



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

MEMORIA TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO

**Medida de tiempos de reacción y umbrales
de contraste para distintos grupos de edad y
distintos iluminantes urbanos**

Presentado por: Marta Benito Sabater

Tutelado por: Juan Antonio Aparicio

Tipo de TFG: Investigación

En Valladolid a, 13 de Mayo de 2016

ÍNDICE

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	3
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	4
1.1. Ganancia de contraste	4
1.2. Tiempo de reacción	4
1.3. Contraste umbral	5
1.4. Estado del arte	5
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS E HIPÓTESIS	7
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	8
3.1. Montaje experimental	8
3.2. Medida de espectros	8
3.3. Determinación psicofísica de umbrales	10
3.4. Medida de tiempos de reacción	10
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	12
4.1. Contraste umbral	12
4.2. Tiempos de reacción	13
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN	16
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	18
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	19

Abstract:

The ability of the human visual system to adapt to sudden changes of brightness is lost with age, and this can result in risky situations for drivers and pedestrians during night, which occurs in mesopic lighting. It is therefore important the proper lighting of urban streets and roads. In this research we measured the contrast thresholds and the reaction times in suprathreshold contrasts of subjects of three age groups (20-30, 40-50 and older than 60 years old) and with two different urban illuminants (high pressure sodium HPS and metal halide HM). The measures are made in various mesopic luminances (from 0.01 cd/m^2 to 1 cd/m^2), and at 10 degrees of retinal eccentricity because it is the part of the retina that is more involved in obstacles detection. A spectrometer was used to measure the spectra of the lamps. After a period of dark adaptation contrast threshold and reaction times of each subject were determined. Contrast thresholds were measured by the limits method. We conclude that, because of the different S/P ratios of the lamps and the scattering produced by the ocular media opacification with age, HM lamp is more efficient than HPS lamp for young and medium subjects (as it results in lower contrast thresholds and reaction times), however, there is no difference between the efficiency of the two lamps for the older ones.

Introducción y justificación del trabajo:

El sistema visual humano es capaz de adaptarse rápidamente a los cambios bruscos de luminosidad, pero ésta es una capacidad que se va perdiendo con la edad, lo que puede dar lugar a situaciones de riesgo entre las que cabe destacar la circulación nocturna, que se da en condiciones de iluminación mesópica. Una iluminación adecuada es una medida preventiva para reducir el riesgo de accidentes, por ello, el objetivo de este proyecto es encontrar cuál es el tipo de iluminante más eficiente para las vías urbanas.

Para ello se miden los contrastes umbrales y el tiempo de reacción en contrastes supraumbrales en individuos de distinta edad y con distintos iluminantes urbanos nocturnos. Las medidas se realizan en sujetos de distintos grupos de edad (20-30, 40-50 y mayores de 60 años) por el deterioro del sistema visual con el paso del tiempo, tanto óptico como neuronal.

Utilizamos lámparas de sodio de alta presión (HPS) y lámparas de halogenuros metálicos (HM) ya que son las más utilizadas en el alumbrado público. Para analizar el rendimiento visual en condiciones mesópicas con cada lámpara utilizamos el ratio S/P o cociente de luminancia escotópica entre luminancia fotópica. Las medidas de tiempo de reacción se realizan en varias luminancias, todas ellas dentro del rango mesópico: de 0.01 cd/m^2 a 1 cd/m^2 .

Las medidas se van a realizar en retina periférica, ya que es la más involucrada en la detección de obstáculos o peligros, a 10° de excentricidad. En esa zona de la retina existen tanto conos como bastones, ambos tipos de fotorreceptores intervienen en condiciones de iluminación mesópica.

Las medidas del tiempo de reacción se realizarán con contrastes supraumbrales, que es la situación que se da en la señalización vertical durante la circulación nocturna.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1. Ganancia de contraste:

Se define como ganancia de contraste el aumento en la respuesta visual que se da por cada unidad de cambio en el contraste del estímulo presentado. Este parámetro es proporcional a la sensibilidad al contraste, que es la inversa del umbral de contraste.¹

Se sabe que el sistema visual humano consta de dos mecanismos o vías para el procesamiento de la imagen visual que tienen diferentes características espectrales, temporales y espaciales: la vía magnocelular y la vía parvocelular. La vía magnocelular tiene una mejor resolución temporal, reacciona más rápidamente y es acromática, su ganancia de contraste es alta, es decir, su respuesta varía mucho ante pequeños cambios de contraste; por el contrario, la ganancia de contraste de la vía parvocelular es mucho más baja y más lenta, pero su resolución espacial es mejor y proporciona información sobre el color.^{1,2}

Murray y Plainis estudiaron en 2003¹ la relación entre los tiempos de reacción y el contraste acromático para entender las bases neurales de aquellos; midieron los tiempos de reacción usando rejillas sinusoidales en un amplio rango de contrastes y obtuvieron, al representarlos en función del inverso de contraste, una función lineal en algunas condiciones y bilineal en otras. Estas funciones bilineales representan la actividad de los dos mecanismos, la vía magnocelular y la vía parvocelular. Aplicando los resultados de Murray y Plainis a las condiciones experimentales de nuestro estudio, que pueden definirse a groso modo como una frecuencia espacial menor de un ciclo/grado y un nivel de contraste cercano al umbral, encontramos que en esta situación el sistema de procesamiento visual que actúa es el magnocelular.

1.2. Tiempo de reacción:

El tiempo de reacción es el tiempo transcurrido desde la presentación de un estímulo hasta que se produce una respuesta. En el caso del tiempo de reacción visual lo podemos definir como la suma de la latencia visual (tiempo desde que llega un estímulo luminoso al ojo hasta su percepción) y la componente motora (respuesta motora del sujeto).

El tiempo de reacción tiene una relación directa con la conducción, por la velocidad de respuesta del conductor ante la aparición de un obstáculo, como un peatón o un animal. Estos datos además se pueden traducir fácilmente a distancia de frenado, lo que demuestra su utilidad para la prevención de accidentes.³

Existen numerosas variables que intervienen en el tiempo de reacción; unas propias del estímulo, como son el contraste, la luminancia, la frecuencia espacial o la excentricidad a la que se presenta, y otras propias del sujeto, tales como el estado ocular y refractivo, la fatiga, la atención o la movilidad. Sin

embargo, algunos estudios sostienen que en condiciones mesópicas el tiempo de reacción es independiente de la excentricidad.³

Es importante también mencionar la dependencia funcional del tiempo de reacción con el contraste del estímulo, siendo ambas variables inversamente proporcionales entre sí. Es lo que se conoce como ley de Pieron.¹⁻⁵

La medida de los tiempos de reacción se ha utilizado también como método para investigar la sensibilidad espectral del sistema visual bajo condiciones mesópicas.²

1.3. Contraste umbral:

Se define como contraste umbral de cada individuo aquel contraste que es capaz de percibir un 50% de las veces que se le presenta. Debido al deterioro del sistema visual, parece obvio que el contraste umbral aumenta con la edad, es decir, una persona de mayor edad necesita de un contraste mayor que un sujeto joven para detectar un estímulo dado.

El contraste puede ser de luminancia o de longitud de onda, en este estudio utilizamos lámparas acromáticas por lo que hablamos del contraste de luminancia entre el estímulo y el fondo, que definimos con la fórmula de Weber como:

$$C = \frac{\Delta L}{L_b}$$

donde C es el contraste de Weber, ΔL es la diferencia entre la luminancia del fondo y la del estímulo, y L_b es la luminancia de fondo (background).

En las situaciones de conducción, los objetos de interés son generalmente reconocidos por la diferencia de color y/o contraste con el entorno; durante la conducción nocturna, la visión del color es pobre, por lo que el contraste de luminancia es el principal factor en la detección de obstáculos.

Algunos estudios demuestran que hay varios factores que influyen significativamente en los umbrales de contraste bajo condiciones mesópicas en retina periférica, como la edad de los sujetos, la luminancia del fondo o la distribución espectral de la lámpara.⁶

1.4. Estado del arte:

Se han realizado numerosos estudios relacionados con la visión y el tiempo de reacción.

En 1997, He y Rea² evaluaron la eficacia de las fuentes de luz en condiciones mesópicas utilizando tiempos de reacción. Estudiaron lo que ocurre en el eje visual y fuera de éste, concluyendo que en el eje visual la sensibilidad espectral está bien definida por la curva $V(\lambda)$ en cualquier nivel de iluminación, mientras que fuera del eje es muy diferente, por debajo de 1 cd/m² los bastones empiezan a actuar y la sensibilidad espectral de la retina periférica cambia. También llegaron a la conclusión de que las lámparas de halógenos

metálicos (HM) pueden ser más eficientes que las de sodio de alta presión (HPS) en los niveles de iluminación típicos de carretera.

Plainis y Murray³, estudiaron el tiempo de reacción como un índice de percepción visual al conducir por la noche; midieron los tiempos de reacción en un amplio rango de contrastes, luminancias y frecuencias espaciales que se encuentran comúnmente en el mundo real, e interpretaron los datos en términos de rendimiento visual al conducir. Concluyeron que al disminuir el contraste y la luminancia se da un aumento en el tiempo de procesamiento, y que éste también aumenta considerablemente en la periferia cercana, lo cual es importante en la conducción ya que los objetos más inesperados se detectan cuando están en la periferia.

Como se menciona en el primer apartado de este capítulo, Plainis y Murray¹ también realizaron un estudio sobre las bases neurales del tiempo de reacción, llegando a la conclusión de que las situaciones de contraste y frecuencias espaciales bajas están mediadas por la vía de procesamiento visual magnocelular, mientras que en altos contrastes y frecuencias espaciales mayores ésta vía se satura y pasa a actuar la vía parvocelular. Sin embargo también hay situaciones en las que obtienen una función lineal, lo que indica que solo actúa uno de los dos mecanismos en todo el rango de contraste, que será uno u otro dependiendo de las condiciones del estímulo.

Otro estudio⁵ caracteriza la sensibilidad espectral mesópica mediante tiempos de reacción, y compara dos modelos de sensibilidad espectral mesópica: la combinación de $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$, y el que incluye el mecanismo de color oponente de los conos.

En 2009, se estudiaron los efectos del contraste, la excentricidad y la posición de los estímulos en la detección de los mismos en humanos.⁷ Los resultados que obtuvieron demuestran que el contraste es la variable que más influye en los tiempos de reacción; los tiempos de reacción mayores se obtuvieron con el menor contraste y la mayor excentricidad, mientras que con los contrastes medio y alto no hubo diferencias entre las excentricidades utilizadas. En cuanto a la posición, observaron que no influye en la detección del estímulo cuando la excentricidad es de un valor medio, pero sí es una variable crítica, junto con el contraste, en las excentricidades menor y mayor. Esto demuestra que la distancia del estímulo al punto de fijación influye significativamente en la detección de los estímulos.

Más recientemente, Cengiz⁸ midió los tiempos de reacción en condiciones mesópicas para estimar el campo visual de adaptación. Concluye que la distribución de la luminancia del fondo y la del estímulo afectan significativamente al tiempo de reacción en fondos no uniformes, y que el campo de adaptación cubre un área de -75° a $+75^\circ$. También compara distintos patrones de luminancia (elíptico, escena de carretera y con la forma del parabrisas) y encuentra que el campo visual funcional es elíptico.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Este trabajo se basa en la hipótesis de que las prestaciones del sistema visual, tanto en detección de umbrales como en tiempo de reacción disminuyen con la edad pero de diferente forma para cada tipo de iluminante urbano, y por lo tanto no todos los tipos son igual de eficientes desde el punto de vista de las prestaciones visuales.

El objetivo general del trabajo es comparar la eficiencia de dos tipos de iluminantes urbanos (sodio de alta presión y halogenuros metálicos) en personas de distintas edades mediante la medición de los umbrales de contraste y los tiempos de reacción, dos tareas visuales muy diferentes entre sí, todo ello dentro del rango de iluminación mesópica, que es la que se da durante la conducción nocturna.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar el espectro de emisión de los iluminantes urbanos de sodio de alta presión (HPS) y halogenuros metálicos (HM).
- Comparar los umbrales de detección y los tiempos de reacción ante estímulos supraumbrales a 10^0 de excentricidad retiniana en función de la luminancia en el rango mesópico.
- Comparar los umbrales de detección y los tiempos de reacción ante estímulos supraumbrales a 10^0 de excentricidad retiniana en función del tipo de iluminante urbano.
- Comparar los umbrales de detección y los tiempos de reacción ante estímulos supraumbrales a 10^0 de excentricidad retiniana en función de la edad.
- Analizar las interacciones entre las distintas variables del estudio.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Montaje experimental:

El montaje utilizado es un sistema óptico Maxwelliano de dos canales.⁹ Consta de una lámpara (S) y una serie de lentes (L) y espejos (E) que forman la imagen de la fuente sobre el plano pupilar del observador; estas lentes están colocadas en dos haces de luz, uno que forma la prueba (2° , línea azul oscura) y otro el campo de adaptación (10° , línea azul claro). Además de las lentes, en los dos haces de luz se han colocado varios filtros de densidad neutra (F) para poder controlar la luminancia del fondo y el estímulo, y obturadores (Ob) que controlan la salida de los haces de luz.

Como test de fijación para los sujetos se utiliza un punto láser rojo situado angularmente respecto al sujeto de forma que el test y el campo de adaptación queden con una excentricidad de 10° . El sistema consta también de una cámara CCD utilizada para el centrado de los sujetos.

Las líneas roja y naranja representan los test de fijación para las medidas foveal y excéntrica, respectivamente.

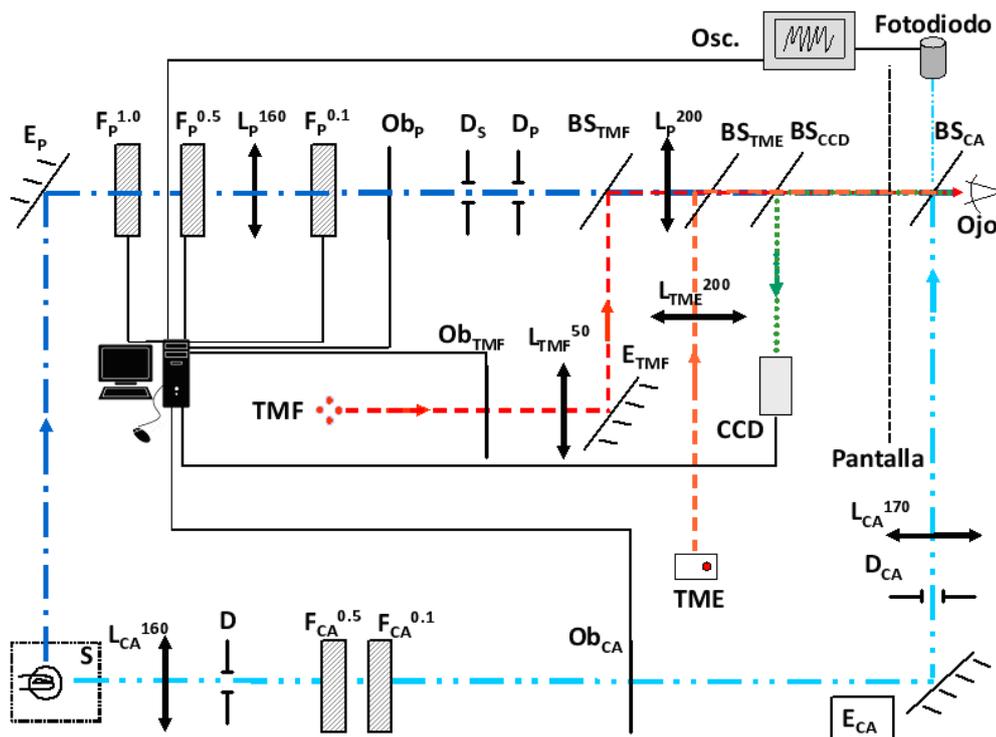


Figura 1. Esquema del montaje experimental.

3.2. Medida de espectros:

En este estudio se van a utilizar dos tipos de iluminantes usados en el alumbrado público durante la noche: una lámpara de sodio de alta presión (HPS) y una de halogenuros metálicos (HM). Las dos tienen una diferente

distribución espectral, y por tanto, un diferente cociente S/P, definido este como la luminancia escotópica entre la luminancia fotópica.

La distribución espectral de las lámparas es importante ya que la sensibilidad espectral del sistema visual humano no es igual en el rango fotópico, mesópico o escotópico. Las curvas de sensibilidad espectral fotópica y escotópica, $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ respectivamente, son las siguientes:

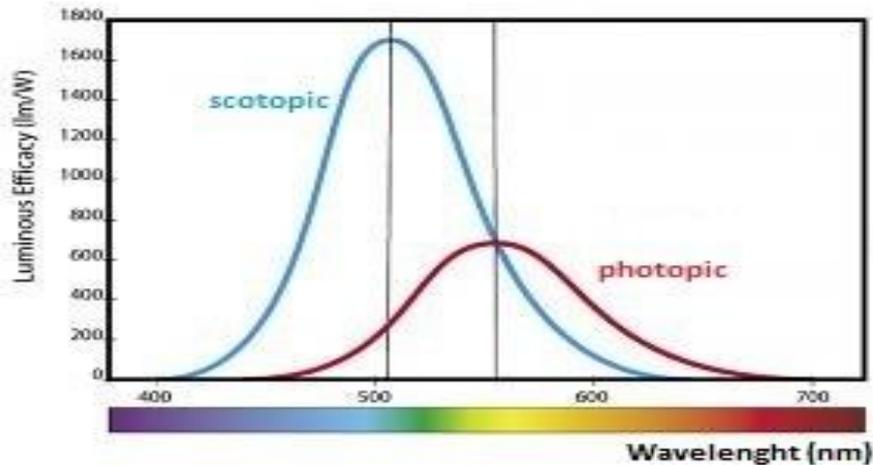


Figura 2. Curvas de sensibilidad espectral fotópica y escotópica.
<http://recuerdosdepondora.com/ciencia/fisica/el-efecto-purkinje-como-ve-nuestro-ojo-en-la-oscuridad/>

La curva de sensibilidad espectral mesópica está menos definida, pero se suele aceptar que va cambiando gradualmente de la fotópica a la escotópica.

Se realizó la medida de los espectros de las dos lámparas que se utilizan en el estudio con un espectrómetro, y se obtuvieron las siguientes gráficas de irradiancia espectral normalizada a su máximo:

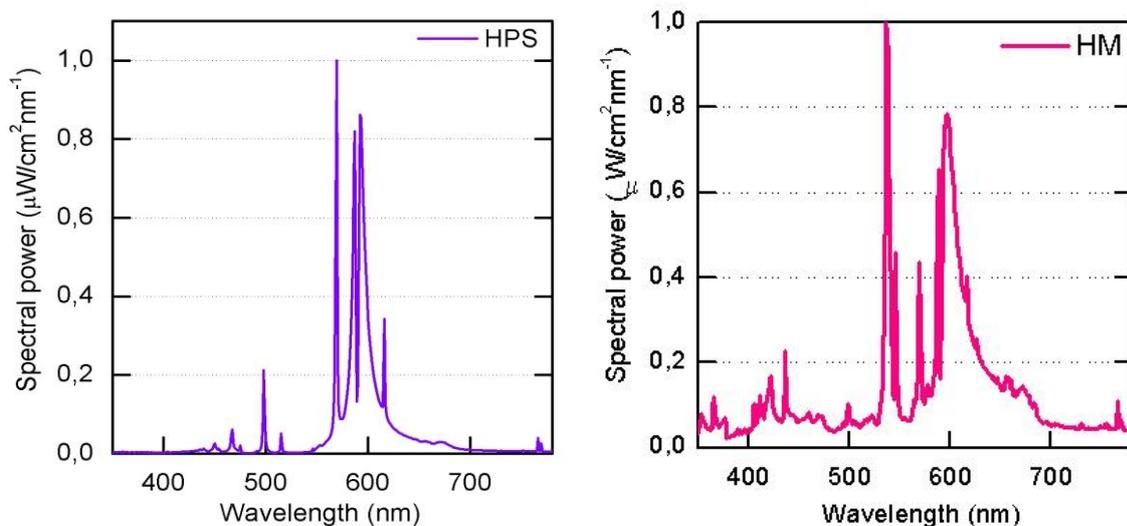


Figura 3. Espectros de las lámparas HPS y HM.

Se puede observar que la lámpara de sodio de alta presión emite principalmente en torno a los 600 nm (luz amarilla) y muy poco en las demás longitudes de onda, mientras que los halógenos metálicos aunque los mayores picos también están en torno a 500-600nm, emiten más en el resto de longitudes de onda.

3.3. Determinación psicofísica de umbrales:

Para medir el contraste umbral el sujeto al que se le va a realizar la medida realiza un periodo de adaptación a la oscuridad de 30 minutos, tras el cual se coloca un parche en el ojo izquierdo para que la prueba sea monocular y se sitúa frente al montaje. Para evitar movimientos del sujeto, éste debe sujetar un mordedor que previamente se ha colocado de forma que su ojo derecho quede alineado con el sistema óptico y esté en el plano donde se forma la imagen de la fuente luminosa.

Una vez colocado se proyecta un campo de adaptación a 10° de excentricidad retiniana durante 3 minutos, con la luminancia fotópica seleccionada (entre 3.4 y 0.01 cd/m^2), que se comprueba previamente con un luminancímetro y se transforma en luminancia mesópica mediante el modelo MES2 de la CIE¹⁰; como la curva de sensibilidad espectral mesópica varía gradualmente de la escotópica a la fotópica, la luminancia mesópica depende del valor S/P de cada lámpara. Después de esta adaptación se presenta un pulso luminoso ("prueba") de luminancia variable sobre el campo de adaptación. El sujeto debe responder si ha detectado la prueba o no; variando la luminancia de la prueba mediante filtros de densidad neutra se determina el umbral de contraste mediante el método de límites, que consiste en disminuir el contraste entre la prueba y el campo de adaptación hasta que el sujeto no lo perciba, después aumentarlo hasta que lo vuelva a detectar, y repetir la misma operación varias veces (aumentar y disminuir el contraste) hasta poder determinar dónde está el umbral, por el promedio de luminancias donde se produce la transición SI-NO o NO-SI.

3.4. Medida de tiempos de reacción:

Para la medida de los tiempos de reacción se realiza el mismo proceso de adaptación a la oscuridad (30 minutos) y al campo de adaptación (3 minutos) que en la medida del umbral. Tras la adaptación se presentan pulsos luminosos en el centro del campo de adaptación con un contraste supraumbral aleatorio entre cinco seleccionados previamente y aparecerán en un tiempo también aleatorio entre 4 y 8 segundos respecto de una señal sonora. El sujeto debe pulsar un joystick en el momento en que ve el estímulo, el tiempo transcurrido entre la presentación del estímulo y la pulsación del joystick es el tiempo de reacción para ese estímulo. Si el sujeto tarda más de 2 segundos en

Benito M.

Medida de tiempos de reacción y umbrales de contraste para distintos grupos de edad y distintos iluminantes urbanos

pulsarlo, se descarta esa medida y se vuelve a presentar el estímulo, al igual que si pulsa demasiado pronto. El contador de tiempo tiene una precisión de 1 ms.

Durante la prueba varios obturadores se abren y cierran de forma aleatoria para evitar que el sujeto se guíe por el sonido para saber cuándo va a aparecer el estímulo, de esta forma siempre oírás varios sonidos pero no sabrás en qué momento aparecerá el estímulo luminoso.

Los estímulos de cada contraste se presentan 20 veces cada uno, lo que hace un total de 100 medidas con las que se obtiene el tiempo de reacción visual para cada contraste. Esta medida se repite con tres luminancias del campo de adaptación (0.01 cd/m^2 , 0.1 cd/m^2 y 1 cd/m^2) y para las dos lámparas (HPS y HM).

La medida del umbral de contraste sirve también como entrenamiento para el sujeto, de forma que ve cómo va a ser la prueba de la medida del tiempo de reacción.

Las medidas se realizan en dos sesiones, una con cada iluminante, de unos 60 minutos cada una. En cada sesión se determina el umbral de detección y el tiempo de reacción, de forma que sólo es necesario un periodo de adaptación por sesión.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Contraste umbral:

Se han analizado los contrastes umbrales para las tres luminancias seleccionadas y para los distintos grupos de edad. Los resultados obtenidos son diferentes para cada uno de los dos iluminantes utilizados.

Para las dos lámparas el contraste umbral es mayor para las luminancias menores en todos los grupos de edad; es decir, se necesita un mayor contraste para detectar un estímulo cuando estamos en situaciones de menor luminancia de fondo.

Para la lámpara HPS no se han encontrado diferencias significativas entre los grupos de edad, como se ve en la Figura 4a. Esto significa que con este tipo de iluminante la capacidad de las personas para detectar un estímulo no depende de su edad.

Los resultados de la lámpara HM, sin embargo, sí revelan diferencias significativas entre los grupos de edad, como muestra la Figura 4b. En general, para todas las luminancias de fondo, el grupo de menor edad muestra los umbrales de contraste más bajos, y el grupo de mayor edad, los más elevados. Esta diferencia se observa sobre todo en la menor luminancia de fondo estudiada, es decir, 0.01 cd/m²; las barras de error de la Figura 4b muestran que en el caso de las otras luminancias la diferencia de umbrales de contraste entre los grupos de edad no es estadísticamente significativa. Esto quiere decir que en bajas luminancias y con este tipo de iluminante las personas jóvenes necesitan de un contraste menor para detectar un estímulo que aquellas de mayor edad.

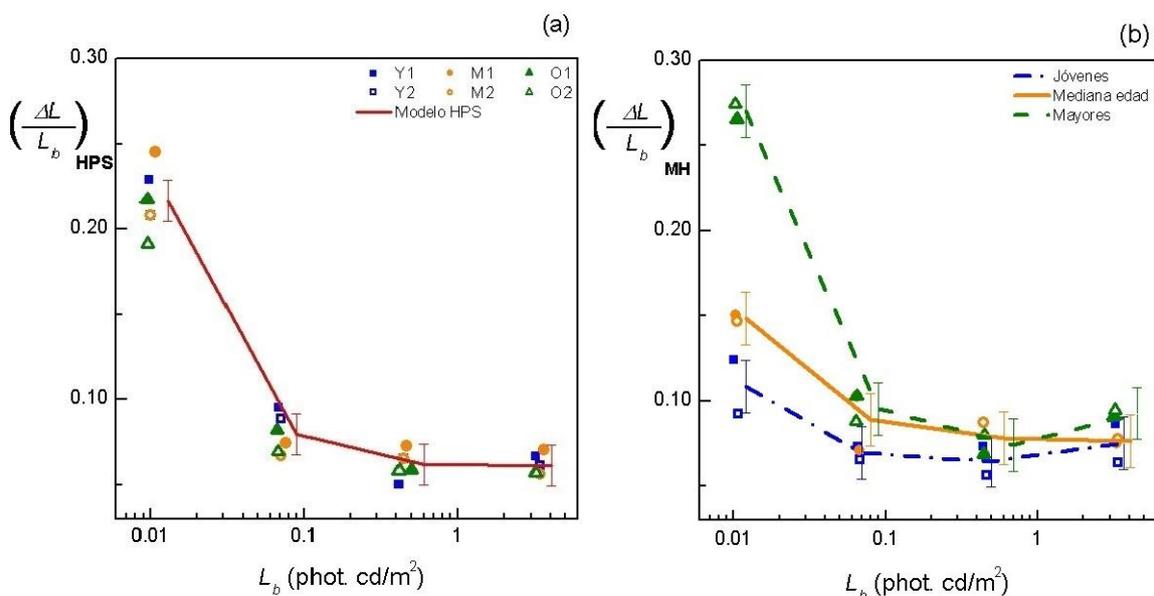


Figura 4. Contrastes mesópicos para las lámparas HPS (a) y HM (b), y para los diferentes grupos de edad.

4.2. Tiempos de reacción:

A la vista de los resultados sobre el contraste umbral, para el tiempo de reacción sólo vamos a considerar aquellos tiempos medidos para una luminancia de fondo de 0.01 cd/m^2 , ya que es la única en la que la diferencia entre los grupos de edad es estadísticamente significativa.

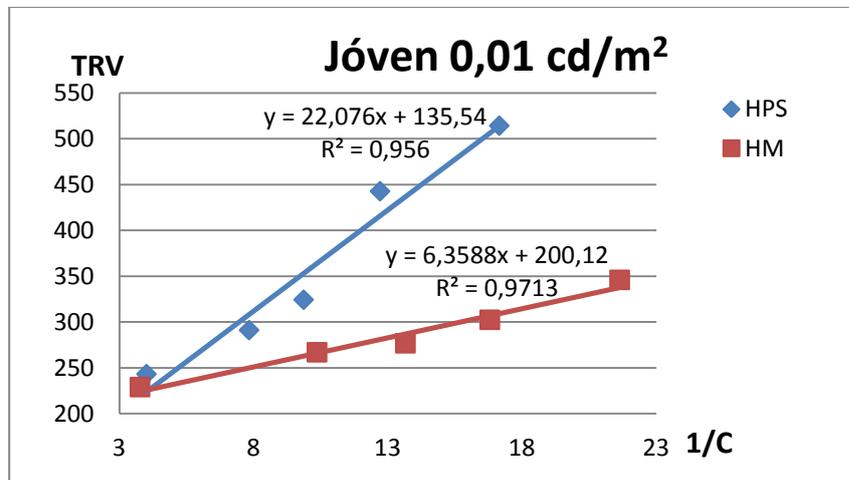


Figura 5. Tiempos de reacción para un sujeto joven con una luminancia de 0.01 cd/m^2 .

La Figura 5 muestra los resultados para un sujeto joven, representando el tiempo de reacción visual (TRV) frente al inverso del contraste utilizado ($1/C$). Podemos observar que, para un contraste supraumbral dado, el tiempo de reacción es menor para la lámpara de halógenos metálicos, es decir, tarda menos tiempo en detectar un estímulo con dicho iluminante que con el de sodio de alta presión.

Para un individuo de edad mediana los tiempos de reacción obtenidos son siempre mayores que los del sujeto joven, pero la comparación entre las dos lámparas también nos muestra un tiempo de reacción menor en la de HM para un contraste supraumbral dado. Podemos ver esto en la Figura 6:

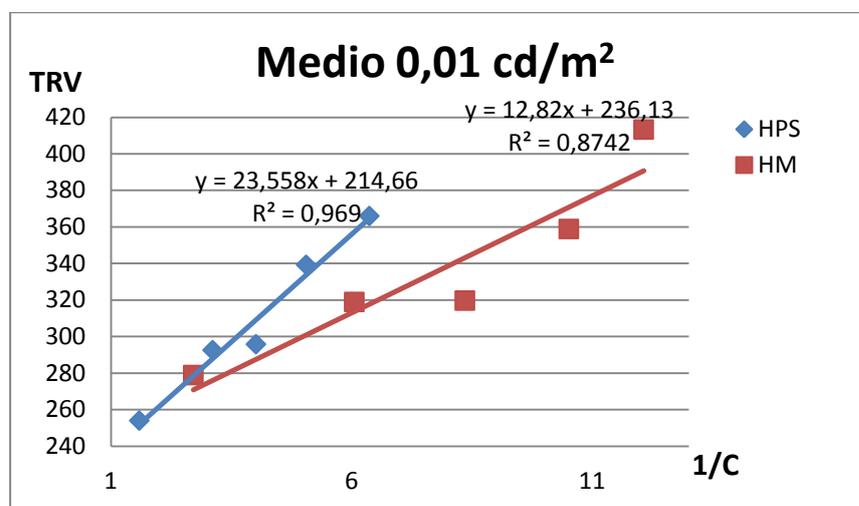


Figura 6. Tiempos de reacción para un sujeto de edad intermedia con una luminancia de 0.01 cd/m^2 .

Sin embargo, la gráfica realizada con las medidas de un sujeto de edad avanzada (Figura 7) nos muestra una tendencia a tiempos de reacción similares para las dos lámparas. Además, si lo comparamos con los datos de los otros dos individuos vemos que los tiempos de reacción son mucho mayores para las dos lámparas, es decir, el sujeto de edad avanzada necesita más tiempo para detectar un estímulo sea cual sea el iluminante utilizado.

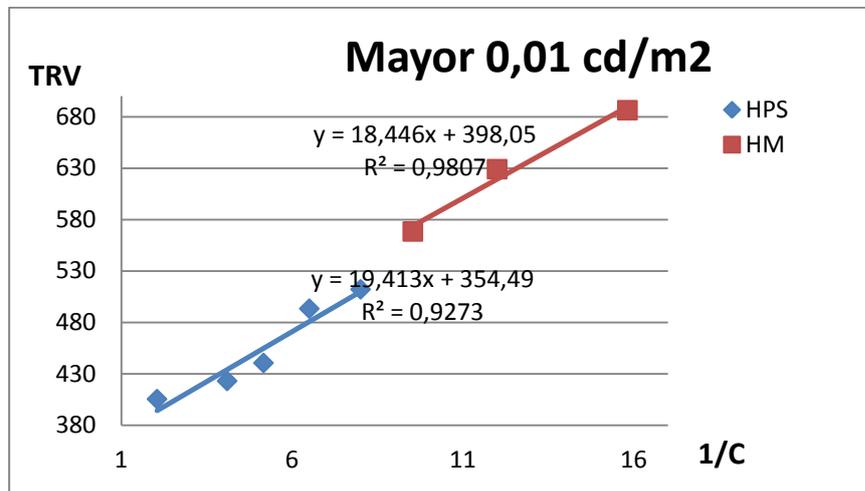


Figura 7. Tiempos de reacción para un sujeto de edad avanzada con una luminancia de 0.01 cd/m².

El primer término de las ecuaciones del ajuste lineal de cada gráfica corresponde a la pendiente de dicho ajuste, mientras que el segundo término indica el tiempo de reacción motor. En la Tabla 1 se muestran los tiempos de reacción motores con dos desviaciones estándar (representan el 95% del intervalo de confianza). Como es obvio, el tiempo de reacción motor va aumentando con la edad de los sujetos, y es independiente de la lámpara utilizada (no hay diferencias significativas entre una y otra lámpara dentro de cada grupo).

	Tiempo motor	
	HPS	HM
Jóvenes	135,54 ± 59,6	200,12 ± 18,4
Medianos	214,66 ± 21,5	236,13 ± 47,2
Mayores	398,05 ± 39,8	354,49 ± 56,7

Tabla 1. Tiempo motor de los sujetos.

En cuanto a la ganancia de contraste, la obtenemos mediante la inversa de la pendiente del ajuste lineal de cada gráfica¹, los datos que se muestran en la Tabla 2 con dos desviaciones estándar representan el intervalo de confianza al 95% de los valores obtenidos. No se observan diferencias significativas entre las ganancias de contraste de los tres grupos para la lámpara HPS, pero sí

Benito M.

Medida de tiempos de reacción y umbrales de contraste para distintos grupos de edad y distintos iluminantes urbanos

para la lámpara HM, en la cual el grupo de menor edad muestra una ganancia de contraste mayor. Si comparamos los dos iluminantes entre si dentro de cada grupo de edad se puede observar que la diferencia de ganancia de contraste disminuye a medida que aumenta la edad de los sujetos, en los jóvenes y los de edad media es mayor para HM, habiendo mucha más diferencia en el grupo de los jóvenes, mientras que en los mayores no se encuentran diferencias.

	Ganancia de contraste	
	HPS	HM
Jóvenes	0,05 ± 0,013	0,16 ± 0,032
Medianos	0,04 ± 0,008	0,08 ± 0,034
Mayores	0,05 ± 0,016	0,05 ± 0,013

Tabla 2. Ganancias de contraste.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

Las diferencias encontradas en los resultados de contraste umbral entre los dos iluminantes pueden explicarse por los diferentes ratios S/P de estos. Como se puede observar en las gráficas de las medidas espectrales de las lámparas (Figura 3), la lámpara HM emite más luz en las longitudes de onda azules (alrededor de 500 nm) que la lámpara HPS; estas longitudes de onda azules son las que provocan una mayor respuesta de los bastones, cuya máxima sensibilidad se encuentra en unos 510 nm, por esta razón cuando los fotorreceptores que actúan son los bastones los sujetos necesitan un contraste menor para detectar un estímulo ante la lámpara HM que ante la de HPS. Esta situación de predominancia de los bastones es la que se da cuando nos encontramos en luminancias de 0.01 cd/m^2 que es, precisamente, en la que se han encontrado diferencias entre las lámparas.

El razonamiento anterior nos explica la diferencia de contraste umbral entre las lámparas obtenida en el caso de los dos grupos de menor edad, en los que no se percibe aún el efecto del envejecimiento ocular (se estima que empieza a notarse a partir de los 60 años, o de los 50 años en el rango mesópico¹¹), aunque sí se puede ver que la diferencia entre las lámparas es algo menor en el grupo mediano que en el joven.

Para el grupo de edad mayor, sin embargo, no se encuentran apenas diferencias entre ambos iluminantes. Este hecho se debe a que la opacificación de los medios oculares que aparece de forma fisiológica con la edad provoca una dispersión de la luz en el interior del globo ocular. Dicha dispersión produce una disminución de la sensibilidad al contraste, pero al estar en condiciones de baja luminancia y ser, por tanto, los bastones los que actúan, la disminución de sensibilidad al contraste será mayor cuando se trate de luces que estimulen más a los bastones. Por tanto, la lámpara HM produce una mayor disminución de la sensibilidad al contraste en este grupo de edad; este hecho se contrarresta con la mayor estimulación de los bastones por parte de la lámpara HM sobre la de HPS, resultando en un contraste umbral mayor para HM que para HPS (al contrario que en los otros grupos de edad), pero sin diferencias significativas. La dispersión de la luz solamente afecta a los bastones ya que estos no tienen sensibilidad direccional, mientras que los conos están orientados hacia el centro pupilar (efecto Stiles-Crawford) y solamente reaccionan ante la luz proveniente de ese punto.

En cuanto a los resultados del tiempo de reacción, es lógico que la parte motora sea independiente del tipo de iluminante utilizado y mayor cuanto mayores sean los sujetos debido a la pérdida de agilidad y dificultad de movimientos que se adquieren con la edad. Los resultados de la parte visual del tiempo de reacción relacionados con la ganancia de contraste, sin embargo, no resultan tan obvios y siguen, de hecho, en estudio.

Es de destacar el hecho de que los dos grupos de menor edad presenten tiempos de reacción menores con la lámpara HM, mientras que el grupo de mayores no muestra diferencias de tiempo de reacción entre una lámpara y otra. Esto podría explicarse quizá por los mismos motivos que las diferencias de contraste umbral encontradas entre los grupos de edad, es decir,

por la diferente distribución espectral de las lámparas y la dispersión provocada por los medios oculares, sin embargo harían falta más medidas en el grupo de mayor edad para poder obtener resultados más fiables, ya que de la lámpara HM sólo tenemos tres valores para este grupo.

También son significativas las diferencias encontradas en la ganancia de contraste. Para el iluminante de HPS todos los sujetos presentan la misma ganancia de contraste, es decir, los cambios de contraste les afectan por igual a todos en cuanto a la percepción de un estímulo dado. No ocurre lo mismo con la lámpara HM en la que los jóvenes presentan una ganancia de contraste significativamente mayor que la del grupo de mayores, esto quiere decir que con este iluminante los jóvenes son más sensibles a los cambios de contraste. La disminución de sensibilidad al contraste con la edad se da por la dispersión, como se ha explicado anteriormente, lo que no está aún claro es porqué esto ocurre solamente con uno de los dos iluminantes.

En la Tabla 2 también observamos que la diferencia de ganancia de contraste entre un iluminante y otro es mucho mayor en los sujetos jóvenes, y disminuye hasta anularse en el grupo de mayor edad. Es decir, los sujetos mayores no notan diferencias entre las lámparas en cuanto a la sensibilidad al contraste, mientras que los jóvenes son más sensibles a los cambios de contraste con una iluminación de HM.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Las conclusiones referentes al contraste umbral son las siguientes:

- Para los dos tipos de iluminante, todos los sujetos y dentro del rango mesópico, el contraste umbral es mayor en bajas luminancias.
- En relación al tipo de iluminante, sólo hay diferencias significativas en bajas luminancias, siendo el contraste umbral mayor en el iluminante HPS para los dos grupos de menor edad; esto se debe a la diferencia de composición espectral de los iluminantes y a la mayor sensibilidad de los bastones a las longitudes de onda más cortas de la lámpara HM. El grupo de mayores no encuentra apenas diferencia entre los iluminantes debido a la dispersión que provocan los medios oculares.
- La variable edad no influye en los umbrales de contraste de HPS (no hay diferencias significativas entre los tres grupos), pero sí en HM, siendo significativo sólo en bajas luminancias, en las que los umbrales de contraste de los jóvenes son menores que los de los mayores.

En cuanto al tiempo de reacción, habiéndolo analizado solamente en bajas luminancias, concluimos lo siguiente:

- La parte motora aumenta con la edad independientemente del tipo de iluminante utilizado, por lo que el tiempo de reacción total también aumenta con la edad.
- La ganancia de contraste parece depender de la edad para la lámpara HM y no para la lámpara HPS, colaborando a la reducción de los tiempos de reacción para los sujetos más jóvenes.

Por tanto, en términos de eficiencia de los iluminantes en el rango mesópico que correspondería a una situación de conducción nocturna, podemos concluir que para las personas jóvenes y de edad media es más eficiente el iluminante HM, ya que proporciona un contraste umbral y unos tiempos de reacción menores, es decir, los sujetos necesitan menos contraste para detectar un obstáculo y reaccionarán ante él de forma más rápida que si éste estuviera iluminado con la lámpara de HPS.

Para los sujetos de mayor edad, sin embargo, resultan igual de eficientes ambas lámparas.

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

1. Murray IJ, Plainis S. Contrast coding and magno/parvo segregation revealed in reaction time studies. *Vision Research*. 2003;43:2707-2719.
2. He Y, Rea M, Bierman A, Bullough J. Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. *J. Illum Eng Soc*. 1998;26:125-138.
3. Murray IJ, Plainis S. Reaction times as an index of visual conspicuity when driving at night. *Ophthal Physiol Opt*. 2002; 22:409-415.
4. Murray IJ, Plainis S. Neurophysiological interpretation of human visual reaction times: effect of contrast, spatial frequency and luminance. *Neuropsychologia*. 2000; 38:1555-1564.
5. Walkey HC, Harlow JA, Barbur JL. Characterising mesopic spectral sensitivity from reaction times. *Vision Research*. 2006; 46: 4232-4243.
6. Arranz I, Issolio L, Matesanz BM, Gloriani AH, Menéndez JA, Silva B, Colombo E, Mar S, Aparicio JA. Influence of age on mesopic sensitivity measured with different urban lamps. *Enviado a Ophthalmics & Physiological Optics*. 2016.
7. Mancebo Azor R, Sáez Moreno JA, Dominguez Hidalgo I, Luna del Castillo JD, Rodríguez Ferrer JM. Efectos del contraste, excentricidad y posición en la detección de estímulos visuales en humanos. *Rev Neurol*. 2009; 48:129-133.
8. Cengiz C, Piolakka M, Halonen L. Reaction time measurements under mesopic light levels: Towards estimation of the visual adaptation field. *Lighting Res Technol*. 2014; 0:1-17.
9. Matesanz BM, Issolio L, Arranz I, de la Rosa C, Menéndez JA, Mar S, Aparicio JA. Temporal retinal sensitivity in mesopic adaptation. *Ophthalmic & Physiological Optics*. 2011; 31:615-624.
10. Commission Internationale de l'Éclairage. Recommended System for Visual Performance Based Mesopic Photometry. CIE Publication 191. Vienna: CIE, 2010.
11. Puell MC, Palomo C, Sánchez-ramos C, Villena C. Normal values for photopic and mesopic letter contrast sensitivity. *Journal of Refractive Surgery*. 2004; 20: 1-6.