo con una intensidad prefijada entre el negro y el amarillo $(L,L,0)$ y otro derecho con un color aleatorio $(R,G,0)$ que debe ser modificado por el usuario, con la finalidad de igualar el color del campo fijo. El error cometido se mide como una distancia euclídea en el plano RG.

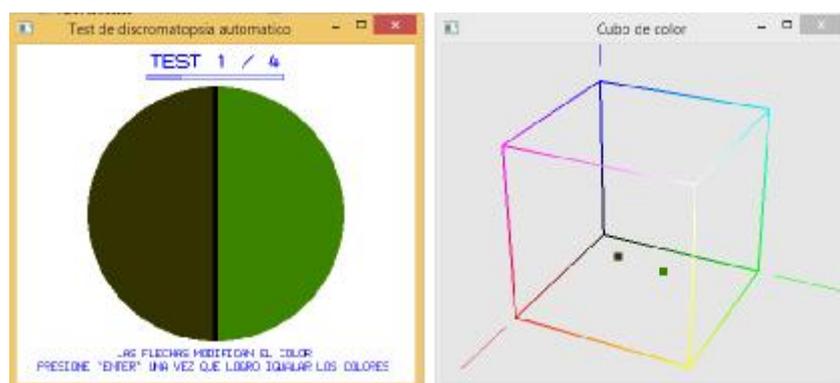


Fig. 6. Captura del primer test y su correspondencia en el cubo de color sRGB.

Un individuo sin anomalías cromáticas conseguirá un hacer coincidir el color de ambos semicírculos con error mínimo o nulo. En cambio, una persona con disfunciones en la percepción del color tendrá más de un matching, algunos de ellos con distancias excesivas.

Es posible resumir el proceso de test en el siguiente diagrama.

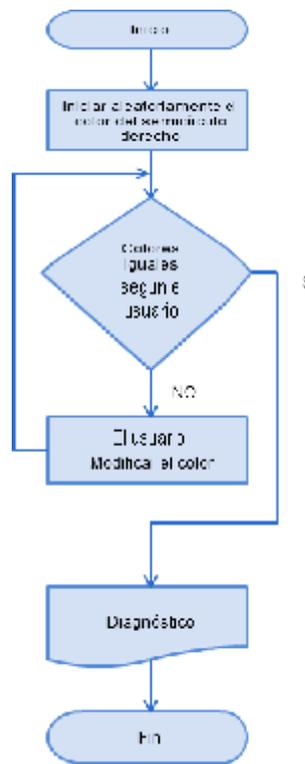


Fig. 7. Diagrama del software de Diagnóstico computarizado de la existencia de discromatopsia, basado en el anomaloscopio.

En lo concerniente al semicírculo izquierdo, de color prefijado, se definieron cuatro puntos de distinta luminosidad para realizar el test cuatro veces.

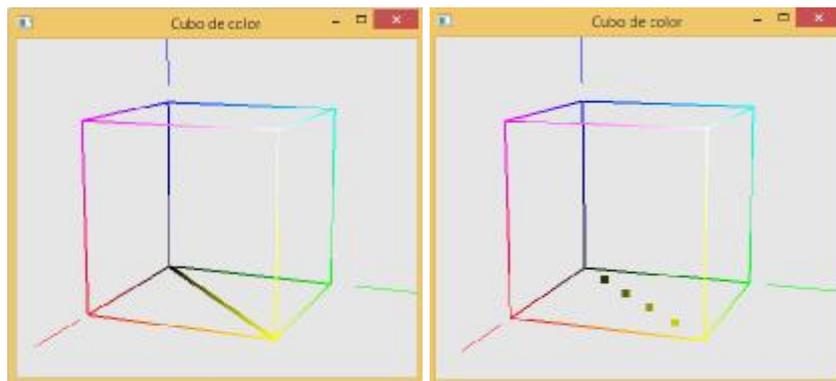


Fig. 8. Distintos puntos que varían la intensidad del amarillo correspondiente al semicírculo izquierdo, pertenecientes al segmento $R=G=B=0$ hasta el $R=G=1$ y $B=0$.

Dos figuras coloreadas yuxtapuestas se afectan simultáneamente; si sus colores son muy cercanos en luminosidad (valor) y dimensión cromática. La inclusión de una banda negra en medio de estas dos tonalidades acentúa la dificultad para distinguirlos, ya que actúa como barrera de separación y lo que prima entonces son sus cualidades análogas y no la leve diferencia que existe. Utilizando estos conceptos, se colocó una gruesa línea negra a modo de barrera entre ambos semicírculos, para aumentar la dificultad y así facilitar el diagnóstico.



Fig. 9. Inclusión de una banda negra en medio de estas dos tonalidades.

Al iniciar cada test, se obtiene aleatoriamente un color bien diferenciado del fijo y se asigna al semicírculo derecho que debe ser controlado por el usuario de la aplicación. De esta manera se garantiza que inicialmente los colores de ambos semicírculos se encuentren distantes en el cubo de color y en consecuencia, el recorrido necesario para llegar a igualar los colores de ambos semicírculos sea relativamente grande, favoreciendo la efectividad del test.

Una vez que a su criterio se encuentren igualados en color ambos semicírculos, se calcula la distancia entre el punto de color fijo y el de color variable seteado por el usuario. Si esa distancia entre los puntos de color es mínima o nula, se asume que el individuo no posee anomalías cromáticas. En cambio, una persona con disfunciones en la percepción del color obtendrá más de un matching, teniendo algunos de ellos distancias excesivas. Esto se debe a que en un individuo que posee anomalías cromáticas habrá distintas estimulaciones afectarán de la misma manera a los conos.

Dado que un sujeto con anomalías puede llegar casualmente a resultados casi correctos, al finalizar los cuatro tests, si alguno señala un error superior al 10% de la longitud de la arista del cubo de color RGB, se sugiere que se realice nuevamente el test, indicando que posiblemente posea discromatopsia.

3.2 Diagnóstico computarizado del tipo de discromatopsia, basado en las líneas de confusión

Con el algoritmo explicado en la sección anterior es posible discernir si el individuo posee discromatopsia.

El objetivo del algoritmo que a continuación se describe fue diseñar un test que permita clasificar el tipo de daltonismo entre anomalías del tipo protán o deután, donde se denominan protán a aquellos individuos que poseen protanopia o protanomalia, y deután a aquellos que poseen deutanopia o deutanomalia.

La estrategia que se plantea es desplazarse dentro del diagrama de cromaticidad CIE por distintos segmentos pertenecientes a las líneas de confusión protán y deután, teniendo la previsión que los tramos utilizados en el test se encuentren en zonas del diagrama de cromaticidad CIE que sean reproducibles por un monitor estándar, es decir que se hallen en el interior del Gamut del monitor estándar ofrecido en el mercado.

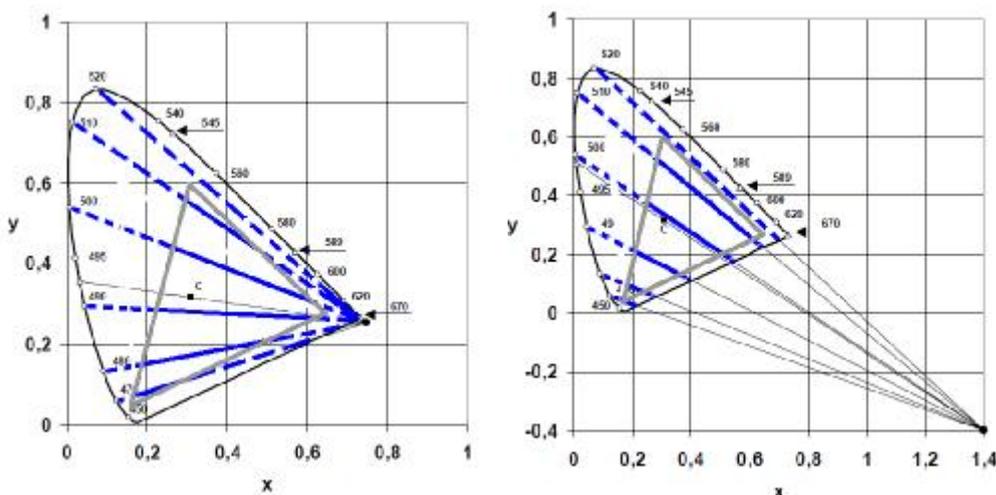


Fig. 10. Líneas de confusión protán y deután, remarcadas en el interior del Gamut del monitor estándar.

Como se mencionó anteriormente, para los puntos de confusión protán y deután utilizaremos las posiciones dadas por Smith y Pokorny: $\{x_p=0.7465, y_p=0, 2535\}$; $\{x_d=1.4, y_d=-0,4\}$.

En principio, se elige un punto cualquiera del diagrama de cromaticidad CIE y se altera el color, por distintos segmentos, hacia los puntos de confusión protán y deután. Se disponen dos círculos divididos como en el test anterior, cada uno tiene el color de partida en el campo izquierdo y el color variable en el derecho. El sujeto debe indicar el momento en que distingue alguno de los pares.

En lugar de utilizar cualquier color de partida, se adoptaron puntos pertenecientes a zonas donde existe mayor rango antes de que sea detectada la diferencia de colores en individuos con anomalías y a su vez que las líneas tengan mayor cruce angular para diferenciarlas mejor. Estudios realizados indican que la zona correspondiente al área azul del Gamut es la que garantiza mayor posibilidad de discernimiento en individuos con anomalías del tipo protán o deután (Specifying colours for colour vision testing using computer graphics, Toufeeq). Como puede verse en las siguientes figuras, esto se debe a que las líneas de confusión son más divergentes en esa zona que en las zonas roja y verde del diagrama.

El usuario realiza un cambio en ambos semicírculos en cada paso. La variación de color que primero sea detectada por el individuo indicará si posee anomalía tipo protán o deután.

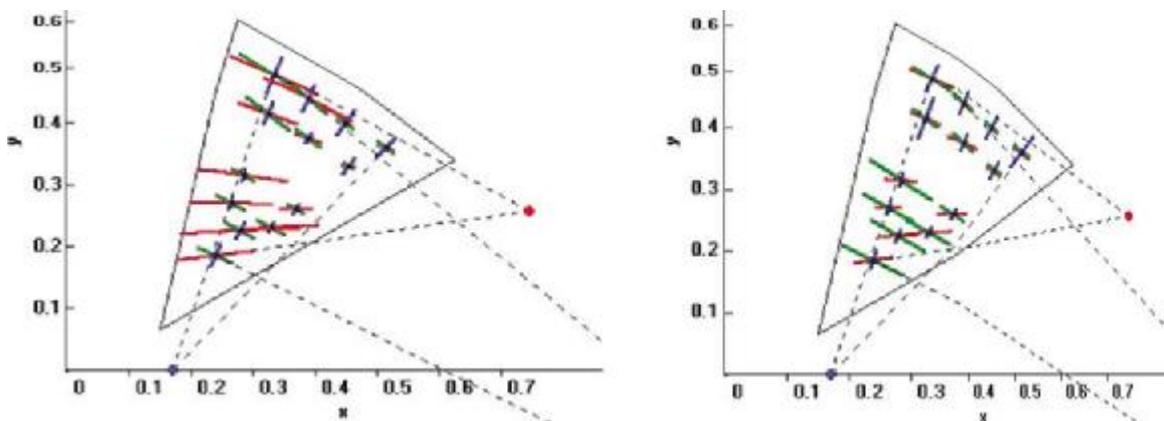


Fig. 11. El área azul del Gamut garantiza mayor posibilidad de discernimiento en individuos con anomalías del tipo protán o deután.

Por razones de simplicidad y practicidad, el test se diseñó utilizando tres puntos correspondientes al área azul del diagrama de cromaticidad CIE: $\{x=0.28, y=0.31\}$, $\{x=0.26, y=0.27\}$ y $\{x=0.25, y=0.25\}$. Es decir que el test posee tres instancias de análisis para el individuo que utiliza la aplicación.

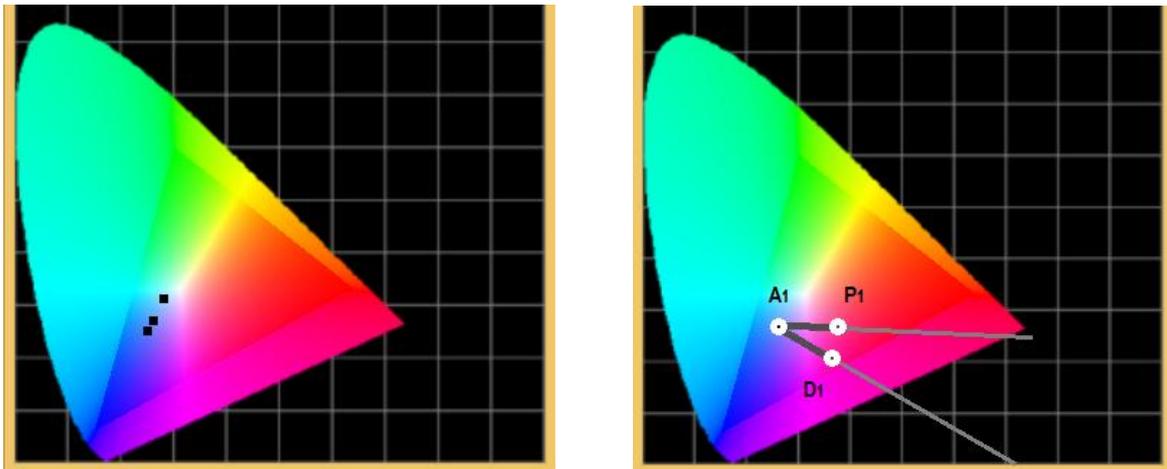


Fig. 12. Izquierda: tres puntos de partida pertenecientes al área azul del diagrama de cromaticidad CIE. Derecha: recorridos del campo variable protán y deután.

De esta manera, si iniciamos en el punto de partida A_1 , el sujeto con defecto protán detectará la variación de color producida en un punto del segmento A_1D_1 con mayor rapidez que una persona con defecto deután. En cambio, el sujeto con defecto deután detectará con mayor rapidez que una persona con defecto protán, la variación de color producida en el segmento A_1P_1 .

Podemos reducir el proceso de test al siguiente diagrama.

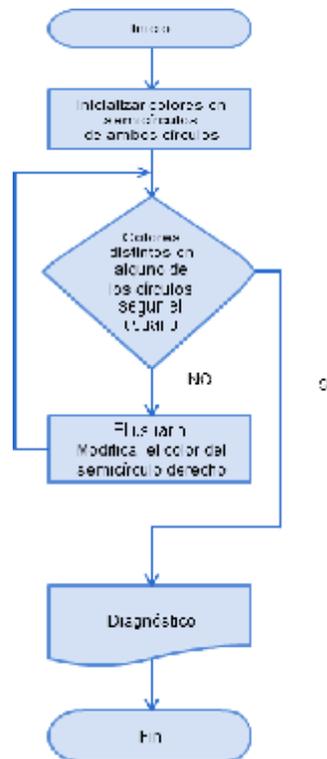


Fig. 13. Diagrama del Diagnóstico computarizado del tipo de discromatopsia, basado en las líneas de confusión.

Al finalizar los tres tests puede suceder que no todos ellos indiquen que el individuo posee la misma anomalía, es decir que alguno de los tres tests señale anomalía tipo protán y otro tipo deután. En esos casos se sugiere que se realice nuevamente el test, indicando que posiblemente posea discromatopsia con el tipo de anomalía que apareció con mayor frecuencia en los tres tests. Ello se puede deber a que los individuos que efectuaron el test poseen protanomalía o deutanomalía, y se puede suponer que la causa de este tipo de

alteraciones reside en el incremento del grado de superposición existente entre las curvas de respuesta espectral de protoconos y deutaconos.

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos luego de la implementación.

Diagnóstico computarizado de discromatopsia basado en el Anomaloscopio

A la aplicación se le incorporaron distintas pantallas indicando, entre otros, el objetivo del test, los controles a utilizar para realizarlo y el resultado obtenido.

Se observa a continuación la pantalla inicial, en la cual se especifica que la aplicación es un test de discromatopsia para detectar anomalías del tipo protán y deután.

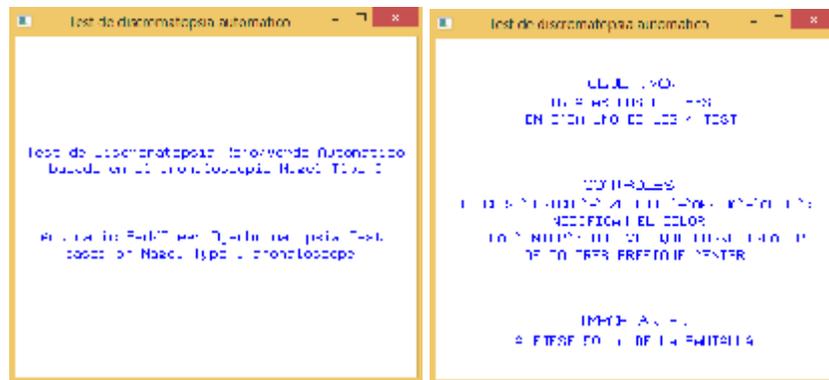
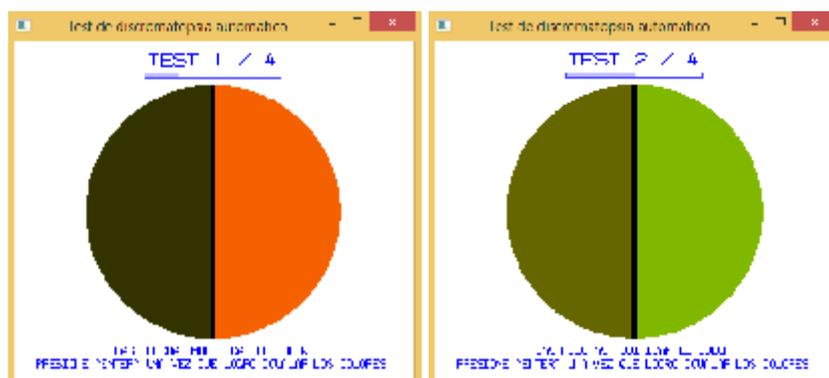


Fig. 14. Captura de la pantalla inicial y los controles de la aplicación.



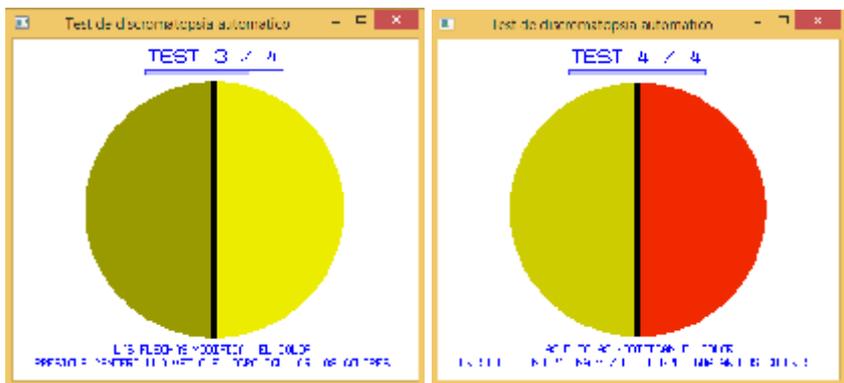


Fig. 15. Captura de los cuatro test. Sobre el semicírculo izquierdo se observa el color fijo, y en el semicírculo derecho se visualiza el color controlado por el usuario de la aplicación.

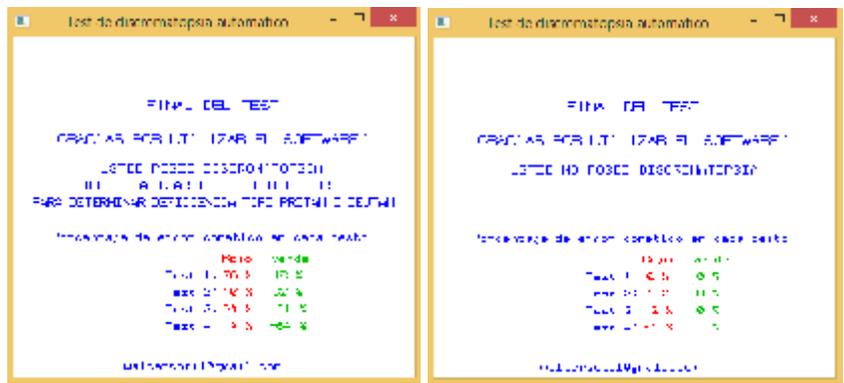


Fig. 16. Captura del resultado obtenido. A la izquierda se observa el resultado alcanzado por un individuo con dicromatopsia y a la derecha el resultado conseguido por un individuo sin anomalías.

Diagnóstico computarizado para determinar el tipo de dicromatopsia basado en las líneas de confusión

Al aplicativo se le incorporaron diferentes pantallas indicando, entre otros, el objetivo del test, los controles a utilizar para realizarlo y el resultado obtenido.

En la siguiente figura se puede visualizar la pantalla inicial, indicando que el aplicativo es un test que permite clasificar el tipo de dicromatopsia entre anomalías del tipo protán o deután.

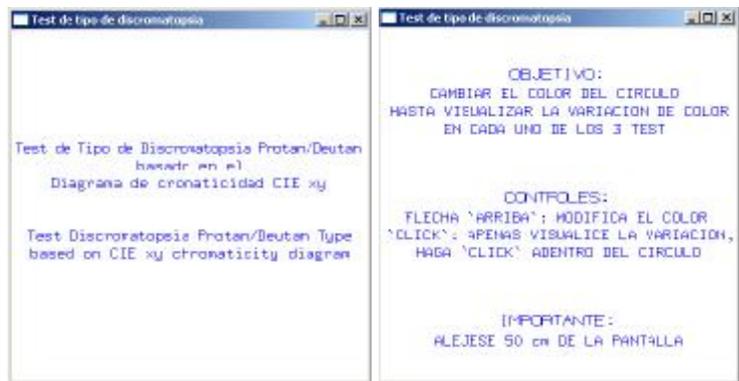


Fig. 17. Captura de la pantalla inicial y los controles de la aplicación.

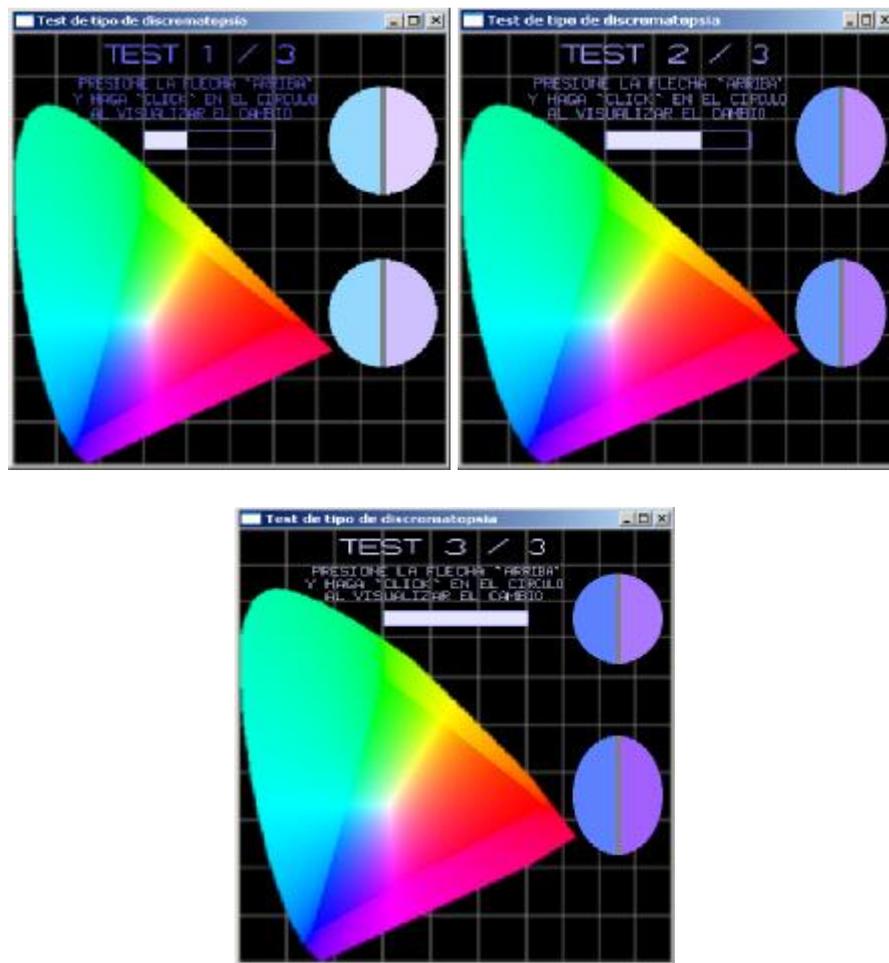


Fig. 18. Captura de los tres test. El usuario debe utilizar los controles del software para efectuar un cambio en los semicírculos derechos, superior e inferior en cada paso. La variación de color que primero sea detectada por el usuario indicará si posee anomalía tipo protán o deután.

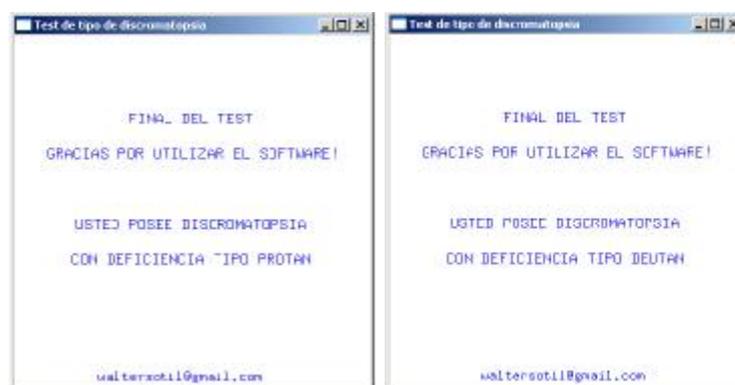


Fig. 19. Captura del resultado obtenido. A la izquierda se observa el resultado alcanzado por un individuo con anomalía del tipo protán y a la derecha con anomalía del tipo deután.

5 Conclusiones

Se lograron desarrollar dos tests, el primero de ellos permitiendo discernir si el individuo posee discromatopsia. El segundo de los tests diseñado permite clasificar el tipo de daltonismo entre anomalías del tipo protán o deután, con un alto nivel de eficacia principalmente en individuos dicrómatas protanopes y deuteranopes, y una eficacia variable en individuos tricrómatas anómalos protanómalos y deuteranómalos que depende directamente del grado de la anomalía o del nivel de superposición existente entre las curvas de respuesta espectral de protoconos y deutaconos.

Ambos tests pueden ser realizados en una computadora o teléfono estándar del mercado, aprovechando su creciente poder de cálculo y permitiendo que se logren disminuir los problemas surgidos en los tests realizados de manera clásica, reduciendo notablemente el tiempo empleado en el diagnóstico y análisis de los resultados.

6 Trabajos futuros

Se pretende desarrollar una herramienta integradora para plataformas móviles, que posibilite en primer término realizar el test y luego permita utilizar la cámara para indicar a tiempo real, de forma no invasiva, las zonas conflictivas o con colores metámeros en base al resultado arrojado por el test previo.

Se realizará la presentación del software desarrollado ante la Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT) para solicitar la validación clínica, que posibilite su utilización en organizaciones que necesiten realizar el diagnóstico de discromatopsia y/o su posterior clasificación.

Referencias

1. Bofill Gracià, F., Torrents Gómez, A., El color en el material escolar. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, España (2010)
2. Itten, J., Arte del color, Editorial Bouret (1961)
3. Lillo, J., Tida: un test infantil para evaluar las disfunciones en la percepción del color, *Psicología educativa*, ISSN 1135-755X (1997)
4. Melgosa, M. Problemas de aprendizaje derivados de la visión defectiva del color: un ejemplo práctico. *Revista de Educación* (2006)
5. Moreira, H., Lillo, J., Búsqueda de prototipos en dicrómatas R-V: capacidad predictiva de dos modelos, Congreso Nacional del Color, ISSN 978-84-9717-144-1 (2010)
6. Moreira, H., Uso de Términos de Color Básicos en Daltónicos Dicrómatas y Personas de Edad Avanzada. Tesis doctoral, Facultad de Psicología, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España (2011)
7. Pokorny, J., Smith, V., New observations concerning red-green color defects (1982)
8. Sharpe, Stockman, Jägle, Nathans, Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In: Gegenfurtner KR, Sharpe LT, eds. *Color Vision, from Genes to Perception*. Cambridge, Cambridge University Press, Inglaterra (1999)
9. Smartphone Color Gamuts. http://www.displaymate.com/Gamut_1.html. Fecha de consulta 01/05/2015
10. Toufееq, A., Specifying colours for colour vision testing using computer graphics (2004)