

EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DEL ILUMINANTE EN LA VISIÓN FUNCIONAL MESÓPICA

EVALUATION OF THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF THE ILLUMINANT IN MESOPIC FUNCTIONAL VISION

Bárbara Silva^{a, b}, Ma. Constanza Tripolone^{a, b}, Luis Issolio^{a, b}, Elisa M. Colombo^{a, b}

a. Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV) – CONICET
b. Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión (DLLyV) – FACEyT – UNT
Av. Independencia 1800– (4000) Tucumán– Argentina

Recibido: 07/03/18; aceptado: 14/08/18

La respuesta visual en el mesópico depende fuertemente no solo del nivel de luminancia sino también del peso relativo de la respuesta del sistema de conos y bastones. Esto resalta la importancia de conocer la composición espectral de la radiación (SPD, del inglés *spectral power distribution*), a la hora de evaluar la visión funcional. Por eso, este trabajo plantea la medición de la sensibilidad al contraste (SC) mesópica, analizando el impacto de la distribución espectral del iluminante sobre la visión funcional. En el experimento realizado, participaron dos sujetos jóvenes (25 y 30 años), con dos niveles de luminancias fotópicas de adaptación (0,3 y 3 cd/m²), tres frecuencias espaciales (1, 2 y 3 c/g), dos SPDs diferentes una de ellas con un pico en la zona de los azules ($\lambda=448$ nm) y la otra en la zona de los rojos ($\lambda=616$ nm), todo esto en la zona temporal periférica de la retina. Se encuentran diferencias entre las diferentes SPDs en la interacción entre luminancia y frecuencia espacial.

Palabras clave: sensibilidad al contraste, mesópico, distribución espectral

The visual response in mesopic adaptation depends strongly not only on the level of luminance but also on the relative weight of the response of the cones and rods system. This highlights the importance of knowing the spectral power distribution (SPD) of radiation, when evaluating the functional vision. For this reason, this work proposes the measurement of mesopic contrast sensitivity, analyzing the impact of the SPD of the illuminant on functional vision. In the experiment, two young subjects (25 and 30 years old) participated, with two levels of photopic luminance adaptation (0.3 and 3 cd/m²), three spatial frequencies (1, 2 and 3 c/d), two different SPDs one of them with a peak in the blues area ($\lambda = 448$ nm) and the other in the red area ($\lambda = 616$ nm), all of this in the peripheral temporal zone of the retina. Differences were found between both SPDs in the interaction between luminance and spatial frequency.

Keywords: contrast sensitivity, mesopic, SPD.

I. INTRODUCCIÓN

El rango mesópico de adaptación a la luz es aquel que se encuentra entre la visión fotópica o diurna mediada principalmente por los fotorreceptores conos y la visión escotópica o nocturna mediada mayoritariamente por los fotorreceptores bastones. En general, el mesópico es considerado importante para las tareas de conducción nocturna, para los espacios de transición de edificios y en condiciones de iluminación de emergencias. La particularidad del mesópico es que en un rango comprendido entre 10^{-3} cd/m² y 3cd/m² la adaptación a la luz esta mediada tanto por conos como por bastones en proporciones que cambian gradualmente. Por esta razón, la función de eficiencia visual espectral va cambiando con la luminancia, y esto requiere considerar la participación de las diferentes vías receptorales y post-receptorales según el rango específico que se analice ya que no solo están involucrados conos y bastones, con sus respectivas sensibilidades espectrales, sino también sus interacciones **1,2**.

También es necesario evaluar las distintas zonas de la retina para considerar el aporte de los dos sistemas de

fotorreceptores y poner en evidencia las diferencias funcionales debido a que conos y bastones no están distribuidos uniformemente en la retina **3,4**. Mientras en la zona foveal la visión está prácticamente dominada por conos, en la visión periférica, si bien los bastones tienen mayor densidad con su pico alrededor de los 20° **5**, es la zona donde se evidencian claramente los fenómenos propios de la visión mesópica. No menos importante es considerar la distribución espectral (SPD) tanto del estímulo como del fondo sobre el que se visualiza **6-9**.

Como resultado de esta configuración de los fotorreceptores en la retina cuando la iluminación baja desde un nivel diurno a uno nocturno, la respuesta espectral del sistema visual pasa de estar caracterizada por la curva $V(\lambda)$ que representa la visión de conos con un pico de sensibilidad en 555nm **10** a una curva $V'(\lambda)$ que representa la visión de los bastones con un pico de sensibilidad en 508nm **11** que evidencia una mayor sensibilidad a las bajas longitudes de onda (efecto Purkinje). Esto también implica que para cada valor de luminancia dentro del rango mesópico la curva de sensibilidad espectral puede representarse por una

*bsilva@herrera.unt.edu.ar

combinación lineal **12** de ambas curvas de sensibilidad espectral con una ponderación específica de cada una para cada nivel de luminancia, dada por la siguiente ecuación:

$$V_{mes}(\lambda, x) = xV(\lambda) + (1 - x)V'(\lambda), \quad (1)$$

Donde V_{mes} es la función de sensibilidad espectral para un dado valor x dentro del rango mesópico, pudiendo x adoptar valores entre 0 y 1 que representan los extremos del rango mesópico y que se corresponden con visión de solo bastones y de solo conos respectivamente.

Esta característica variación de la sensibilidad espectral con el nivel de iluminación propia del rango mesópico planteó la necesidad de evaluar la eficacia de los distintos tipos de fuentes de iluminación en estas condiciones. Por un lado surge que a medida que baja la iluminación una fuente con alto contenido de longitudes de onda bajas (azules) se vuelve más eficiente que otro iluminante rico en longitudes de onda altas (rojos), mientras que cuando el nivel de iluminación sube el efecto es el contrario. Como resultado se definió un índice S/P **12,13** que representa la relación de la eficacia en el escotópico respecto a la eficacia en el fotópico de una lámpara con espectro de emisión $E_e(\lambda)$:

$$S/P = \frac{k' \int E_e(\lambda) \cdot v'(\lambda) d\lambda}{k \int E_e(\lambda) \cdot v(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Entonces, a mayor valor de S/P hay predominancia de longitudes de onda corta (mayor contenido de azules). A su vez, cada iluminante producirá distintos niveles de luminancia mesópica (L_{mes}) en función del nivel de luminancia fotópica (L) específico dentro del rango mesópico y de su relación S/P. De esta forma, cuando se realiza un experimento para determinar funciones visuales en el mesópico, actualmente se cuenta con una herramienta para calcular la luminancia mesópica corrigiendo la luminancia fotópica medida con un luminancímetro, a partir del S/P del iluminante. Concretamente, se desarrollaron distintos modelos de fotometría mesópica que permiten determinar para cada tipo de fuente luminosa la L_{mes} a partir de la determinación del valor de x . Por un lado el modelo USP (Unified System of Photometry) **6,7** obtuvo a partir de mediciones de tiempo de reacción recomendado para tareas acromáticas, mientras que el modelo MOVE (Mesopic Optimisation of Visual Efficiency)⁸⁻¹², es una aproximación empírica basada en tareas visuales de detección, reconocimiento y velocidad de respuesta con estímulos cuasi-cromáticos. Por su parte la Comisión Internacional del Alumbrado (CIE) estableció como estándar el modelo MES2 **12** que es una combinación de los anteriores. No obstante, nosotros optamos por usar el modelo MOVE porque se basa en medidas de eficiencia similares a las de este trabajo.

A partir de lo mencionado se puede inferir que cualquier medida de rendimiento visual no solo dependerá de los niveles de iluminación **18-20**, sino del contenido espectral (SPD), de la zona de la retina estimulada **21,22**, del tamaño de los estímulos utilizados caracterizado mediante la frecuencia espacial **23-26** y de la duración mediante la frecuencia

temporal. Una herramienta valiosa para la evaluación de eficiencia visual es la sensibilidad al contraste (SC), que es una función que caracteriza la visión espacial a partir de determinar el mínimo contraste detectable (umbral) en un patrón espacial que puede caracterizarse mediante la frecuencia espacial en el caso de redes sinusoidales o el tamaño en el caso de letras u otros optotipos. La mayoría de los estudios que evalúan la función visual basados en SC usan estímulos acromáticos y no dan información sobre la SPD de la radiación **27-32**, se realizan fovealmente y en el rango fotópico **33-39**, aunque hay trabajos en visión periférica y en el rango mesópico **20,40,41**.

Así, este trabajo, se propone medir la sensibilidad al contraste (SC) en el rango mesópico, para analizar el impacto de la SPD del iluminante sobre la visión funcional. Para ello, se consideran dos SPDs con características bien definidas, una de ellas con un pico en la zona de los azules ($\lambda=448$ nm) y la otra en la zona de los rojos ($\lambda=616$ nm), bajo la hipótesis de que de esta manera será posible diferenciar el rol de la SPD teniendo en cuenta la luminancia de fondo y distintas frecuencias espaciales.

II. MÉTODOS

Se midió sensibilidad al contraste usando como estímulo redes sinusoidales con frecuencias espaciales de 1, 2 y 3 ciclos/grado (c/g) que se presentaban inclinadas a $\pm 45^\circ$ (Figura 1).



Fig. 1. Estimulo: red sinusoidal inclinada (+ 45°).

Se usó un monitor TRC (ViewSonic) configurado para presentar dos configuraciones cromáticas diferentes caracterizadas por la temperatura de color correlacionada (TCC) y por la relación de luminancia escotópica sobre fotópica (S/P). En la Tabla 1 se presentan las dos configuraciones; en un caso la TCC=3900K y S/P=1,79 que puede considerarse similar a una lámpara de halogenuros metálicos de aproximadamente 1000W^{37,38}, siendo el iluminante estándar de la CIE más cercano a estas condiciones el B con 4870K. En la otra configuración TCC=8600K y S/P=2,79 que podría asemejarse al de una lámpara LED³⁹, y donde el iluminante más cercano sería el D75 con 7500K.

Se usaron dos niveles de luminancia fotópicas: 0.3, y 3 cd/m² que se alcanzaron interponiendo entre la pantalla del monitor y el ojo filtros neutros del 10% de transmitancia y del 1% de transmitancia respectivamente. La distancia de observación fue de 2

metros al punto de fijación foveal (Figura 2) que estaba indicado con un LED rojo, mientras que el estímulo de 2° de tamaño se ubicó a 10° de excentricidad sobre la retina temporal. La secuencia de generación de los estímulos y la recolección de las respuestas de los sujetos fueron controladas por un ViSaGe MKII, (Visual Stimulus Generator, Cambridge Research Systems), mientras que la fijación periférica se la controló con un Eyetracker Viewpoint®.

Participaron en el experimento 2 observadores voluntarios jóvenes (25 y 30 años) con su correspondiente corrección refractiva foveal.

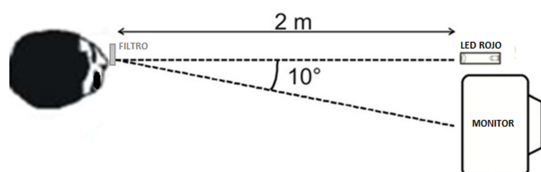


Fig. 2: Configuración Experimental.

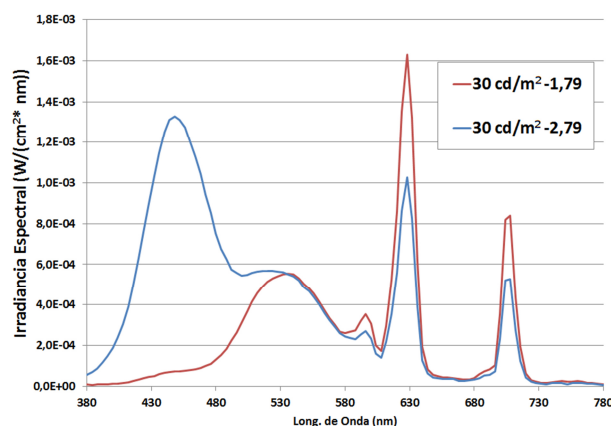


Fig. 3. Gráficas de la composición espectral del monitor para los dos valores de S/P=1.79 (en rojo) y S/P=2.79 (en azul), medidas con el espectrorradiómetro SPECTRASCAN®. Para obtener 0.3 y 3 cd/m² se usaron filtros de 1 y 10% de transmitancia.

TABLA 1. CONFIGURACIONES DE COLOR DEL MONITOR PARA LOGRAR LAS DOS DISTRIBUCIONES ESPECTRALES ELEGIDAS EN ESTE ESTUDIO. LOS ÍNDICES TCC, LAS LONGITUDES DE ONDA A LA QUE OCURREN LOS PICOS DE MAYOR INTENSIDAD, Y LAS RELACIONES S / P QUE SE DETERMINARON A PARTIR DELA SPD ELEGIDA.

Monitor (Marca y Modelo)	S/P	TCC (K)	Pico Máx. (nm)
ViewSonic Graphics Series G225f	1.79	3924	616
	2.79	8657	448

La tarea visual consistía en indicar la orientación de la red presentada (+45°= izquierda, -45°= derecha), utilizando un control remoto, mientras fijaba la mirada en el punto de fijación foveal, utilizando una mentonera que mantenía fija la posición de la cabeza. Para lograr una buena atención del sujeto, un sonido le avisaba que el estímulo se iba a presentar, y otro sonido indicaba que la respuesta había sido guardada, para así poder continuar.

Antes de realizar la tarea, durante 5 minutos los observadores fueron adaptados a la oscuridad, posteriormente durante 8 minutos se adaptaban a la luminancia media correspondiente. Transcurrida esta etapa, se mostraban 5 contrastes que se repetían 10 veces cada uno de manera aleatoria. A su vez, esta sesión se repetía 3 veces, por lo que cada uno de los 5 contrastes era presentado 30 veces, con lo que el contraste umbral fue resultado de 150 presentaciones para cada frecuencia espacial. Los 5 valores de contraste fueron determinados previamente mediante un experimento piloto para cada sujeto, en cada frecuencia espacial, luminancia y SPD, dentro de un rango de 0,1% a 30%.

Para el cálculo del contraste umbral fotópico se ajustaron funciones psicométricas a los porcentajes de acierto en la detección de cada contraste, determinándose el valor umbral para el 75% de respuestas correctas [45,46]. Luego, aplicando el modelo de fotometría mesópica MOVE se convirtieron

los valores de luminancia fotópicas a luminancias mesópicas y se calcularon los umbrales mesópicos, considerando en cada caso las relaciones S/P correspondientes a cada condición.

Para linealizar los datos se calcularon los logaritmos de las SC mesópicas de cada sujeto. Con estos datos se realizó primero un análisis descriptivo del comportamiento con las dos relaciones de S/P. Finalmente para un análisis cuantitativo completo, se utilizó un Modelo Lineal Generalizado (MLG).

III. RESULTADOS

Análisis descriptivo

La SC mesópica como función de la frecuencia espacial para los 2 observadores jóvenes (Y1 y Y2) tomando como parámetro el cociente S/P (1,79 y 2,79) se muestra en la figura 4 considerando los dos valores de luminancia fotópica (0,3 y 3cd/m²). Un análisis descriptivo de estos resultados muestra que para 0,3 cd/m² la curva correspondiente a S/P=2,79 se encuentra por encima de la curva correspondiente a S/P=1,79, en cambio al pasar a 3 cd/m², se ven cruzamientos que indican una interacción entre el contenido espectral de la radiación luminosa con la frecuencia espacial (Fig. 4).

Por su parte, en las figuras 5 se grafican los mismos datos de SC mesópica como una función de la frecuencia espacial tomando como parámetro la luminancia fotópica y para cada valor de S/P. El análisis

descriptivo pone en evidencia comportamientos muy diferentes con los cambios de luminancias para cada distribución espectral. Mientras que para $S/P=1,79$ la SC mesópica aumenta con la luminancia independientemente de la frecuencia espacial, para el iluminantes con $S/P=2,79$ la SC mesópica en cada nivel de iluminación se evidencia también una interacción con la frecuencia espacial.

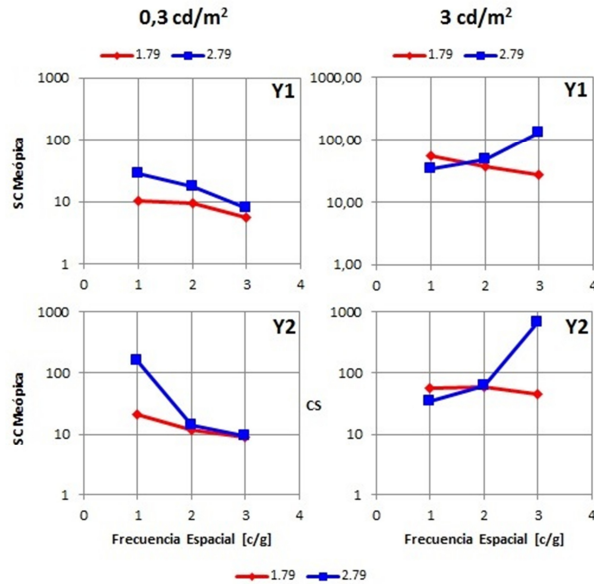


Fig. 4: Sensibilidad al contraste mesópica calculada con el modelo MOVE, de los dos observadores (los datos en color azul corresponden a la condición de $S/P=2,79$; los datos en color rojo corresponden a la condición de $S/P=1,79$) para los dos valores de luminancia. Las barras de error muestran el error cuadrático medio para cada punto.

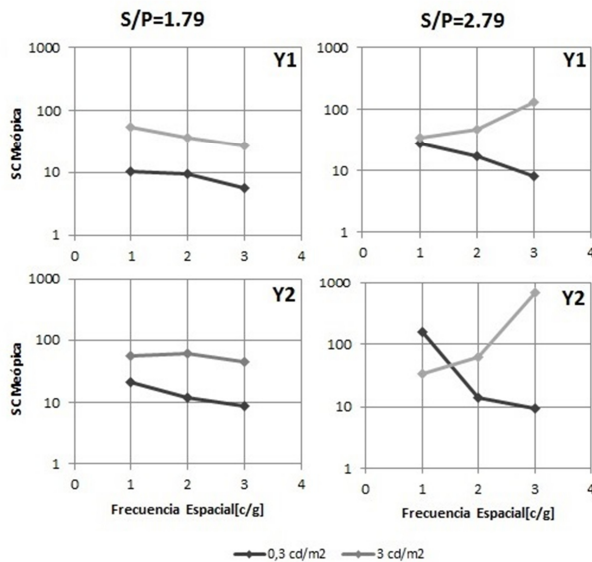


Fig. 5: Sensibilidad al contraste mesópica de cada observador. Del lado izquierdo se grafica la condición de $S/P=1,79$ y del lado derecho se grafica la condición de $S/P=2,79$, para ambos sujetos y diferenciado las luminancias en gris oscuro la luminancia baja ($0,3 \text{ cd/m}^2$) y en color gris claro la luminancia alta (3 cd/m^2). Las barras de error muestran el error cuadrático medio para cada punto.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se usó un modelo lineal generalizado (MLG), con los datos de $\text{Log}_{10}(\text{SC Mesópica})$ como variable dependiente y como variables independientes del modelo sujeto, SPD (especificada con el valor de S/P), luminancia de fondo, frecuencia espacial y también todas las interacciones entre ellas. Se encontró que las variables estadísticamente significativas ($p < 0,05$) fueron: el sujeto, la distribución espectral (SPD), la luminancia de fondo (BL), la frecuencia espacial (F_s), las interacciones: frecuencia espacial con luminancia de fondo ($F_s * BL$), distribución espectral con Frecuencia Espacial ($SPD * F_s$), y la interacción triple entre distribución espectral, luminancia de fondo con frecuencia espacial ($SPD * BL * F_s$).

Se encuentra que la interacción de distribución espectral con luminancia de fondo es estadísticamente significativa en la comparación de pares, como se ve en la figura 6.

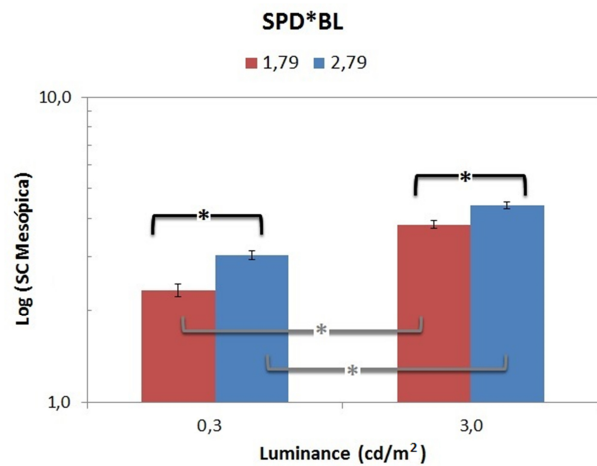


Fig. 6 Grafico de medias marginales estimadas por el MLGM, para la interacción $SPD * BL$, para los Jóvenes. El (*) indica diferencias significativas en términos estadísticos ($p \leq 0,05$) en la comparación de a pares. Las barras de error indican la desviación estándar.

IV. CONCLUSIONES

De los resultados se concluye que:

- La luminancia influye de manera diferente en la SC según se trate de $S/P=1,79$ o $S/P=2,79$, partiendo de valores muy bajos para el primer caso y la menor luminancia.
- Para $S/P=1,79$, la SC mesópica aumenta con la luminancia y disminuye con la frecuencia.
- Para $S/P=2,79$, existe una interacción entre luminancia y frecuencia de manera acentuada, ya que para $0,3 \text{ cd/m}^2$ la SC mesópica disminuye a medida que aumenta la frecuencia, mientras que para 3 cd/m^2 la SC mesópica aumenta sobre todo en la frecuencia de 3 c/g.

Los modelos de fotometría mesópica como el MOVE permiten determinar el valor de la luminancia en el rango mesópico ponderando los efectos de la SPD de la fuente que ilumina la escena analizada. Sin embargo, estos modelos no tienen en cuenta la influencia de la frecuencia espacial de los elementos que conforman la escena, la cual ha sido revelada en este experiment

Estos resultados se alinean con los obtenidos por otros autores **6** que afirman que la detección mesópica no puede ser explicada solo por una combinación de $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$. Desde nuestro punto de vista, el aumento de la SC para la condición con mayor luminancia (3 cd/m^2), mayor frecuencia espacial (3 c/g) y mayor contenido de bajas longitudes de onda ($S/P = 2,79$) puede explicarse por el incremento en la estimulación de las células melanopsínicas (ipRGC) que produce una reducción del tamaño pupilar mejorando la visión de detalles. Estos resultados nos motivan a evaluar la SC mesópica variando la SPD del iluminante en otros niveles de luminancia y en grupos de edad diferente.

III. REFERENCIAS

- Buck, S.L. Rod-Cone Interactions in Human Vision. in *The Visual Neuroscience, LM Chalupa and JS Werner, (Eds.)* **1**, 863–878 (MIT Press, Cambridge, MA, 2004).
- Cao, D. Color vision and night vision. in *Retina 5th edition* 285–299 (Elsevier, 2013).
- Williams, D. R. Seeing through the photoreceptor mosaic. *Trends Neurosci.* **9**, 193–198 (1986).
- Wandell, B. A. *Foundations of vision.* (Sinauer Associates, 1995).
- Kaufman, P. L. & ALBERT, A. Fisiología del ojo. *Adler Elsevier Esp. SA Madr. Esp.* (2004).
- He, Y., Rea, M., Bierman, A. & Bullough, J. Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. *J. Illum. Eng. Soc.* **26**, 125–138 (1997).
- Rea, M. S., Bullough, J. D., Freyssinier-Nova, J. P. & Bierman, A. A proposed unified system of photometry. *Light. Res. Technol.* **36**, 85–109 (2004).
- Freiding, A. *et al.* Mesopic visual efficiency I: detection threshold measurements. *Light. Res. Technol.* **39**, 319–334 (2007).
- Walkey, H. *et al.* Mesopic visual efficiency II: reaction time experiments. *Light. Res. Technol.* **39**, 335–354 (2007).
- Váradý, G. *et al.* Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements. *Light. Res. Technol.* **39**, 355–364 (2007).
- Goodman, T. *et al.* Mesopic visual efficiency IV: A model with relevance to nighttime driving and other applications. *Light. Res. Technol.* **39**, 365–392 (2007).
- Eloholma, M., Ketomäki, J., Orreveteläinen, P. & Halonen, L. *Visual performance in night-time driving conditions.* 254–263 (2006).
- Smith, R. A. Luminance-dependent changes in mesopic visual contrast sensitivity. *J. Physiol.* **230**, 115–135 (1973).
- Sloane, M. E., Owsley, C. & Jackson, C. A. Aging and luminance-adaptation effects on spatial contrast sensitivity. *JOSA A* **5**, 2181–2190 (1988).
- Aparicio, J. A. *et al.* Quantitative and functional influence of surround luminance on the letter contrast sensitivity function. *Ophthalmic Physiol. Opt.* **30**, 188–199 (2010).
- Johnston, A. Spatial scanning of central and peripheral contrast-sensitivity functions. *J. Opt. Soc. Am. A* **4**, 1583–1593 (1987).
- Sakurai, M. & Mullen, K. T. Cone weights for the two cone-opponent systems in peripheral vision and asymmetries of cone contrast sensitivity. *Vision Res.* **46**, 4346–4354 (2006).
- Shapley, R. & Lennie, P. Spatial frequency analysis in the visual system. *Annu. Rev. Neurosci.* **8**, 547–581 (1985).
- Pointer, J. S. & Hess, R. F. The contrast sensitivity gradient across the human visual field: With emphasis on the low spatial frequency range. *Vision Res.* **29**, 1133–1151 (1989).
- Plainis, S. & Murray, I. J. Neurophysiological interpretation of human visual reaction times: effect of contrast, spatial frequency and luminance. *Neuropsychologia* **38**, 1555–1564 (2000).
- Majaj, N. J., Pelli, D. G., Kurshan, P. & Palomares, M. The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Res.* **42**, 1165–1184 (2002).
- Puell, M. C., Palomo, C., Sánchez-Ramos, C. & Villena, C. Mesopic contrast sensitivity in the presence or absence of glare in a large driver population. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* **242**, 755–761 (2004).
- Pelli, D. G. & Bex, P. Measuring contrast sensitivity. *Vision Res.* **90**, 10–14 (2013).
- Haughom, B. & Strand, T.-E. Sine wave mesopic contrast sensitivity—defining the normal range in a young population. *Acta Ophthalmol. (Copenh.)* **2**, 176–182 (2013).
- Hertenstein, H., Bach, M., Gross, N. J. & Beisse, F. Marked dissociation of photopic and mesopic contrast sensitivity even in normal observers. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* **254**, 373–384 (2016).
- Venkataraman, A. P., Lewis, P., Unsbo, P. & Lundström, L. Peripheral resolution and contrast sensitivity: Effects of stimulus drift. *Vision Res.* **133**, 145 (2017).
- Kang, I., Reem, R. E., Kaczmarowski, A. L. & Malpeli, J. G. Contrast sensitivity of cats and humans in scotopic and mesopic conditions. *J. Neurophysiol.* **102**, 831–840 (2009).
- Campbell, F. W. Why do we measure contrast sensitivity? *Behav. Brain Res.* **10**, 87–97 (1983).
- De Valois R. L. & De Valois K. K. Chapter 5: Contrast Sensitivity and Acuity. in *Spatial vision* 147–175 (Oxford University Press, USA, 1990).
- Barten, P. G. . Formula for the contrast sensitivity of the human eye. in *Proceedings of SPIE* **5294**, 231 (2003).
- Ginsburg, A. P. Contrast sensitivity and functional vision. *Int. Ophthalmol. Clin.* **43**, 5 (2003).
- Colombo, E., Issolio, L., Santillan, J. & Aguirre, R. What characteristics a clinical CSF system has to have. *Opt. Appl.* **39**, 415–428 (2009).
- Arranz de la Fuente, I. Estudio de la influencia de la luminancia ambiental en la medida de la sensibilidad al contraste de letras. (2010).

34. Barten, P. G. J. Formula for the contrast sensitivity of the human eye [5294-28]. in *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING* 231–238 (2004).
35. Matesanz, B. M. *et al.* Temporal retinal sensitivity in mesopic adaptation. *Ophthalmic Physiol. Opt.* **31**, 615–624 (2011).
36. Gloriani, A. H. *et al.* Influence of background size, luminance and eccentricity on different adaptation mechanisms. *Vision Res.* **125**, 12–22 (2016).
37. Lingard, R., Rea, M., ADRIAN, W. & COLLINS, B. L. Off-axis detection at mesopic light levels in a driving context. Discussions. Authors' reply. *J. Illum. Eng. Soc.* **31**, 33–39 (2002).
38. Rea, M. S., Bullough, J. D., Freyssinier-Nova, J. P. & Bierman, A. A proposed unified system of photometry. *Light. Res. Technol.* **36**, 85–109 (2004).
39. Fotios, S. A. & Cheal, C. Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 1: Spatial brightness. *Light. Res. Technol.* **43**, 143–157 (2011).