

RELACION ENTRE ILUMINACION AMBIENTE, TAMAÑO PUPILAR Y AGUDEZA VISUAL

S.A. Comastri¹, R. Echarri¹, E. Colombo² y L. Issolio²

¹Laboratorio de Optica, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón I, Ciudad Universitaria (1428) Buenos Aires

²Grupo de Fotometría y Visión, Departamento de Luminotecnica, Luz y Visión, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Avenida Independencia 1800 (4000) Tucumán
email: comastri@df.uba.ar

En ojos anormales, normales ancianos y normales con pupila grande, el desempeño visual puede estar afectado por aberraciones no solo convencionales sino también de orden superior. La prueba de agudeza visual es un modo tradicional y simple de determinar dicho desempeño aunque los puntajes obtenidos pueden depender de la luminancia de la carta y/o la de su entorno. Por otro lado, el patrón de aberraciones de cada sujeto depende del tamaño pupilar y, en condiciones naturales, este varía al modificar la iluminación ambiente. En este trabajo, para ojos normales y manteniendo constantes la luminancia de la carta y la de adaptación, se estudian las relaciones entre iluminación, agudeza visual y tamaño pupilar. Cada sujeto lee monocularmente y en condiciones naturales de visión, una carta de Bailey-Lovie ubicada a 2 m mientras se captura la imagen de su ojo en un video. La prueba se repite para 4 valores de diámetro pupilar que resultan de transiluminar la carta con 4 fuentes diferentes. En una primera serie de mediciones se consideran ambos ojos de 6 sujetos (entre 18 y 50 años de edad) y una luminancia en la carta de 33cd/m² y se obtiene que el diámetro pupilar para máxima iluminación y la proporción de dilatación pupilar al disminuir la iluminación varían de un ojo a otro (algunos ojos se dilatan hasta el doble del valor inicial). Modificando el equipo de captura de video para lograr un aumento 3.3 veces mayor, se reduce el error en la determinación del diámetro pupilar y, para una luminancia en la carta de 29.5cd/m², se realiza una serie similar para el ojo izquierdo de otros 2 sujetos (36 y 53 años). De ambas series globalmente resulta que, en ojos normales y para iluminancias en pupila entre 2.5lux y 42 lux, la agudeza visual no varía al dilatarse naturalmente la pupila.

In eyes that are abnormal, old normal and normal with large pupil, visual performance can be affected not only by conventional aberrations but also by high order ones. The visual acuity test is a traditional and simple means of determining this performance though scores can depend on the luminance at the chart and/or at its surroundings. On the other hand, the aberration pattern for each subject depends on pupil size and, under natural viewing conditions, this varies when surround illumination varies. In the present article, considering normal eyes and maintaining chart and adaptation luminance constant, the relations between illumination, visual acuity and pupil size are analysed. Each subject reads monocularly and under natural viewing conditions, a Bailey-Lovie chart placed at 2m while the image of his eye is captured in a video. The test is repeated for 4 values of pupil diameter which result from transilluminating the chart with 4 different light sources. In a first series of measurements both eyes of 6 subjects (between 18 and 50 years old) and a chart luminance of 33cd/m² are considered and it results that the pupil diameter for maximum illumination and the ratio in which pupil dilates when illumination decreases varies from one eye to another (in some eyes pupil dilates up to values which are twice the initial one). Modifying the device that captures the video to attain a magnification 3.3 times larger, the error in the determination of pupil diameter is reduced and, for a chart luminance of 29.5cd/m², a similar series is performed on the left eye of 2 other subjects (36 and 53 years old). From both series it globally results that, in normal eyes and for pupil illuminances between 2.5 lux and 42 lux, visual acuity does not vary when pupil is naturally dilated.

I. INTRODUCCION

El desempeño del ojo humano¹ depende del comportamiento tanto del sistema neurológico como del sistema óptico y éste, a su vez, depende de las aberraciones presentes^{2,3}. El conocimiento de las aberraciones oculares es de interés en cirugía refractiva, diseño de lentes intraoculares y de contacto, etc. La aberración del frente de ondas correspondiente a la córnea y al ojo completo se evalúa usando topógrafos y aberrómetros que la descomponen en polinomios de Zernike^{4,5} cada uno de los cuales corresponde a una aberración específica y depende del tamaño y centrado de la pupila de un

modo particular. Se ha reportado que la variabilidad del patrón de aberraciones entre sujetos³ es mayor para jóvenes con pupila pequeña (3mm), que suele haber un corrimiento de centro pupilar al dilatarla⁵ y que las aberraciones de orden superior afectan el desempeño visual^{6,7} en ojos anormales, normales ancianos y normales con pupila grande (mayor que 6mm). En numerosos trabajos^{4,7,8}, dilatando la pupila artificialmente, se han correlacionado las aberraciones con la agudeza visual y/o la sensibilidad al contraste y en algunos se han reportado diferencias en el comportamiento ocular si las condiciones son de laboratorio o naturales^{3,4,9}. Por otro lado, aunque el tamaño pupilar es un parámetro importante en estudios de Visión, Oftalmología, Clínica y

Psicología¹⁰, en la práctica clínica suele ignorarse al realizar pruebas de la función visual. Aunque es sabido que variaciones en la iluminación ambiente pueden generar cambios de iluminancia tanto en la carta (Snellen, Pelli-Robson, etc) como en la pupila, la literatura no es contundente sobre si la variación de iluminación entre gabinetes oftalmológicos ocasiona o no¹¹ cambios apreciables en los puntajes asignados. Estudiando la influencia de la luminancia del entorno en mediciones de sensibilidad al contraste¹² y en estas y en el tamaño pupilar¹³ para diferentes condiciones de iluminación, se han recomendado valores contradictorios para la luminancia del entorno (entre 10 y 30% de la luminancia media de la carta en Ref.12 y 75% en Ref.13).

En el presente trabajo analizamos la relación entre iluminación, tamaño pupilar y agudeza visual¹⁴ para sujetos normales en condiciones naturales con la idea de estudiar en el futuro la incidencia del tamaño pupilar y de las consecuentes aberraciones en el desempeño visual cotidiano de sujetos no normales. Realizamos la prueba de agudeza visual cuando la luminancia en la carta es constante mientras que la de su entorno varía de modo tal de tener un amplio rango de diámetros pupilares sin variar la luminancia de adaptación foveal. La luminancia en la carta es baja (33cd/m^2 en la primer serie y $29,5\text{cd/m}^2$ en la segunda) respecto de la recomendada^{1,12,13} para consultorios oftalmológicos (entre 100cd/m^2 y 200cd/m^2) mientras que la de su entorno cercano es entre 15% y 1100% de ella siendo relativamente alta en 3 de las 4 condiciones consideradas.

II. ABERRACIONES OCULARES, AGUDEZA VISUAL, ILUMINACION Y PUPILA

En un ojo libre de aberraciones, la imagen geométrica de un punto es un punto y a él converge un frente de ondas esférico. En un ojo aberrado la imagen geométrica de un punto es una mancha y el frente de ondas que llega a la retina está deformado respecto del esférico ideal. Las aberraciones pueden analizarse considerando la distribución de luz en la retina (aberración transversal) y/o la deformación del frente de ondas que llega a ella (aberración del frente de ondas)^{2-9,14}. Las aberraciones, para ciertos tamaños de pupila, se han relacionado con resultados obtenidos en diferentes pruebas de la función visual^{4,7,8}.

Una de las pruebas que suelen utilizarse para determinar la función visual es la de agudeza visual¹. La agudeza visual decimal es $VA=1\text{minuto}/\text{MAR}$ (siendo MAR el mínimo ángulo de resolución ocular) y depende¹² de la luminancia de adaptación y del contraste en la carta. Por otro lado, la iluminancia retiniana depende^{12,13} del tamaño de pupila y de la luminancia en la carta y en su entorno. Si la pupila se dilata artificialmente manteniendo estas luminancias

constantes¹⁴, la máxima frecuencia espacial que entra al ojo y la iluminancia retiniana aumentan, la profundidad de foco disminuye y la imagen retiniana de un punto es más pequeña si el ojo es limitado por difracción y más grande si es aberrado. Por otro lado, en condiciones naturales, el tamaño pupilar depende, además de otros factores^{1,3,5,8,10}, de la luminancia del campo visual (que corresponde a la carta y a su entorno). Consecuentemente las magnitudes características, es decir luminancia de la carta y su entorno, iluminancia retiniana, tamaño pupilar y calidad de imagen retiniana, están inter-relacionadas.

III. DISPOSITIVO Y RESULTADOS

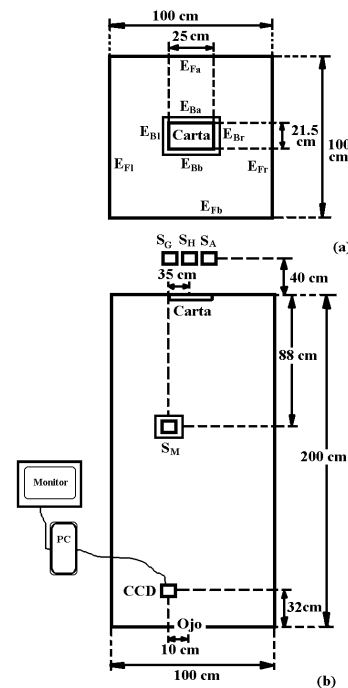


Fig.1: Arreglo experimental

Realizamos 2 series similares de mediciones considerando 12 ojos en la primera y 2 en la segunda. Cada sujeto realiza la prueba de agudeza visual leyendo monocularmente, en condiciones naturales de adaptación y acomodación y sin corrección refractiva, una carta de Bailey-Lovie¹¹ ubicada a 2 m mientras se captura la imagen de su ojo en un video. La prueba se repite para 4 tamaños pupilares diferentes que resultan de variar la luminancia del entorno sin variar la de la carta. La carta tiene 21.5 cm por 25 cm (es decir subtendiendo unos 7° en el ojo), tiene 5 letras negras por línea, fondo blanco y contraste de Michelson 0.9. Alrededor de la carta hay un borde gris claro de unos 6.5 cm. El puntaje que asignamos a la agudeza visual⁹ corresponde al menor tamaño para el cual el número de respuestas correctas es mayor que un umbral de 80%. Las 4 posibles iluminaciones se logran transiluminando la carta¹⁴. Se usa una caja de longitud 2 m, ancho 1 m y altura 1 m, colocada sobre una mesa (Fig.1). La cara frontal de la caja

tiene un hueco donde el sujeto apoya frente y mentón. Todas las caras de la caja son negras excepto la trasera que es una superficie transparente difusora en la cual se coloca la carta. Detrás de la superficie difusora hay 3 lámparas incandescentes, S_G , S_H y S_A e iluminando la carta de frente, colocamos la lámpara S_M . Consideramos las siguientes cuatro iluminaciones I_j (con $j=1,2,3,4$):

- I_1 : S_M sola (entorno apagado)
- I_2 : S_M y S_H (entorno tenue)
- I_3 : S_M , S_H y S_G (entorno medio)
- I_4 : S_M, S_H, S_G y S_A (entorno máximo)

Los videos se capturan utilizando una CCD Watec 902B y el programa Studio DC 10 Plus. En la primer serie de mediciones colocamos a la CCD un objetivo de 25mm de distancia focal y en la segunda uno de 50mm de modo que el aumento con que se captura el ojo es mayor y el error del diámetro es menor. En la Fig.2 mostramos el ojo derecho de J.S. (primer serie) y el izquierdo de L.I. (segunda serie).

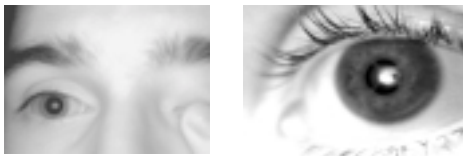


Fig. 2 Ojo de J.S (izquierda) y de L.I (derecha)

III.1 Primer serie de mediciones

Consideramos¹⁴ ambos ojos (llamamos R al derecho y L al izquierdo) de 6 sujetos normales:

- E.C. (18 años, no requiere corrección)
- J.S. (19 años, no requiere corrección)
- E.D.C. (24 años, no requiere corrección)
- S.E. (18 años, sin corrección en L y con 0.75D en R)
- T.G. (47 años, Presbicia 1D)
- R.E. (50 años, Presbicia 1.5D)

Medimos las iluminancias recibidas por la carta y por la pupila usando un fotómetro IL1700 Research Radiometer de International Light y tenemos las siguientes iluminaciones.

Iluminación en la carta: Colocando el sensor sobre la carta y para todas las condiciones de iluminación, obtenemos que su iluminancia es casi uniforme y constante (dentro de un error de 5%) y es $E_C^{[1]}=115\text{lux}$ (supraíndice [1] indica correspondiente a primer serie) mientras que su iluminancia es $L_C^{[1]} \approx 33 \text{ cd/m}^2$. Por otro lado, la iluminancia alrededor de la carta no es uniforme (por ejemplo para iluminación I_1 varía entre 15 lux y 24 lux y para I_4 varía entre 450 lux y 2700 lux) pero en ningún caso modifica el estado de adaptación foveal ni el contraste efectivo de las letras¹⁵. Las iluminancias promedio alrededor de la carta, E_{CAj} ($j=1,2,3,4$), son:

$$E_{CA1}^{[1]} = 17 \text{ lux} = 15\% \text{ de } E_C^{[1]}$$

$$\begin{aligned} E_{CA2}^{[1]} &= 177 \text{ lux} = 154\% \text{ de } E_C^{[1]} \\ E_{CA3}^{[1]} &= 388 \text{ lux} = 337\% \text{ de } E_C^{[1]} \\ E_{CA4}^{[1]} &= 1260 \text{ lux} = 1095\% \text{ de } E_C^{[1]} \end{aligned} \quad (1)$$

Iluminación en la pupila: Medimos la iluminancia en pupila, E_P , con el fotómetro en el lugar de ella y, debido al método de sujeción de frente y mentón, su error es a lo sumo del 12%. Para las 4 condiciones de iluminación, tenemos

$$\begin{aligned} E_{P1} &= 2.5 \text{ lux} = 2\% E_C^{[1]} & E_{P2} &= 7.9 \text{ lux} = 7\% E_C^{[1]} \\ E_{P3} &= 14.9 \text{ lux} = 13\% E_C^{[1]} & E_{P4} &= 42 \text{ lux} = 37\% E_C^{[1]} \end{aligned} \quad (2)$$

Colocando un objetivo de distancia focal $f_o^{[1]}$ a la CCD, ubicamos el sistema CCD-objetivo en una posición fija para todas las mediciones. En cada video, el diámetro pupilar no es constante sino que varía hasta un 20% y el mínimo diámetro, DP , corresponde al intervalo durante el cual el sujeto hace un mayor esfuerzo por realizar la tarea. Primero determinamos DP en pixeles y luego calibramos en mm. Determinando el diámetro 2 veces en el mismo video (llamamos DP' al medido la segunda vez), estimamos aproximadamente su error. Si $\Delta_{DP}^{[1]}$ es el error máximo para videos de calidad adecuada,

$$\begin{aligned} f_o^{[1]} &= 25 \text{ mm} & 1 \text{ mm} &= 7.15 \text{ pixel} \\ \Delta_{DP}^{[1]} &= |DP - DP'| / 2 = 2 \text{ pixeles} = 0.3\text{mm} \end{aligned} \quad (3)$$

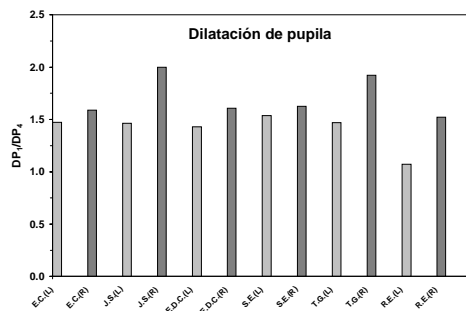


Fig.3: DP_1/DP_4 para los 12 ojos de la primer serie

La baja luminancia de la carta junto con la gama de iluminancias de entorno consideradas originan en cada ojo (especialmente jóvenes) un amplio rango de diámetros pupilares naturales. Cuando la iluminancia porcentual en pupila, $E_{P\%} = 100E_P/E_{P4}$, disminuye de $E_{P\%4}$ a $E_{P\%1}$, la pupila se dilata desde un diámetro DP_4 hasta DP_1 ; DP_1/DP_4 está alrededor de 1.5 y $1.1 < DP_1/DP_4 < 2$ (Fig.3). Para cada ojo (excepto R.E. que tiene escasa dilatación), el crecimiento pupilar es mas suave para iluminancias altas (de $E_{P\%4}$ a $E_{P\%3}$) que para bajas (de $E_{P\%3}$ a $E_{P\%1}$) mientras que, para cada iluminación, hay una considerable variabilidad de DP entre sujetos (por ejemplo para I_1 , $4.2\text{mm} < DP < 8.4\text{mm}$) que no sería evidente si se utilizara pupila artificial (Fig.4).

Con respecto a la agudeza visual, se encuentra alrededor del valor normal ($0.8 < VA < 1.25$ excepto para el ojo R de S.E que requiere corrección de astigmatismo) y, como era de esperar, los puntajes

mayores corresponden a ojos que no requieren corrección refractiva. Mientras el diámetro pupilar cambia apreciablemente, la agudeza visual varía levemente siendo su variación porcentual para cada ojo inferior a 28% lo cual es del orden de la variabilidad con la que la prueba permite discriminar agudeza visual (Fig.5). Luego, para los ojos normales considerados, la agudeza visual no muestra una tendencia clara de cambio al dilatarse la pupila.

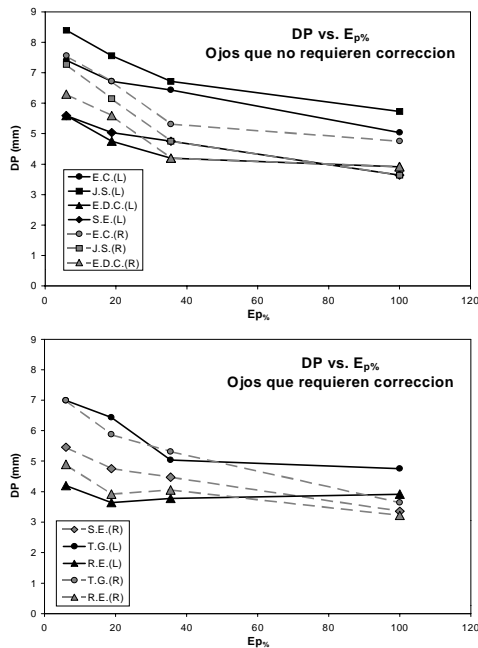


Fig. 4: DP vs $E_{p\%}$ para ojos que no requieren corrección refractiva (arriba) y que la requieren (abajo)

III.2 Segunda serie de mediciones

Consideramos el ojo L de dos sujetos:

L.I. (36 años, no requiere corrección)

E.M.C. (53 años, Presbicia 2.25D)

La ubicación de las lámparas S_G, S_H, S_A y S_M es aproximadamente igual a la de la primer serie y, con un luminómetro Minolta LS-110, en la carta medimos $L_C^{[2]}=29.5 \text{ cd/m}^2$. En vez de iluminancias en pupila, medimos iluminancias alrededor de la carta y sus valores promedio para las iluminaciones I_j , son:

$$\begin{aligned} L_{CA1}^{[2]} &= 6.85 \text{ cd/m}^2 = 23\% \text{ de } L_C^{[2]} \\ L_{CA2}^{[2]} &= 69.3 \text{ cd/m}^2 = 235\% \text{ de } L_C^{[2]} \\ L_{CA3}^{[2]} &= 115 \text{ cd/m}^2 = 390\% \text{ de } L_C^{[2]} \\ L_{CA4}^{[2]} &= 325 \text{ cd/m}^2 = 1102\% \text{ de } L_C^{[2]} \end{aligned} \quad (4)$$

Analizamos la influencia de estas iluminancias en el estado de adaptación foveal considerando que, aunque éste está principalmente determinado por el nivel de iluminación del campo visual cuya imagen está en la fovea (que subtende 2°), el campo periférico genera una luminancia de velo que se suma a la foveal y la luminancia de adaptación es $L_{ADAP} = L_2^0 + L_{VELO}$. Considerando¹⁵

$L_{VELO} = 0.01761 L_\Theta \ln(\Theta_{ext}/\Theta_{int})$ (siendo L_Θ la luminancia media en un campo periférico anular cuyos contornos exterior e interior subtenden ángulos Θ_{ext} y Θ_{int} con la línea de fijación), obtenemos que, al aumentar la luminancia desde $L_{CA1}^{[1]}$ a $L_{CA4}^{[4]}$, L_{ADAP} crece a lo sumo en un 13%.

Por otra parte, usando un objetivo de CCD de distancia focal $f_o^{[2]}$, el error en la determinación del diámetro pupilar se reduce a la tercera parte respecto a la primer serie. Tenemos

$$\begin{aligned} f_o^{[2]} &= 50 \text{ mm} & 1 \text{ mm} &= 23.55 \text{ pixeles} \\ \Delta_{DP}^{[2]} &= |DP - DP'| / 2 = 2 \text{ pixeles} = 0.1 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5)$$

Graficamos VA vs DP para el ojo izquierdo de ambos sujetos (Fig.6). Como en la primer serie, la agudeza visual casi no varía al dilatarse la pupila.

CONCLUSIONES

Considerando 12 ojos normales en la primer serie de mediciones y 2 ojos en la segunda, relacionamos la iluminación, el diámetro pupilar y la agudeza visual cuando cada sujeto lee sin corrección refractiva, monocularmente y en condiciones naturales de visión, una carta de Bailey-Lovie de luminancia constante ubicada a 2m. Obtenemos que:

- La baja luminancia de la carta (30 cd/m^2) y la gama de luminancias de su entorno, nos permiten mantener casi constante la luminancia de adaptación foveal, no introducir deslumbramiento, y tener valores de diámetro pupilar comprendidos entre 3mm y 8.4mm.

- El valor del diámetro pupilar para una dada iluminación varía entre sujetos pero para casi todos ellos la pupila se dilata al disminuir la iluminación en ella y hay una tendencia similar de crecimiento más suave para las luminancias de entorno más altas.

- Al dilatarse la pupila, la agudeza visual de cada ojo varía a lo sumo 28% (que es del orden de la variabilidad del método utilizado para determinarla), no hay una tendencia clara de cambio y es globalmente constante. Este resultado podría deberse a bajas aberraciones de los ojos considerados.

Los resultados obtenidos son preliminares y abren al menos dos líneas de trabajo futuro:

- Estudiar en qué medida, bajo condiciones naturales de visión, la variación de la aberración del frente de ondas debida a la variación de iluminación (y en consecuencia del diámetro pupilar) influye en el desempeño visual de ojos normales o no.
- Para diferentes pruebas de la función visual estudiar el desempeño visual al variar la iluminación a fin de encontrar óptimos valores de iluminación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el subsidio otorgado por la Red Argentina de Optica y CONICET. Agradecemos a Ezequiel Carbón por la realización de las figuras.

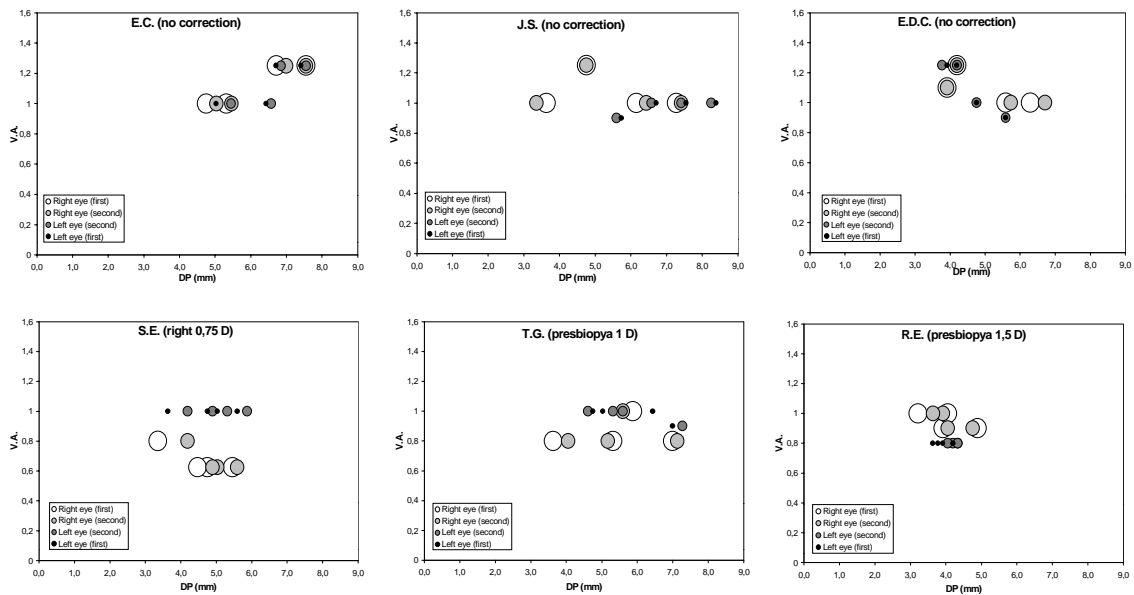


Fig. 5 Gráficos VA vs diámetro pupilar para ambos ojos de cada sujeto (para cada ojo se consideran los valores de DP y DP' correspondiendo los círculos más grandes al ojo derecho y los más pequeños al izquierdo)

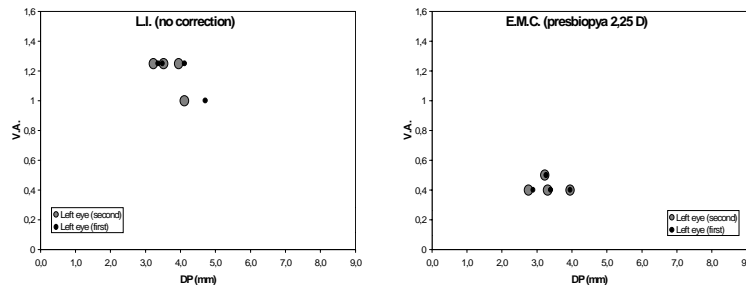


Fig. 6 Gráficos VA vs diámetro pupilar para ojo izquierdo de L.I. y de E.M.C (se consideran los valores de DP y DP')

REFERENCIAS

1. P.L.Kaufman and A.Alm, *Adler Fisiología del ojo*, Elsevier, Madrid, (2004)
2. L.Thibos, R.Applegate, J.Schwiegerling, R.Webb and VSIA Standards Taskforce Members, "Standards for reporting the optical aberrations of eyes", *Vision Science and its Applications*, **35** (2000)
3. A.Guirao, C.Gonzalez, M.Redondo, E.Geragbty, S.Norrby and P.Artal, "Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population", *Inv. Ophthal. & Vis. Science* **40**, 203-213 (1999)
4. R.Applegate, G.Hilmantel, H.Howland, E.Tu, T.Starck, J.Zayac, "Corneal first surface optical aberrations and visual performance", *J. Refr. Surg.* **16**, 507-514 (2000)
5. M.P.Paquin, H.Hamam and P.Simonet, "The Julius F. Neumueller Award in Optics - Objective measurement of the optical aberrations for myopic eyes", *Optical and Vis. Science* **79**, 285-291 (2002)
6. A.Guirao, D.R.Williams, I.G.Cox, "Effect of rotation and translation on the expected benefit of an ideal method to correct the eye's higher order aberrations", *J. Opt. Soc. Am. A* **18**, 1003-1015 (2001)
7. J.Liang, D.R.Williams and D.T.Miller, "Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics", *J. Opt. Soc. Am. A* **14**, 2884-2892 (1997)
8. S.Barbero, S. Marcos, J.Merayo-Lloves, E. Moreno Barriuso, "Validation of the Estimation of Corneal Aberrations From Videokeratography in Keratoconus", *J. Refr. Surgery* **18**, 263-269 (2002)
9. R. Navarro, O. Nestares, B. Antona y J. Hernandez, "Predicting visual acuity from measured ocular aberrations", *Proceedings of SPIE 19th Meeting International Commission for Optics* **4829**, 971-972 (2002)
10. X. Lin, G.Klette, R.Klette, J.Craig, S.Dean, "Accurately Measuring the Size of the Pupil of the eye", *Im. & Vis. Computing New Zealand*, 221-226 (2003)
11. G.Haegerstrom Portnoy, J.Brabyn, M.E.Schneck, A.Jampolsky, "The skill card", *Inv. Oph.. & Vis. Science* **38**, 207-218 (1997)
12. M.J.Cox, J.H.Norman and P.Norman, "The effect of surround luminance on measurements of contrast sensitivity", *Inv. Ophthal. Physiol. Opt.* **19**, 401-414 (1999)
13. J.G.Vizmanos, I.de la Fuente, B.M.Matesanz and J.A.Aparicio, "Influence of surround illumination on pupil size and contrast sensitivity", *Inv. Ophthal. Physiol. Opt.* **24**, 464-468 (2004)
14. S.A.Comastri, R.Echarri and T.Pfortner, "Correlation between visual acuity and pupil size", *SPIE Proceedings 5th Iberoamerican Meeting on Optics* **5622**, 1341-1346 (2004)
15. W.Adrian and R.Topolova, "Transient adaptation process: a model to predict its effects on vision", *CIE 22nd Session* **2**, 121-133 (1991)