

Respuestas pupilares a estímulos cromáticos en el espectro de 400 nm a 650 nm, en el estado estable

D. Rodríguez Guzmán, A. Zúñiga López y E. Suaste Gómez
CINVESTAV – IPN, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Bioelectrónica
Av. IPN #2508 Col. San Pedro Zacatenco, 07360,
e-mail: esuaste@mail.cinvestav.mx

Recibido el 11 de junio de 2004; aceptado el 17 de marzo de 2005

Se diseñó e implementó una metodología instrumental para el análisis de las variaciones de respuestas pupilares a estímulos cromáticos en el proceso de contracción y dilatación. Para ello, se utilizaron estímulos visuales en el espectro visible de 400 nm a 650 nm. Para obtener una respuesta pupilar contrastada se utilizaron tres diferentes programas de estimulación diseñados en nuestro laboratorio PG0, PG12 y PG20. El estudio se realizó a 39 personas (29 hombres, 9 mujeres y un niño, de 22-52 y 6 años), 10 con el estimulador PG0, 21 con PG12 y 16 con PG20, 6 de los sujetos participaron en más de una prueba. Previamente, se presentaron las personas analizadas de acuerdo a las cartas de Ishihara 37, tienen visión normal a los colores, un sujeto sufre deuteranopía (ceguera al verde) y protanopia (ceguera al rojo), mientras que otro padece diabetes mellitus.

Descriptores: Respuesta pupilar; estímulo cromático; estado estable; redilatación pupilar; video-oculografía.

an instrumental methodology was implemented to analyze the pupillary responses in the dilation and contraction process elicited by chromatic stimulus. Chromatic stimuli were employed in the visible spectrum from 400 nm to 650 nm. Three different stimulation software was developed and used in order to obtain a contrasted pupillary response PG0, PG12 and PG20. This test was applied to 39 subjects (29 male, 9 female and 1 child, 22-52 years and 6 years), 10 of them were stimulated with PG0, 21 were stimulated with PG12 and 16 with PG20. 6 subjects participate at least in 2 tests. Ishihara plates were exhibited to the subjects before the stimulation, 37 of the present a normal vision color, 1 present deuteranopy.

Keywords: Pupillary response; chromatic stimulus; stable state; pupillary redilation; video-oculography.

PACS: 87.57.-s; 87.57.Ce; 87.57.Gg; 87.57.Nk; 87.57.Ra

1. Antecedentes

El órgano encargado de recibir y transmitir la información del medio ambiente en forma de luz es el ojo. El sistema visual permite la percepción del espacio tridimensional. Entre las principales funciones de este sistema se encuentran: el de adaptarse rápidamente a los cambios de luz, percibir a distancias considerables estímulos luminosos, percibir detalles diminutos, discriminar una gran número de tonalidades, focalizar un objeto mientras el cuerpo se mueve, o captar objetos en movimiento, etc.

La pupila varía su contorno en función del nivel de iluminación, entre 2 y 8 mm en función del nivel de iluminación, ante una luz brillante se contrae y se dilata en la oscuridad. Además del nivel luminoso el diámetro de la pupila varía debido a otros factores, por ejemplo, al observar objetos próximos y lejanos, por la edad del sujeto, debido a agentes farmacológicos y a las emociones [1]. Por otro lado, el parpadeo y el acomodamiento [2]. Así mismo, el tamaño de la pupila está gobernada por el sistema simpático y parasimpático [3], como una respuesta a estímulos emocionales intensos, pudiendo variar según la actividad mental.

La pupila regula la cantidad de luz que incide en la retina, donde se encuentran las células sensoriales: los conos y los bastones. Los conos encargados de diferenciar las longitudes de onda (colores) se encuentran en la parte central o fovea; y los bastones, responsables de la visión nocturna están situados a los lados de la fovea. La visión nocturna, de

la penumbra o crepuscular, está a cargo de la retina periférica y se conoce como visión escotópica; su poder de discriminación, medido como agudeza visual, corresponde a 1/10 de la visión fotópica (visión de los colores).

La visión de color tricrómica está compuesta por tres tipos de receptores con diferente sensibilidad espectral para los colores principales: rojo, verde y azul. Las alteraciones de alguno o de todos producen anomalías o falta de visión de los colores [2]. Dando origen a *acromatopsias* (falta de visión de los colores), o *discromatopsias* (cegueras parciales a los colores), protánopes (al rojo), deuteránopes (al verde) y triptánopes (al azul). De igual forma se destacan las alteraciones *congénitas* (rojo/verde o daltonismo) o *adquiridas* (por lo general no se percibe el azul/amarillo). En el caso de la protanopia el rango visible del espectro es más corto hacia el extremo rojo comparado con el del normal, mientras que en el espectro azul-verde del normal se aprecia como gris. Para la deuteranopia la parte del espectro normal del verde se percibe como gris, y el púrpura-rojo (color complementario del verde) también aparece como gris [4].

Para estudiar las anomalías del color se han diseñado múltiples pruebas. Una de ellas son las láminas pseudoisocromáticas de Ishihara, éstas agrupan series de puntos de diferentes colores, de tal forma que las personas normales ven dibujado un número específico, mientras que los que tienen problemas de colores ven un número diferente [5].

Una función importante del ojo es su capacidad para adaptarse a distintos grados de iluminación [6]. La entrada de

luz está regulada por la pupila, que puede producir midriasis (para aumentar la entrada de luz) o miosis (para disminuirla), pero la adaptación a la iluminación tiene lugar fundamentalmente en los fotorreceptores. Sabemos que los bastones tienen un umbral bajo de excitación y que en su mayoría se encuentran en la retina periférica para encargarse de la visión periférica. La medida de la adaptación oscila entre los 30 y 40 segundos.

La cantidad de luz que incide por unidad de tiempo es proporcional al área de la pupila [7]. Los reflejos pupilares a la luz más importantes son: reflejo directo o fotomotor, reflejo consensual y reflejo de la acomodación-convergencia, los cuales, provocan cambios en el tamaño de la pupila. Si la luz se proyecta principalmente a un ojo, la pupila de ese ojo se contrae más (reflejo directo a la luz), mientras que la pupila del otro ojo se muestra un grado de contracción menor, éste es el reflejo consensual a la luz [8].

El desarrollo de esta metodología instrumental capaz de estudiar las respuestas pupilares a los colores, nos permitirá llevar a cabo evaluaciones cuantitativas de patologías asociadas a la percepción visual cromática tales como la diabetes *mellitus* (primera causa de mortalidad en México, con información de la base de datos de la INEGI/Secretaría de salud, CONAPO 2002).

2. Metodología

El estudio consiste en la adquisición de las respuestas pupilares a estímulos cromáticos (RPC) en condiciones fotopicas, mediante la técnica de video-oculografía (VOG). En el procesamiento digital de las imágenes se analiza cada uno de los cuadros del video registrado para cada una de las RPC debidas a las diferentes longitudes de onda (λ). El diámetro pupilar se mide cuando la respuesta de la pupila se encuentra en el estado estable, es decir, una vez que se ha presentado la latencia [9] y la respuesta transitoria [10], aproximadamente después de tres segundos de la estimulación.

El sistema propuesto para el despliegue de los estímulos cromáticos y la adquisición de las RPC lo conforma un instrumento original diseñado, construido e implementado por nuestro grupo de trabajo que se ha denominado Pupilocromatógrafo (Fig. 1), éste está constituido por tres secciones:

- 1) *Sección del especialista*: formada por una PC, encargada de desplegar tres diferentes estímulos cromáticos, un monitor de referencia para observar el ojo del sujeto durante el estudio.
- 2) *Sección del sujeto bajo estudio*: un monitor de estimulación previamente caracterizado en su luminancia colocado a 30 cm del ojo del sujeto y un soporte oftalmológico para mantener fija la cabeza del sujeto durante el estudio.
- 3) *Sistema de video-oculografía* (video grabadora y cámara de video) compartido en ambas secciones para registrar las RPC en video y posteriormente analizarlas.

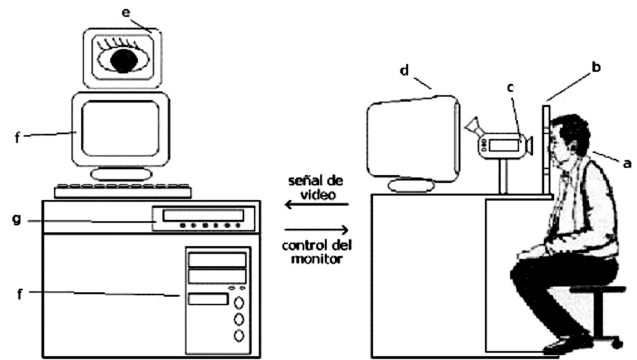


FIGURA 1. Sistema de análisis de la respuesta pupilar cromática. (a) sujeto bajo estudio, (b) soporte oftalmológico, (c) cámara de video, (d) monitor de estimulación, (e) monitor de referencia, (f) PC, (g) video grabadora.

Con la finalidad de determinar la estimulación óptima que permita una mejor y contrastada respuesta pupilar con fines de diagnóstico en la percepción visual a los colores, se diseñaron y utilizaron tres diferentes programas de estimulación diseñados en nuestro laboratorio PG0, PG12 y PG20.

Los estímulos consisten en la exhibición de pantallas completas de color en el monitor de una PC de diferentes λ en el espectro visible de 400nm a 650nm, es decir, en los colores violeta (400-430 nm), azul (430-480 nm), azul verdoso (480-490 nm), verde azulado (490-500 nm), verde (500-510 nm), verde amarillento (510-560 nm), verde amarillo (560-570 nm), amarillo (570-580 nm), naranja (580-590 nm), naranja rojizo (590-620nm) y rojo (620-650 nm). Estas fueron calculadas y normalizadas en sus componentes RGB [11,12] (Red, Green, Blue) de acuerdo a las coordenadas estándar de iluminación de la Commission Internationale de L'éclairage (CIE 1978) [1]. La Tabla I exhibe los valores tricromáticos RGB para cada una de las longitudes de onda calculadas. En el primer programa "PG0", se despliegan consecutivamente las diferentes pantallas de colores durante de 6 s cada una, iniciando en 400 nm con incrementos de 10nm hasta llegar a 650 nm. En el segundo programa "PG12", de igual forma se exhiben pantallas con las mismas características de λ , con la diferencia de que se intercala entre cada color una pantalla en color negro durante 12 s, es decir, se despliega una pantalla de color 6 s y una pantalla negra 12 s. Mientras que en el programa tres "PG20", se repite el proceso de PG12 pero la pantalla negra se exhibe durante 20 s. Estas pantallas negras se muestran al sujeto bajo estudio con la finalidad de dar tiempo al ojo de redilatar su pupila y así responder únicamente al color correspondiente a la λ de estimulación.

En la Fig. 2 se observa la luminancia del monitor que actúa como estimulador cromático de las diferentes λ . Esta curva de luminancia (cd/m^2) se obtuvo usando un fotómetro Light Gauge Coherent modelo IL1400, semejante a la curva de sensibilidad relativa de CIE (1964) [13]. Para la calibración del monitor, el sensor del fotómetro se colocó a 30 cm de distancia sobre el soporte oftalmológico.

TABLA I. Valores calculados para las componentes rojo, verde y azul (RGB) de los estímulos cromáticos diseñados.

	λ	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650
Componente	R	1	3	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	37	70	109	155	202	237	255	245	211	161	111	70
	G	0	0	0	0	0	5	17	37	58	81	119	170	221	251	255	252	227	201	158	116	73	40	18	6	1	0
	B	16	60	139	211	255	243	208	162	96	52	28	13	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

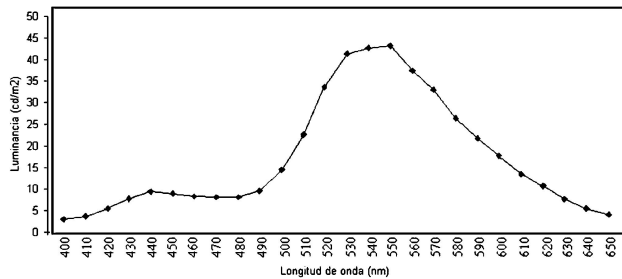
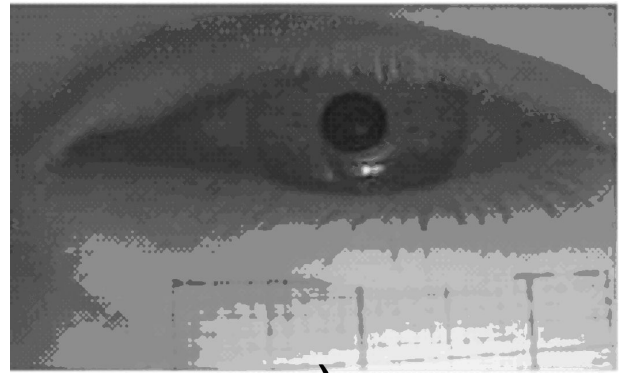


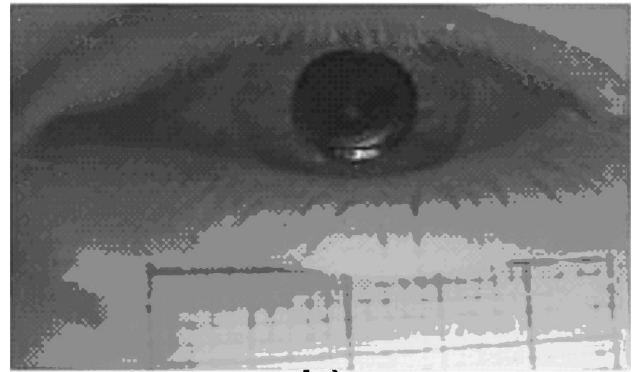
FIGURA 2. Luminancia (cd/m^2) de caracterización del monitor utilizado para las diferencias λ de estimulación del espectro visible desde 400 nm a 650 nm compuesto por los colores violeta (400-430 nm), azul (430-480 nm), azul verdoso (480-490 nm), verde azulado (490-500 nm), verde (500-510 nm), verde amarillento (510-560 nm), verde amarillo (560-570 nm), amarillo (570-580 nm), naranja (580-590 nm), naranja rojizo (590-620 nm) y rojo (620-650 nm) de acuerdo al estándar de iluminación del CIE 1978.

Antes de presentar los diferentes estímulos cromáticos a los sujetos bajo estudio se les presentaron las cartas de Ishihara para determinar si tenían una visión normal a los colores o presentaban protanopía (ceguera al rojo), deuteranopía (ceguera al verde), tritanopía (mayor sensibilidad al azul y deficiencia al azul-verde) o discromatismo (incapacidad para diferenciar o para percibir el rojo y el verde).

Para obtener la máxima dilatación pupilar el sujeto es adaptado a la oscuridad por un periodo de 10 minutos. Una vez adaptada parcialmente su visión, sin llegar a condiciones escotópicas (con las pupilas dilatadas), se le coloca debajo del ojo una cuadrícula milimétrica de referencia y se le pide que apoye su frente y barbilla en el soporte oftalmológico y observe el centro de la pantalla del monitor frente a él, mientras se le presentan los estímulos cromáticos desde 400 a 650 nm con pasos de 10 nm. Dicha cuadrícula se utiliza como referencia para determinar la escala de medición del diámetro pupilar, por ejemplo, si 5 mm de la cuadrícula equivalen a 150 píxeles y el diámetro de la pupila es de 120 píxeles, se tendría un diámetro de 4 mm correspondiente a 12.56 mm^2 de área pupilar. Mediante el reflejo consensual se registran simultáneamente sus RPC y la cuadrícula de referencia con la cámara de video, así como la indicación del λ del estímulo presente en el canal de audio. En la Fig. 3a y 3b, se observan dos cuadros del video adquirido correspondientes a las RPC del sujeto 6 (sexo masculino, 23 años de edad y visión normal a los colores) debidas a las pantallas de color y negra durante la estimulación de PG20. Estas imágenes son posteriormente procesadas y analizadas mediante una frame grabber DT2853-60 para determinar las variaciones de las áreas



a)



b)

FIGURA 3. a) DP del sujeto del sujeto 6 debido al estímulo de 530 nm y b) RDP debido a la pantalla negra. En ambos casos se aprecia la cuadrícula de referencia.

pupilares en estado estable [14] y así calcular el porcentaje de dilatación pupilar (%DP) y redilatación pupilar (%RDP) de acuerdo a las variaciones de área, ocasionadas por las pantallas negras y de color, desplegadas por los estimuladores PG0, PG12 y PG20.

3. Resultados

El estudio se realizó a 38 personas, 28 hombres, 9 mujeres y un niño (22-52 y 6 años), 10 con el estimulador PG0, 20 con PG12 y 16 con PG20, 6 de los sujetos participaron en más de una prueba. Treinta y siete de las personas analizadas de acuerdo a las cartas de Ishihara tienen visión normal a los colores, mientras que un sujeto sufre discromatismo (incapacidad para diferenciar o para percibir el rojo y el verde).

En las Figs. 4, 5 y 6 se presentan las curvas típicas de las RPC del sujeto 1 (sexo masculino, 42 años de edad y visión

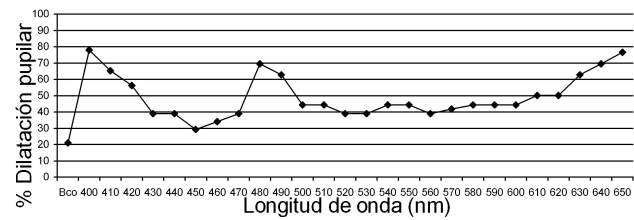


FIGURA 4. G0, % de dilatación pupilar del sujeto 1 al ser estimulado con el programa PG0 (Bco = blanco).

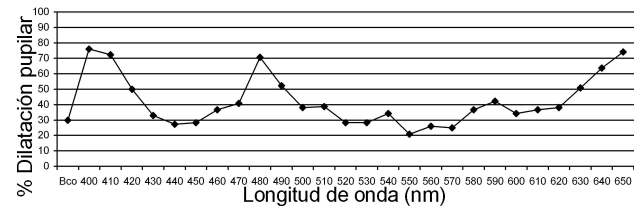


FIGURA 5. G12, % de dilatación pupilar del sujeto 1 al ser estimulado con el programa PG12, Bco (blanco).

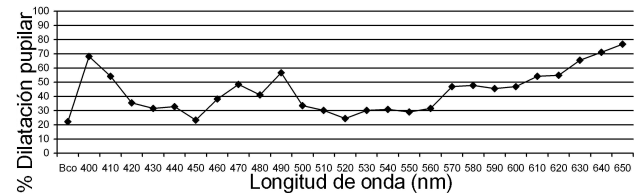


FIGURA 6. G20, % de dilatación pupilar del sujeto 1 al ser estimulado con el programa PG20, Bco (blanco).

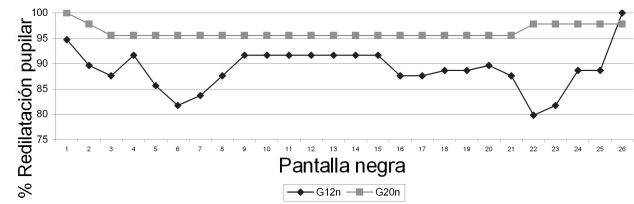


FIGURA 7. G12n y G20n, % de redilatación pupilar del sujeto 1 al ser estimulado con los programas PG12 y PG20.

normal a los colores) estimulado con los tres programas de estimulación. En la Fig. 4 se exhibe G0, %DP al ser estimulado con el programa PG0. En la Fig. 5 se observa G12, %DP obtenido al estimular con el programa PG12. Mientras que en la Fig. 6 se presenta G20, %DP resultante de estimular con PG20.

Como se aprecia en la Fig. 4, no se destacan variaciones de % DP notables en las diferentes λ del espectro, este mismo comportamiento se observó en los 10 estudios realizados con el programa PG0. Por ello se decidió intercalar pantallas negras entre las pantallas de color de los estimuladores PG12 y PG20 con la finalidad de resaltar estas variaciones debidas a los cambios de iluminación (colores). En las Fig. 5 y 6 se observa de forma notable las variaciones en los % DP, teniéndose una mejor respuesta en la Fig. 6 correspondiente a PG20. Por otro lado, en la Fig. 7 se exhiben los % RDP G12n y G20n debidos a las pantallas negras al estimular al sujeto 1 con PG12 y PG20.

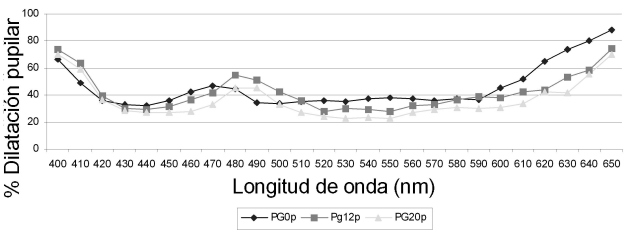


FIGURA 8. G0p, % de DP promedio de las 10 personas al ser estimuladas con PG0, G12p, % de DP promedio de las 20 estimuladas con PG12, y G20p, % de DP promedio de las 16 personas estimuladas con PG20.

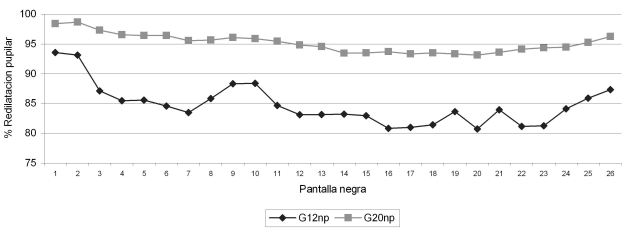


FIGURA 9. G12np y G20np, % de DP promedio de los sujetos al ser estimulados con las pantallas negras de los programas PG12 y PG20.

TABLA II. Correlación entre los tres diferentes promedios G0p, G12p y G20p de acuerdo a su % DP.

	G0	G12	G20	Desv est	Varianza
G0		0.90	0.92	0.01426	0.00020
G12	0.90		0.98	0.05686	0.00323
G20	0.92	0.98		0.04260	0.00181

Los promedios de los % DP de las 38 personas sometidas a estimulación cromática son mostradas en la Fig. 8 con G0p, G12p y G20p, mientras que los promedios del % RDP se exhiben en la Fig. 9, con G12np y G20np.

En la Tabla II, se exhiben las correlaciones, desviación estándar y la varianza correspondientes a las λ del espectro de 400 nm a 650 nm de G0p, G12p y G20p.

4. Discusión

Por naturaleza el ojo humano sufre midriasis al encontrarse en condiciones de iluminación deficiente y miosis al existir una iluminación elevada, debido a esto esperamos que la pupila de los sujetos bajo estudio se dilate en los colores de tonalidad oscura y se contraiga con los tonos claros.

En la Fig. 10 se muestran las tres graficas promedio G0p, G12p y G20p. Aquí se observa que efectivamente la pupila se dilata en las λ de los extremos correspondientes a los colores más oscuros, es decir, existe una sensibilidad mínima en 400 nm y 650 nm, mientras que ésta se contrae en los colores más claros, presentándose una sensibilidad máxima en la λ de 530 nm.

Analizando la Fig. 10 observamos 8 puntos significativos de cambio de pendiente o quiebres Q, Q₀, Q₁, Q₂, Q₃, Q₄, Q₅ y Q₆, que están en función de la luminancia de cada color, ocasionando con ello el proceso de dilatación o contracción pupilar. Debido a los colores azul oscuro en Q a Q₀ se presenta una contracción, la cual se mantiene de Q₀ a Q₁. Por otro lado, de Q₁, Q₂ existe una dilatación generada por el cambio de tonalidad de azul a verde, presentándose de igual forma una contracción de Q₂ a Q₃ dada por los tonos claros de verde, manteniéndose de Q₃ a Q₄. Mientras que de Q₄ a Q₅ se observa una pequeña dilatación debida a los tonos naranjas. Finalmente se observa una dilatación mayor al presentarse los tonos rojos de Q₅ a Q₆. Presentándose los valores de máxima sensibilidad al espectro en 530 nm y la mínima en 400 y 650 nm. Es importante mencionar que para G12p el punto Q3 está desplazado hacia la izquierda en 520 nm, mientras que para G20p este punto se encuentra en 530 nm. En las λ de 480 nm y 490 nm se observa una meseta en G20p (que corresponde exactamente a la franja del azul que está entre 480 nm y 490 nm, y de 470 nm a 480 nm en G12p, mientras que en G0p no se presenta. Esta meseta representa un cambio muy pequeño en el área pupilar.

De acuerdo a la presencia o ausencia de estos cambios se puede determinar o diagnosticar la percepción visual a los colores, así como la sensibilidad a los mismos de las personas sujetas al estudio.

En la Fig. 11 se graficó G12p con los % DP de los 2 sujetos, el sujeto 2 es del sexo masculino de 52 años de edad con discromatismo, mientras que el sujeto 3 es del sexo masculino de 43 años de edad y padece diabetes mellitus (DM) tipo II diagnosticada hace tres años.

Considerando que en la Fig. 11 el sujeto 2 padece discromatismo, se espera que no responda adecuadamente a las λ correspondientes al verde y al rojo. Inicialmente se puede decir que presenta una sensibilidad mínima en 410 nm y 630 nm que no coincide con Q y Q₆ (400 nm y 650 nm) y una sensibilidad máxima en 520 nm. Analizando sus quiebres se observa que éste responde adecuadamente a los azules (Q₀ - Q₂), sin embargo sufre un comportamiento pupilar alternante entre Q₂ y Q₆. Al observar el verde, presenta dos mesetas de contracción de Q₂ a Q₃, observándose una respuesta más lenta de 500 nm a 510 nm, mientras que se dilata en 530 nm y se contrae hasta 560 nm. Cuando mira el color rojo, se observa una respuesta variable entre contracciones y dilataciones aleatorias, en este punto inicia su dilatación prematura antecediendo en Q5. Con lo que se destaca un mayor problema en la percepción de colores rojo y verde.

Para el sujeto 3 (Fig. 11), se observa una respuesta adecuada de Q a Q₂, y una respuesta dentro de lo normal al observar el verde, mientras que presenta variaciones al observar desde el naranja hasta el rojo a partir de 580 nm. Se ha comprobado que las personas que padecen DM presentan debilidad en la percepción de los colores rojo y azul, este sujeto tiene un antecedente de tres años de que se le diagnosticó la DM, por lo que aun su percepción cromática en el azul no se ve alterada.

Por otro lado, el sujeto 2 (Fig. 11) presenta una meseta de 480 nm a 500 nm (azul verdoso y verde azulado), mientras que el sujeto 3 no presenta ninguna meseta, es decir, el sujeto 2 presenta cambios grandes de área pupilar a esas λ , mientras que el sujeto 2 presenta cambios de área muy pequeños.

Un ejemplo más destacado se ve en la Fig. 12, en la cual se grafica G0p con respecto a dos sujetos que padecen DM tipo II. El sujeto 4 es un hombre de 66 años de edad con 12 años de padecer DM, mientras que el sujeto 5 es una mujer de 58 años y 10 años de padecer DM.

En la Fig. 12 se observa que el sujeto 4 en ningún momento sigue la curva promedio G0p, y presenta cambios pupilares grandes de una λ a otra. En el espectro azul presenta cambios pupilares grandes además de no seguir el promedio, en el espectro verde en Q₃ y Q₄ se observa una dilatación en lugar de una contracción, mientras que en el espectro rojo tiene una respuesta estable, es decir no percibe el color rojo. Para el sujeto 5 se observa en rango de los azules una respuesta estable, lo cual indica que no percibe las variaciones de λ . En el espectro verde de igual forma presenta dilataciones en lugar de contracciones. De Q₄ a Q₅ tiene una respuesta estable, mientras que de Q₅ a Q₆ tiene los mayores cambios pupilares. Al igual que con el sujeto 3, los sujetos 3 y 5 presentan cambios muy grandes de área pupilar en las longitudes de 480 nm a 490 nm, sin presentar ninguno de los tres casos la meseta descrita en G20p para estas λ . En [15] se establece que hay una pérdida severa en la sensibilidad de longitudes de onda cortas, indicando que el sistema azul-amarillo es más afectado que el rojo-verde, lo cual se observa más evidente en el sujeto 5.

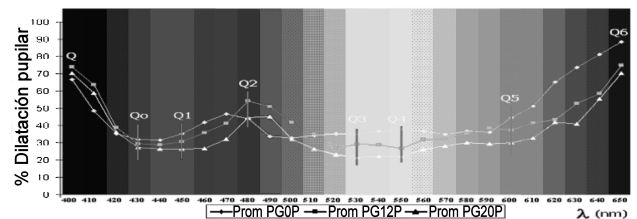


FIGURA 10. % DP promedio de las 38 personas sometidas a los tres estimadores PG0p, PG12p y PG20p.

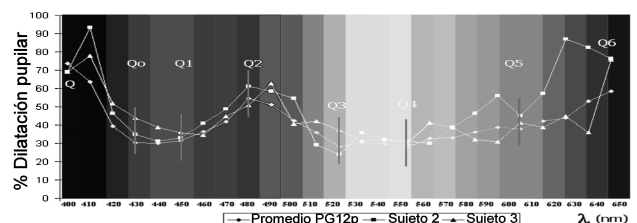


FIGURA 11. Comparación del G12p, contra los %DP de los sujetos 2 y 3. El sujeto 2 presenta discromatismo, mientras que el sujeto 3 padece diabetes mellitus tipo 2 desde hace 3 años.

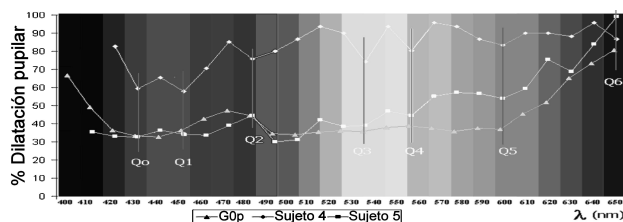


FIGURA 12. Comparación del G0p, contra los % DP de los sujetos 4 y 5. Ambos sujetos padecen DM tipo II desde hace 12 y 10 años, respectivamente.

5. Conclusiones

Intercalando pantallas negras entre las pantallas de color creamos el ambiente para que la pupila del sujeto bajo estimulación se redilate y posteriormente se contraiga específicamente a la λ del estímulo cromático. Al observar detenidamente la Fig. 4, se aprecia que los % DP tienen amplitudes muy pequeñas, esto se debe a que la pupila sufrió una adaptación al color anterior con el que es le estaba estimulando, lo que ocasiona al ser estimulado con el siguiente color una insuficiencia en el tiempo para redilatarse y responder únicamente al estímulo presente. Esto se comprueba con la Fig. 7, note que en G12n existen variaciones notorias en los % RDP, mientras que en G20n, se mantiene una pequeña variación manteniéndose casi lineal. Lo óptimo es que esta respuesta fuera una línea recta, esto se lograría dando más tiempo de redilatación, es decir, aumentando la duración de las pantallas negras.

Al realizar la estimulación visual de tres formas diferentes se observó que la estimulación más adecuada para obtener las RPC debidas a las diferentes longitudes de onda comprendidas en el espectro visible (400 nm – 650 nm) es en la que se da un espacio para la redilatación pupilar de 20 segundos, esto se observa en los promedios de la Fig. 12 en las gráficas G0p, G12p y G20p.

A pesar de que en PG0 no se presentan pantallas negras por lo que no hay un periodo de RDP, los % RPC son bastante notorios, lo cual también indica que se tendrá una mejor respuesta al tener el tiempo de redilatación estimulando con PG20.

Al utilizar el estimulador PG20 se observó que para la mayoría de las personas bajo estudio los 20 segundos de pantallas negras fueron suficiente para obtener un buen % RDP, permitiendo así, responder adecuadamente a la λ presentada (color).

De acuerdo a los resultados obtenidos esta metodología podría ser empleada en la exploración de la percepción visual a los colores, ceguera a los mismos (protanopía, deuteranopía, tritanopía o discromatismo) o aquellos trastornos neurológicos o fisiológicos que alteren la calidad de la percepción visual, tales como la diabetes *mellitus*, glaucoma, cataratas, hipertensión, retinopatía, entre otras.

Finalmente, con estos valores de área pupilar en respuesta a la luminancia, obtenidas en este estudio, será posible cuantificar la iluminación retiniana en el espectro visible, trabajo que esta llevando a cabo y que en futuro se presentaran los resultados.

1. J.M. Artigas, P. Capilla, A. Felipe y Pujol, *J. Optica fisiológica, psicofísica de la visión* (Ed. Interamericana McGraw-Hill, 1995).
2. R.A. Moses y Alder's, *Physiology of the eye, clinical application*. Seventh edition. USA 1981.
3. Kazutsuna Yamaji, Yutaka Hirata y Shiro Usui; The pupil as a possible monitor of the autonomic nervo system; *Proceedings -19'h. Intemational conference -IEEE/EMBS Oct, 30 -Nov 2, 1997 Chicago, IL, USA*.
4. M. Kohn y M. Clynes, *Annals New York Acad Sci* **156** (1969) 931.
5. T. Ishihara *Test for colour blindness*. 5th edition (Tokio, 1925) p. 37; T. Farnsworth, *J. Opt Soc Amer* **33** (1943) 568.
6. J. Terdinam, J. Stark y A. Smith, *Brain Research* **16** (1969) 288.
7. Werner Adrian, *Clinical and Experimental Optometry* **86** (2003) 235.
8. R.F. Smith, *Fundamentals of sensory physiology* (Ed. Springer-Verlag, New York, 1977).
9. J.E. Bos, *Medical and Biological Engineering & Computing* (1991) 529.
10. E. Kimura y R.L.S. Young, *Vision Research* **35** (1995) 897.
11. Günter Wyszecki y W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and methods, quantitative data formulae*, Second edition (John Wiley and sons INC, 2000).
12. D. Malacara, *Color vision and colorimetry, theory and applications* (SPIE press, 2002).
13. S.J. Williamson y H. Cummins, *Light and color in nature and art* (John Wiley and sons INC., 1983) p. 69.
14. E. Suaste, A. Zúñiga y R. Martínez, *Human vision and Electronic Imaging VII*, Bernice E. Rogowitz, Thrasyvoulos N. Pappas, Editors, *Proceedings of SPIE* **4662** (2002) 482.
15. "Inherited and acquired colour vision deficiencies, fundamental aspects and clinical studies", *Vision and visual dysfunction VII*, Edited by David H. Foster (Macmillan press, 1991) p. 42.