



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA ATÓMICA Y ÓPTICA

TESIS DOCTORAL:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA LUMINANCIA AMBIENTAL SOBRE LA MEDIDA DE LA SENSIBILIDAD AL CONTRASTE DE LETRAS

Presentada por Isabel Arranz de la Fuente para optar al grado de
Doctora por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Juan Antonio Aparicio Calzada
Luis Alberto Issolio
Santiago Mar Sardaña

Autorizaciones de los directores de Tesis

D. Santiago Mar Sardaña, Catedrático de Universidad adscrito al área de Óptica, en el Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica de la Universidad de Valladolid, como Director de la Tesis Doctoral titulada “Estudio de la influencia de la luminancia ambiental sobre la medida de la sensibilidad al contraste de letras” realizada por Isabel Arranz de la Fuente

Autoriza:

Que esta memoria sea presentada por la interesada para optar al grado de Doctora en Ciencias, sección de Físicas, considerando que el trabajo realizado, posee las suficientes aportaciones e interés para que pueda ser aceptado como Tesis Doctoral.

Valladolid, Septiembre de 2010.

Fdo: Santiago Mar Sardaña

ILMO: SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE DOCTORADO

Autorizaciones de los directores de Tesis

D. Juan Antonio Aparicio Calzada, Titular de Universidad, adscrito al área de Óptica, en el Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica de la Universidad de Valladolid, como Director de la Tesis Doctoral titulada “Estudio de la influencia de la luminancia ambiental sobre la medida de la sensibilidad al contraste de letras” realizada por Isabel Arranz de la Fuente

Autoriza:

Que esta memoria sea presentada por la interesada para optar al grado de Doctora en Ciencias, sección de Físicas, considerando que el trabajo realizado, posee las suficientes aportaciones e interés para que pueda ser aceptado como Tesis Doctoral.

Valladolid, Septiembre de 2010.

Fdo: Juan Antonio Aparicio Calzada

ILMO: SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE DOCTORADO

Autorizaciones de los directores de Tesis

D. Luis Alberto Issolio, Profesor del Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad de Tucumán, Argentina, como Director de la Tesis Doctoral titulada “Estudio de la influencia de la luminancia ambiental sobre la medida de la sensibilidad al contraste de letras” realizada por Isabel Arranz de la Fuente

Autoriza:

Que esta memoria sea presentada por la interesada para optar al grado de Doctora en Ciencias, sección de Físicas, considerando que el trabajo realizado, posee las suficientes aportaciones e interés para que pueda ser aceptado como Tesis Doctoral.

Valladolid, Septiembre de 2010.

Fdo: Luis Issolio

ILMO: SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE DOCTORADO

A Juan

Hasta no hace muchos años, tener el título de Diplomado era un handicap para la investigación, pero no por ello aquellos que tuvimos oportunidad nos quedamos ajenos a este mundo; esta memoria es un ejemplo, al menos en su parte inicial. El primer trabajo que se presenta no se engendró como uno de los experimentos de la tesis, sino como un trabajo que suscitaba interés entre los miembros del equipo; por entonces no me podía plantear el realizar una tesis doctoral. Fue un poco más adelante cuando la ley permitió la realización de la misma y surgió la posibilidad de embarcarse en este viaje. Los capitanes del barco, Santiago, Apa y Luis han sido y son el ejemplo que a mi me gustaría seguir. Me han transmitido valores como el esfuerzo y la profesionalidad que los caracteriza y cada uno de ellos ha aportado a este proyecto su toque especial: la meticulosidad de Apa, la amplia visión de Santiago y la experiencia en psicofísica de Luis. Todo ello me ha generado confianza y seguridad a la hora de realizar este trabajo. Gracias por vuestro esfuerzo y cariño, me siento muy afortunada por teneros como maestros y como compañeros. Espero que continuemos en la misma embarcación y con el mismo destino.

Sin duda alguna, merece una mención especial la persona que puso los cimientos y fue sin duda el promotor, instigador, quizás sin saberlo, de este trabajo, Juan G. Vizmanos.

Asimismo, quiero agradecer a José Antonio, participe de todo el análisis estadístico de los resultados, así como profesor particular de estadística, quien ha dedicado un gran esfuerzo y mucho de su tiempo en esta tesis.

También me gustaría agradecer a Elisa su generosidad por permitirme realizar una estancia en la Universidad de Tucumán, Argentina.

A Alberto y a Ramón cuyas medidas previas sirvieron de referencia para la elaboración de las pruebas de sensibilidad al contraste. A Benjamín por sus clases de radiometría y fotometría. A los participantes, ¡que fueron muchos! y que de forma desinteresada y sin ningún tipo de contraprestación se ofrecieron voluntarios para participar en este proyecto. Sin ellos este trabajo no hubiera podido realizarse. Gracias a todas las que habéis pasado por el laboratorio echando una mano en las medidas, a Lidia, M^a Jesús Gutiérrez, Jennifer, Cristina y Beatriz. Gracias también a las Consejerías de Sanidad y de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León por la financiación recibida para la realización de este proyecto.

No puedo olvidar a Santiago González, que en el taller ha sido capaz de materializar las ideas que iban surgiendo para poner a punto el dispositivo experimental de los trabajos. Esteban, su eficacia en la gestión administrativa hace que las cosas más tediosas resulten incluso fáciles.

Merece un comentario el pasillo, donde a cada paso se respira ciencia, cada puerta del mismo está siempre abierta para preguntar, comentar, discutir y también para charlar. Ángel, gracias por mantenerte y hacer que todos nos mantengamos; Concha e Inma, las chicas, su ánimo, su preocupación, sus consejos dan otro color al pasillo y cómo no los del GOA que dan frescura al ambiente.

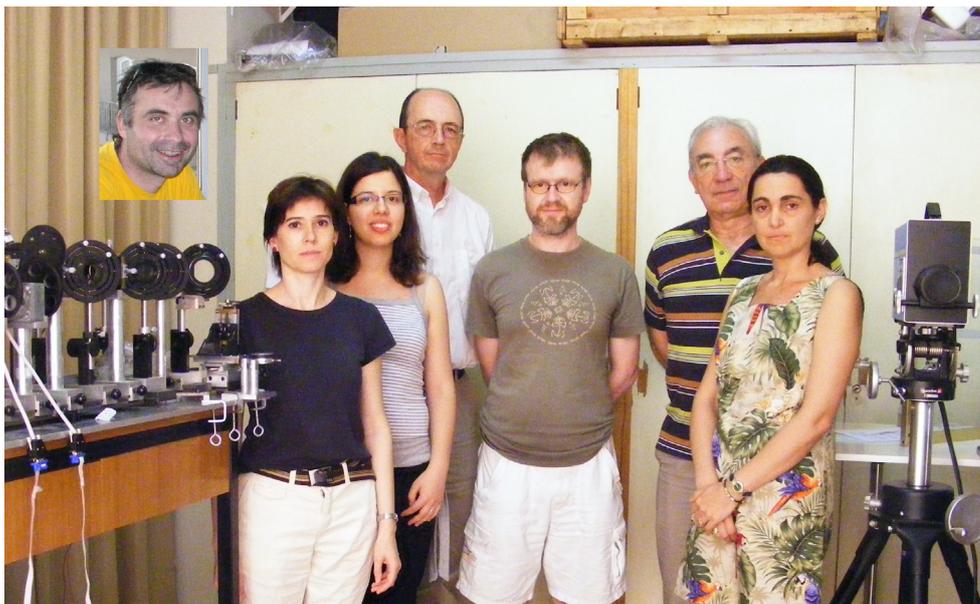
Quiero expresar mi agradecimiento a mi compañera Beatriz con la que he compartido... muchas cosas, parte de la trayectoria de nuestra carrera profesional,

muchos momentos, buenos, malos, sonrisas y lágrimas, sin duda es la compañera que a todo el mundo le gustaría tener. También a Cristina, que aunque se ha incorporado más tarde al Grupo ya es una parte importante del mismo.

Fuera del ámbito académico, a mis amigos entre los que incluyo a mis hermanos y por supuesto a mis padres, por creer y confiar en mí a pesar de no entenderme en muchas ocasiones, por ser tan buen ejemplo, la responsabilidad en el trabajo de mi padre y las ganas incesantes por aprender de mi madre, junto con su tolerancia son valores que he tenido la suerte de absorber desde niña.

A mis hijos, Irene y Marco, que han tenido que prescindir de horas de juego con mamá, a pesar de ello, su sonrisa ha estado presente en todo momento haciendo que el hecho de vivir sea un estímulo para luchar y continuar adelante. Chicos, espero veros siempre sonreír.

La persona que cobra más importancia y a la que más tengo que agradecer es, sin lugar a dudas, mi marido. Sin ti, sin tu apoyo, tu ánimo o tu aguante en los malos momentos, este trabajo no hubiera salido adelante. Gracias por encargarte de las intenciones de la casa y de la familia mientras yo estaba encerrada pasando horas, días, semanas y fines de semana delante del ordenador. Sabes que sin tu ayuda no podría presentar esta memoria.



La ciencia, a pesar de sus progresos increíbles,
no puede ni podrá nunca explicarlo todo.
Cada vez ganará nuevas zonas
a lo que hoy parece inexplicable.
Pero las rayas fronterizas del saber,
por muy lejos que se eleven,
tendrán siempre delante un infinito mundo de misterio.

Gregorio Marañón (1887-1960)

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	01
CAPÍTULO 1	
MARCO TEÓRICO	05
1.1 El sistema visual humano y el proceso de la visión	06
1.1.1 El procesado óptico	06
1.1.2 Aspectos básicos del procesado neural en la retina	08
1.1.3 Generalidades de la integración de la información visual en la corteza visual	11
1.2 Función de sensibilidad al contraste	13
1.2.1 La función de transferencia del sistema visual humano y los sistemas lineales	13
<i>El sistema visual humano como sistema lineal</i>	15
<i>Función de transferencia de modulación del sistema visual humano</i>	15
<i>Comportamiento general y parámetros que afectan a la función de sensibilidad al contraste (CSF)</i>	16
1.2.2 El sistema visual y el modelo de filtros espaciales	22
1.2.3 Modelos visuales para la evaluación de la CSF de redes	24
<i>Modelo de Watson y Ahumada</i>	24
<i>Modelo de Barten</i>	25
1.2.4 Reconocimiento de letras	27
<i>Letras supraumbral</i>	28
<i>Teorías del reconocimiento de letras de contraste umbral</i>	29
1.3 Iluminación y adaptación del sistema visual	31
1.3.1 Magnitudes radiométricas y fotométricas	31
1.3.2 Adaptación del sistema visual	33
<i>Adaptación a la oscuridad y umbral absoluto</i>	34
<i>Adaptación a la luz</i>	35
1.3.3 Deslumbramiento. Tipos	36
<i>Deslumbramiento molesto</i>	36
<i>Deslumbramiento incapacitante</i>	36
CAPÍTULO 2	
INFLUENCIA DE LA LUMINANCIA DE ENTORNO EN EL RECONOCIMIENTO DE LETRAS DE CONTRASTE UMBRAL PARA DISTINTOS TAMAÑOS ANGULARES	39
2.1 Motivación	40
2.2 Desarrollo del experimento	43
2.2.1 Sujetos	43
2.2.2 Dispositivo experimental	44
2.2.3 Calibración fotométrica de los dispositivos	46

	<i>Análisis de las derivas del sistema luminancímetro-lámpara (50 W)</i>	47
	<i>Análisis de las derivas de las lámparas 300 W</i>	48
	<i>Análisis de la homogeneidad espacial de la luminancia del test</i>	49
	<i>Análisis de la homogeneidad espacial de la luminancia del entorno</i>	50
2.2.4	Diseño de los optotipos	51
	<i>Calibración de contrastes</i>	51
	<i>Diseño de las letras de bajo contraste</i>	53
2.2.5	Procedimiento experimental	56
2.3	Análisis de los resultados	57
	Análisis de los efectos del tamaño de la pupila	64
2.4	Discusión	69
2.5	Conclusiones	72

CAPÍTULO 3

RELACIÓN DE LA LUMINANCIA DEL ENTORNO Y DEL TEST EN EL RECONOCIMIENTO DE LETRAS DE CONTRASTE UMBRAL

		73
3.1	Motivación	73
3.2	Desarrollo del experimento	76
	3.2.1 Sujetos	76
	3.2.2 Dispositivo experimental	77
	3.2.3 Calibración fotométrica de los dispositivos	77
	3.2.4 Diseño de los optotipos	77
	<i>Calibración de contrastes</i>	77
	<i>Diseño de las letras de bajo contraste</i>	78
	3.2.5 Procedimiento experimental	80
3.3	Análisis de los resultados y discusión	81
	3.3.1 Análisis del diámetro pupilar versus el logaritmo de las luminancias del entorno y del test	81
	3.3.2 Análisis de la influencia de la luminancia del entorno y del test en el logaritmo de la sensibilidad al contraste	84
	3.3.3 Interpretación de resultados	91
	<i>Aspectos ópticos que influyen en el $\Delta \log (CS)$</i>	91
	a.- Luminancia de velo	91
	b.- Asociación de la luminancia de velo y el diámetro pupilar	93
	<i>Aspectos neuronales</i>	94
	<i>Expresión del modelo psicofísico ajustado</i>	96
3.4	Conclusiones	98

CAPÍTULO 4:	
INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE COLOR EN EL RECONOCIMIENTO DE LETRAS DE CONTRASTE UMBRAL	101
4.1 Motivación	101
4.2 Desarrollo del experimento	104
4.2.1 Sujetos	104
4.2.2 Dispositivo experimental	104
4.2.3 Proceso de calibración	104
<i>Calibración de las lámparas incandescentes</i>	105
<i>Espectrofotometría de los filtros de densidad neutra</i>	109
<i>Luminaria de tipo fluorescente</i>	110
4.2.4 Diseño de los optotipos y procedimiento experimental	111
<i>Diseño de los optotipos</i>	111
<i>Procedimiento experimental</i>	112
4.3 Análisis y discusión de los resultados	114
4.4 Conclusiones	122
CONCLUSIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	125
ANEXO I	133
Hoja de información al candidato	134
Consentimiento informado	135
Cuestionario	136
Datos de evaluación visual	137

Introducción

El grupo de Iluminación y Visión del Departamento de Física Teórica Atómica y Óptica de la Universidad de Valladolid se formó hace unos diez años, tras la consolidación de los estudios de Óptica y Optometría en la Universidad de Valladolid. A partir de aquí, surgió una demanda en temas de investigación que condujo a la formación de un grupo estable de profesores que paulatinamente fueron aunando fuerzas hasta consolidar un grupo con líneas de investigación comunes.

Cuando en el 2003 me incorporé como Profesor Asociado a este Departamento, empezó mi andanza por la investigación en temas de psicofísica visual. Por aquel entonces, el Dr. Vizmanos tras dirigir la tesina titulada *Iluminación y medida de las funciones visuales*, ya había sembrado la semilla de la tesis doctoral que ha continuación se presenta. A raíz de dicha tesina, surgieron algunas dudas, razonables, no contempladas en la bibliografía que motivaron el desarrollo de los tres trabajos englobados en esta memoria.

Los trabajos comenzaron en el 2005 y para poner en marcha este proyecto, el Grupo de Iluminación y Visión disponía en sus laboratorios de todos los sistemas necesarios para la realización de medidas fotométricas. Contaba también con material básico para la realización de las medidas ópticas precisas para llevar a cabo estos experimentos, así como fuentes de luz variadas, tanto LEDs como distintos tipos de lámparas. Se disponía asimismo de cámaras CCD y sistemas de adquisición de imagen de 12 bits y procesado de las mismas. El Departamento contaba con un taller de Tecnología Óptica y un Laboratorio de Instrumentos Optométricos, los cuales incorporan todo el material óptico-optométrico necesario para la comprobación del estado visual de un sujeto y de su compensación óptica. El Laboratorio de Espectroscopia de la Facultad de Ciencias también fue utilizado para la calibración espectrométrica de las lámparas utilizadas. También se disponía de un Laboratorio de Iluminación que hubo que acondicionar gracias al taller de mecánica con el que se pudieron realizar las piezas necesarias específicas, diseñadas por nosotros mismos, entre ellas un pupilómetro de infrarrojos, para llevar a cabo el presente proyecto.

El grupo de investigación en su conjunto está formado por un equipo multidisciplinar en el que participan físicos, optometristas, un ingeniero y un estadístico, además cuentan con la colaboración puntual de oftalmólogos. Aunque es un grupo joven, el perfil tan variado que lo caracteriza, ha permitido al mismo tiempo enriquecerse con sus diferentes perspectivas. Por otro lado, una de las labores fundamentales de este grupo de investigación, formado en exclusiva por profesores de Universidad, es la formación de estudiantes, por este motivo y dado el carácter docente de los miembros que lo componen, para la realización de los tres trabajos elaborados durante tres cursos académicos, se ha incorporado un estudiante del tercer curso de la Diplomatura de Óptica y Optometría de la Uva, en cada uno de ellos.

En el 2006 se institucionalizó el grupo de Iluminación y Visión formando parte del Grupo de Investigación Reconocido, pasando a denominarse Grupo de Óptica de la Visión, que dio entidad administrativa a nuestro equipo. En la actualidad, y desde el presente año, debido a cuestiones burocráticas se le conoce con el nombre de Grupo de Técnicas Ópticas de Diagnóstico (TOD).

Tras cinco años de trabajo y gracias a la financiación de varios proyectos UV29/04 (Agencia para la Calidad del Sistema Universitario de Castilla y León), VA28/04 (Consejería de Sanidad de la Junta de Castilla y León), VA021A05 y VA090A08, (Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León) y FIS2005/05451 (Dirección General de Investigación), se presentan los trabajos que componen esta memoria.

La función visual de un individuo puede ser determinada mediante diferentes pruebas y la evaluación de la sensibilidad al contraste en un gabinete de análisis visual forma parte de la valoración de su estado visual. Dicha evaluación es un indicativo no sólo de su situación actual, sino también de la evolución de su estado visual y sus resultados se utilizan en ocasiones como indicador o “screening” de la posible presencia de ciertas patologías oculares. Mientras que para otras pruebas visuales, como puede ser la agudeza visual, existen estándares que garantizan la repetibilidad de las medidas, la sensibilidad al contraste es una prueba que se ve afectada por factores sobre los cuales no existe un consenso y, mucho menos una normalización. En definitiva, se carece del protocolo adecuado. Este, es el caso de la distribución espacial de luminancias en la habitación o gabinete donde se realizan las pruebas de sensibilidad al contraste.

Actualmente existe cierta discrepancia respecto al tipo de prueba, redes sinusoidales o letras, que ha de ser utilizado para cuantificar la sensibilidad al contraste. Hasta no hace muchos años, especialmente en investigación, era comúnmente aceptado que las redes proporcionaban una información más pura de la función visual. De aquí que la mayor parte de los trabajos realizados se refieran a ondas sinusoidales. Si bien la información proporcionada por ambos tipos de test es diferente, la lectura ha suscitado gran interés entre los distintos profesionales dedicados a Ciencias de la Visión, incluyendo en este campo las letras de contraste umbral, pero la investigación sobre el tema está menos desarrollada.

La capacidad de adaptación del sistema visual humano a las distintas condiciones de luminancia permite cierta versatilidad en la resolución de detalles. No obstante, a lo largo del tiempo algunos autores han ido determinando bajo qué situaciones de iluminación se pueden obtener las máximas prestaciones visuales. Pero los trabajos de sensibilidad al contraste de letras, en cuanto al tamaño de letra o condiciones de iluminación son pocos y con limitaciones.

El objetivo principal del trabajo es analizar la influencia de la luminancia en la medida de letras de contraste umbral. Dicha influencia será evaluada para distintos tamaños angulares, en diferentes condiciones de luminancia del entorno y de la luminancia que circunscribe el optotipo, que denominaremos luminancia del test. Se analizará también la influencia de las diferentes distribuciones espectrales de luminancia, que podrían ser emitidas por iluminantes típicos de un gabinete de la

función visual, sobre las letras de contraste umbral. A partir de los resultados obtenidos se podrán concretar los principios técnicos que sirvan de base para el establecimiento de un correcto protocolo de medida.

El presente manuscrito consta de 4 capítulos. El primero de ellos es de carácter teórico, en él se describen los conceptos sobre los que se ha forjado la base para llevar a cabo este trabajo. El capítulo comienza con un repaso sobre el procesado de la visión en el sistema visual humano, para continuar con una breve descripción de la sensibilidad al contraste, finalizando con algunas generalidades sobre la iluminación y la adaptación del sistema visual.

El capítulo 2 muestra un experimento en el que se cuantifica la influencia de la luminancia del entorno en el reconocimiento de letras de contraste umbral, para distintos tamaños angulares. Este capítulo está constituido por el primer trabajo que se puso en marcha donde se describe de forma exhaustiva el desarrollo del experimento, que va desde los criterios de inclusión de los candidatos, pasando por la calibración fotométrica de los dispositivos, hasta el diseño de las letras de contraste umbral. Por último, se realiza el análisis y discusión de los resultados, incorporando finalmente las conclusiones que del trabajo se pueden obtener.

El tercer capítulo presenta un experimento en el que se analiza la relación existente entre las luminancias del entorno y del test sobre la sensibilidad al contraste de letras. Primeramente se describe la motivación que hizo poner en marcha el trabajo, para pasar por el desarrollo del experimento. Posteriormente se analizarán los resultados, en los que se valorará los parámetros implicados en la interacción de ambas luminancias sobre la sensibilidad al contraste, proponiendo un modelo psicofísico que lo sustenta. Finalmente, acabamos con las conclusiones.

El último de los capítulos del manuscrito se ha realizado con la finalidad de cerrar el conjunto de los experimentos que forman esta memoria, incorporando, como parámetro no valorado en los experimentos anteriores, la temperatura de color de iluminantes típicos en un gabinete de análisis visual. Dicho capítulo tiene un carácter más aplicado. La estructura básica del capítulo es similar a la de los anteriores: motivación, desarrollo del experimento, análisis y discusión de los resultados, y finalizamos con las conclusiones.

En la parte final del texto se incluye la sección de conclusiones, donde se resumen las principales aportaciones realizadas en este trabajo.

Por último, comentar la inclusión de dos apéndices donde se recogen aspectos que no siendo de lectura imprescindible para la comprensión del trabajo, tienen por objetivo complementar la información de esta memoria.

Capítulo 1

Marco teórico

La visión es un proceso complejo donde están involucradas varias estructuras con su propia funcionalidad, que de forma organizada conducen la información visual hasta que finalmente se obtiene la percepción de la escena visual. En este capítulo comenzaremos con un repaso sobre la estructura y función del sistema visual humano siguiendo el recorrido de la luz hasta la representación de la imagen en la corteza visual.

En la siguiente sección se incluye un breve fundamento teórico sobre la caracterización de los sistemas ópticos y de las particularidades que comprometen al sistema visual, a partir de ahí se definirá la función de transferencia de modulación y la función de sensibilidad al contraste. Estos aspectos se describen de forma muy breve puesto que están ampliamente desarrollados en la literatura. Posteriormente, se valorarán los parámetros que de forma general afectan a la función de sensibilidad al contraste, incidiendo en aquellos que de forma particular se han tenido en cuenta a la hora de diseñar los experimentos de esta tesis.

A pesar de que se ha trabajado con la función de sensibilidad al contraste de letras, la experiencia sobre las redes sinusoidales marca una diferencia sustancial en el desarrollo de modelos visuales. Uno de ellos ha sido empleado en el análisis y discusión de los resultados de uno de los experimentos de este trabajo. Esta sección finaliza con la revisión sobre algunas de las teorías de identificación de letras y de su evolución a lo largo de la historia.

La última sección está dedicada a explicar la relación entre la iluminación y la función visual. Para ello se introduce la definición de las magnitudes radiométricas y fotométricas más importantes, explicando su significado aunque sin entrar en una exposición formal de las mismas y, finalmente, se presenta la función de adaptación a la luz y a la oscuridad y el fenómeno de deslumbramiento y sus implicaciones en la visión.

1.1. El sistema visual humano y el proceso de la visión

El proceso de la visión puede dividirse en tres etapas: la primera corresponde al procesado óptico y permite la formación de la imagen en la retina, la segunda está determinada por la fotorrecepción, que hace posible el registro de dicha imagen mediante los procesos fisiológicos que convierten la energía luminosa en impulsos nerviosos y, finalmente, el procesado neural de la imagen que permite la percepción de la misma (figura 1.1).

Los pasos que intervienen en el proceso visual son los siguientes:

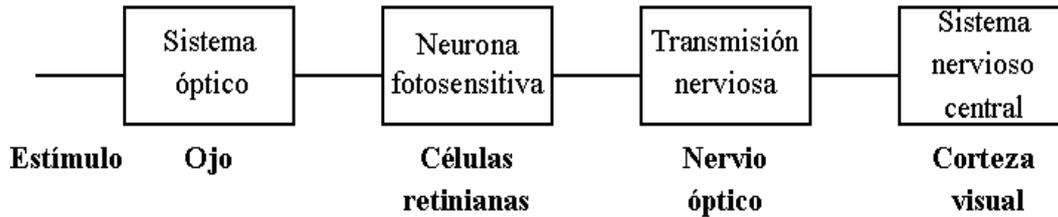


Figura 1.1 Esquema del proceso visual humano

1.1.1 El procesado óptico

Anatómicamente el ojo tiene una forma aproximadamente esférica de unos 24 mm de diámetro en una persona adulta. El sistema óptico del ojo está formado básicamente por dos lentes, la córnea y el cristalino, y por los medios transparentes, humor acuoso y humor vítreo (figura 1.2).

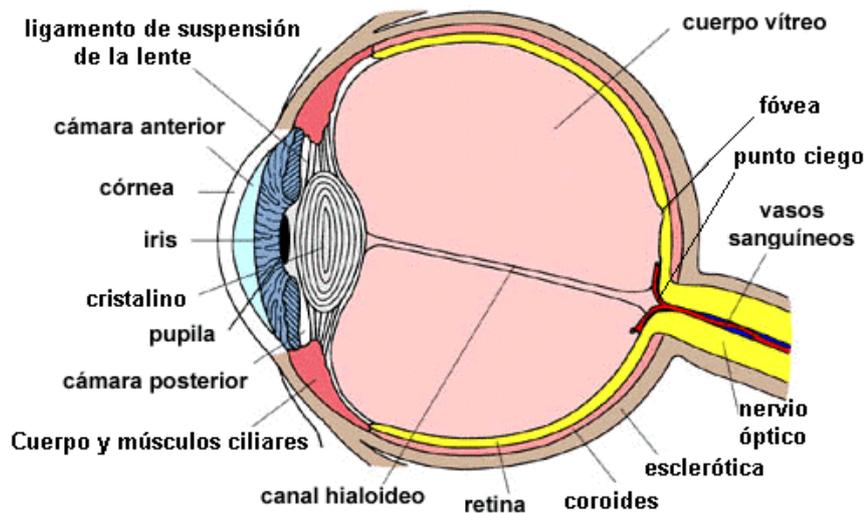


Figura 1.2 Estructura del ojo humano. Obtenido de www.teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA

A continuación, se describirá brevemente cada una de las partes en el orden en el que la luz se las va encontrando a su paso por el ojo, en el proceso normal de formación de la imagen.

En primer lugar, la luz atraviesa la *córnea*, un tejido transparente avascular pero con gran número de terminaciones nerviosas. Tiene unos 12 mm de diámetro, unos 0.6 mm de espesor central y un índice de refracción de 1.366 (Le Grand, 1991). Debido al cambio de índice de refracción tan abrupto que sufre la luz en la transición aire-córnea, en este paso se va a generar la mayor parte de la potencia del ojo (73%).

Inmediatamente detrás se encuentra la *cámara anterior* que contiene el humor acuoso, encargado de nutrir la córnea. A continuación se halla el *iris*, un músculo coloreado que actúa como diafragma controlando la cantidad de luz que entra en el ojo. La apertura del diafragma y por donde penetra la luz es lo que se conoce como pupila, cuyo diámetro puede variar desde 2 mm hasta 8 mm en un adulto joven. Esta variación producida en función del nivel de iluminación, controla la cantidad de luz que llega a la retina y juega un papel fundamental en la calidad de la imagen retiniana. Un diámetro grande aleja al sistema de la condición de paraxialidad y favorece las aberraciones ópticas; a su vez, un diámetro pequeño mejora la profundidad de foco y limita las aberraciones, pues permite pasar sólo aquellos rayos más cercanos al eje del sistema. Sin embargo cuanto menor es este diámetro mayores son los efectos de la difracción. Después de atravesar la pupila, la luz encuentra la lente del *crystalino*, una estructura transparente que, controlada por el músculo ciliar, es capaz de modificar su propia forma para conseguir una imagen nítida en la retina. Su índice de refracción varía de unas zonas a otras desde 1.42 en el centro hasta 1.39 en la periferia.

Después, la luz atraviesa la cámara posterior repleta de *humor vítreo*, una sustancia de textura gelatinosa que tiene una función principalmente estructural, dando consistencia a la estructura ocular. La luz llega finalmente hasta la parte posterior del ojo donde se encuentra la retina.

La *retina* es la membrana que contiene a los fotorreceptores, llamados conos y bastones. Son células que cuando reciben un estímulo luminoso adecuado se excitan y transducen energía electromagnética en señales electroquímicas, que se transmiten a través de sucesivas neuronas en la propia retina y luego hacia el cerebro. Los conos responden a niveles elevados de luminosidad y son los responsables de la visión diurna, mientras que los bastones se caracterizan por una alta sensibilidad a la luz detectando objetos a niveles de iluminación extremadamente bajos, permitiendo de esta forma la visión nocturna. La visión de bastones se conoce como visión escotópica, la de conos fotópica y la intermedia donde intervienen los dos tipos de fotorreceptores, visión mesópica. La primera de ellas abarca un rango que va desde el límite inferior de detección de la luz que es del orden de 10^{-6} cd/m², hasta 10^{-3} cd/m² aproximadamente, mientras que la visión fotópica abarca un rango comprendido entre las 3 cd/m² o incluso 10 cd/m², según los distintos autores, hasta el límite de tolerancia ubicado alrededor de 10^4 cd/m². En el trabajo que hemos realizado y que se presenta en esta memoria se han utilizado rangos que van desde 1 cd/m² hasta 1000 cd/m² de luminancia. Un aspecto destacable es que, mientras el sistema de bastones no puede discriminar colores, el sistema de conos cuenta con tres tipos distintos de fotorreceptores que son los responsables de la visión en color.

Los componentes funcionales de la retina se disponen en capas desde el exterior hasta el interior del ojo de acuerdo al esquema de la figura 1.3.

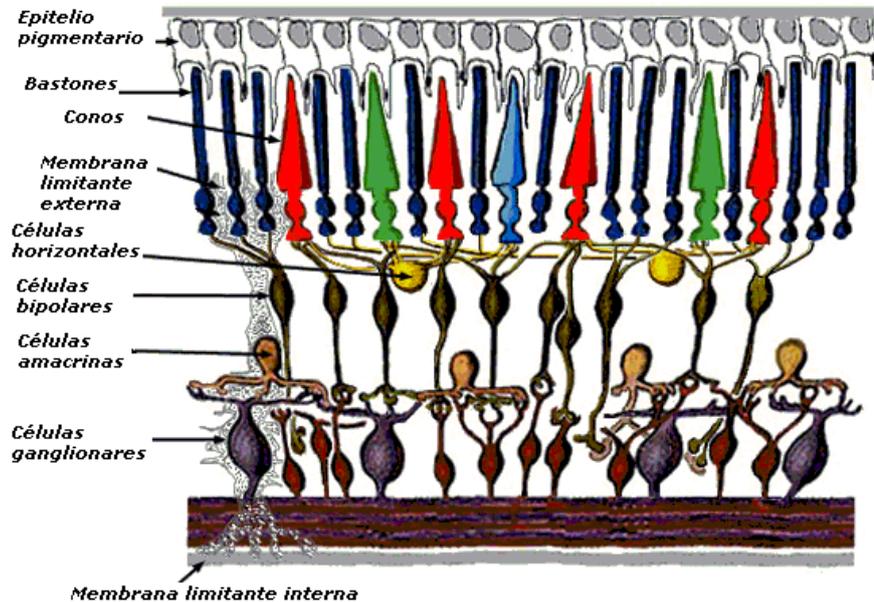


Figura 1.3 Diagrama simple de la organización de la retina.
Imagen modificada de www.hgculiacan.com

Después de que la luz pase a través del sistema de lentes del ojo y del humor vítreo, penetra en la retina desde el interior atravesando primero la membrana limitante interna después la externa para alcanzar a los conos y los bastones. Este paso a través de un tejido no homogéneo de varios cientos de micras genera una disminución de la agudeza visual. Sin embargo, en la zona central de la retina, los vasos sanguíneos y las diferentes capas que la forman no descansan directamente sobre los conos sino que están desplazadas hacia un lado, permitiendo que la luz llegue con menos impedimento contribuyendo así a mejorar la agudeza visual. Este área central de la retina tiene una zona de aproximadamente 5.5 mm de diámetro, rica en conos y que está demarcada por un pigmento pre-retinal, no fotosensible, que actúa como filtro y que le da el nombre de mácula a dicha zona. La mácula está especialmente capacitada para la visión aguda y de detalles y evita que las radiaciones de onda corta alcancen esa zona de la retina. El centro de la mácula tiene una depresión que ocupa aproximadamente 1.5 mm de diámetro y subtiende un ángulo de 5° , se denomina fovea. En la porción central de la fovea, la foveola, se forma la imagen del objeto de fijación. La foveola o fovea central está compuesta enteramente por conos, los cuales tienen una estructura larga y delgada que los ayuda en su detección del detalle en la imagen, en contraste con los bastones localizados más periféricamente en la retina.

1.1.2 Aspectos básicos del procesamiento neural en la retina

La figura 1.3 muestra una sección de la retina con las células que la forman y cómo se conectan. Puede observarse que entre las células ganglionares y los fotorreceptores existen otros tres tipos de células: horizontales, amacrinas y bipolares, de manera que la transmisión de la información puede seguir diversos

caminos dentro del conexionado de las distintas células retinianas y que va a depender de la ubicación de las mismas en la retina. De manera que en la fovea cada cono se conecta con una célula bipolar y esta a su vez con una ganglionar siguiendo el camino más directo. A medida que nos alejamos de la fovea más receptores convergerán en células bipolares y mayor número de estas en ganglionares. Además, hay que tener en cuenta que, como puede apreciarse en la figura 1.4, la distribución de los fotorreceptores en la retina es poco uniforme y más o menos simétrica respecto a la fovea. Esta distribución hace que tengamos un amplio ángulo de visión y una resolución espacial elevada localmente, de manera que nos podemos ayudar del continuo movimiento de los ojos para enfocar los objetos de interés en la fovea. Podría definirse un campo receptivo como un área de la retina formada por la convergencia de las señales de los fotorreceptores (conos y bastones) cuyas respuestas influyen en células más avanzadas del procesamiento visual: las células ganglionares.

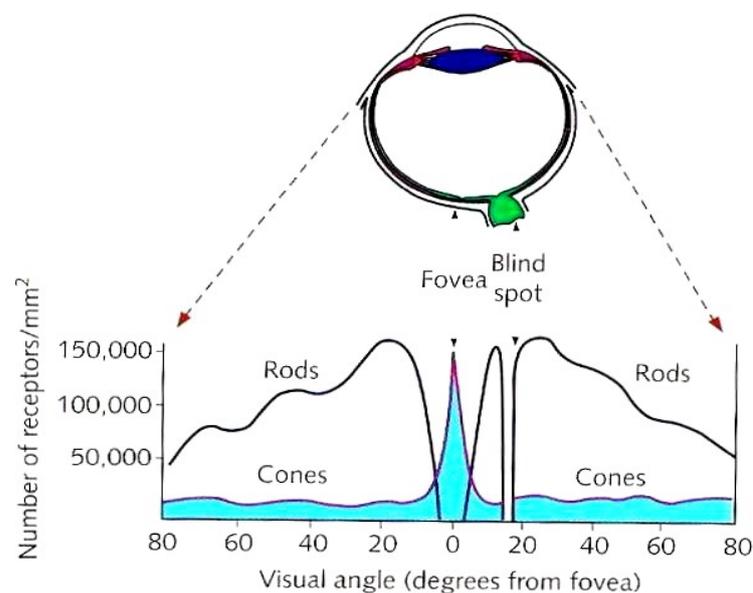


Figura 1.4 Distribución de conos y bastones en la retina
(Obtenido del libro Basic Vision and introduction to visual perception, Snowden R, et al., 2006)

En la retina se realiza un intenso procesamiento de información antes de enviar las señales visuales al cerebro. De hecho, las células ganglionares nunca permanecen en reposo, su actividad espontánea está regulada por las aferencias procedentes de las interneuronas retinianas (horizontales y amacrinas) (Kandel, 2000). Las aferencias que llegan a las células ganglionares tiene su origen en los fotorreceptores vecinos que ocupan un área circunscrita de la retina, denominado *campo receptivo* de la célula. (Oyster, 1999).

Al hablar de campo receptivo hay que tener en cuenta algunas consideraciones sobre las células ganglionares. Se han identificado dos clases de *células ganglionares*: de centro encendido (excitadoras u “on”) y células de centro apagado (inhibidoras u “off”). Las células ganglionares de centro encendido (figura 1.5) se activan cuando el centro de su campo receptor se encuentra excitado y la periferia del mismo no. En las células de centro apagado sucederá a la inversa. De esta manera, si las dos partes del campo receptor reciben el tipo de estimulación que necesitan, sus efectos se suman y se alcanza un grado de activación máximo en la

célula ganglionar, pero si el estímulo produce efectos opuestos en el centro y en la periferia, las dos regiones compiten entre sí y la célula ganglionar correspondiente se mantiene casi inactiva. Esta interacción es conocida como *inhibición lateral*. La inhibición lateral es uno de los procesos más importantes en la explicación de muchos fenómenos perceptivos, y en concreto, este particular funcionamiento juega un papel importante a favor de la percepción del contraste más que de la intensidad luminosa en niveles absolutos.

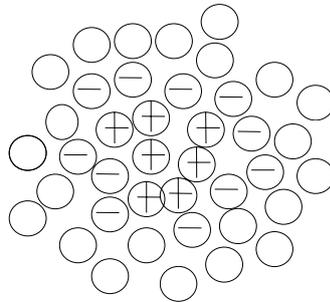


Figura 1.5 Esquema de campo receptor ON-OFF

Por otro lado, los campos receptores difieren en tamaño de una célula ganglionar a otra. En concreto, los centros de los campos receptores son más pequeños en la fovea y se hacen mayores a medida que nos alejamos de ella. Esto, nuevamente, explica el hecho de que nuestra agudeza visual sea mayor en la fovea. El tamaño del campo receptor está pues relacionado con la frecuencia espacial, de forma que células con campos receptores grandes responderán a bajas frecuencias espaciales y viceversa. De acuerdo con esto se puede hacer una nueva clasificación de las células ganglionares parasol (10% células de la retina del primate), que son las que poseen campos receptores grandes y midget o enanas (90% células), con campos receptores pequeños (Rodieck, 1998). Las células parasol producen respuestas fásicas, son especialmente sensibles al movimiento y no discriminan las longitudes de onda. Se localizan en la retina periférica y proyectan al cuerpo geniculado lateral, en sus capas magnocelulares. Se ha comprobado que su campo receptor es hasta 2 y 3 veces más extenso que el de las células enanas y que son casi 10 veces más sensibles al contraste. Las midget producen respuestas tónicas (sostenidas), y en general no son sensibles al movimiento, pero sí a las diferentes longitudes de onda. Proviene casi en su totalidad de la región macular y proyectan exclusivamente al cuerpo geniculado lateral, en sus capas parvocelulares.

Hay evidencias de que la función de sensibilidad al contraste es mediada por características espaciotemporales de neuronas tempranas en el camino visual magno y parvocelular, y se ha observado que es el sistema magnocelular quién domina cerca de la detección del umbral y probablemente sea la base de la función de sensibilidad al contraste acromática (Plainis and Murray, 2005).

En conclusión, los mensajes que el ojo envía hacia el cerebro a través del nervio óptico tienen poco que ver con la intensidad absoluta. Lo que la célula señala es el resultado de una comparación entre la cantidad de luz que impacta en un cierto punto de la retina con la cantidad media de luz que ilumina su periferia inmediata. Esto permite ver el mismo objeto en condiciones de iluminación completamente distintas.

1.1.3 Generalidades de la integración de la información visual en la corteza visual

La información a la salida del globo ocular, continúa su camino por la vía visual hasta llegar a la corteza visual primaria (figura 1.6).

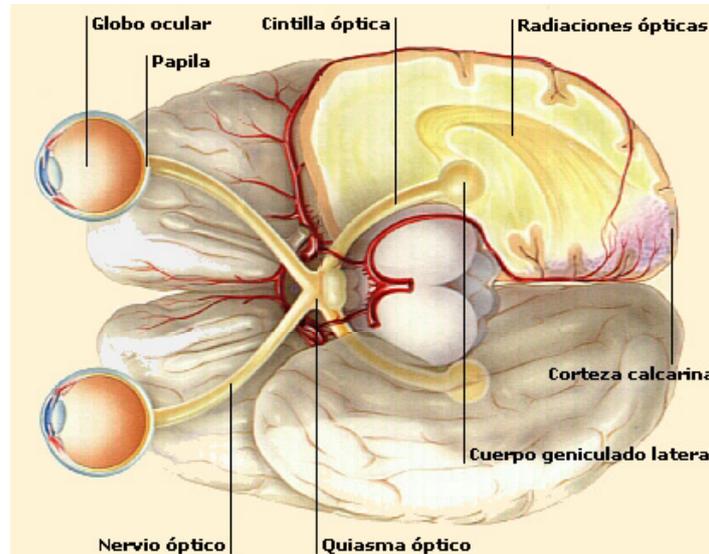


Figura 1.6 Vías ópticas hacia la corteza visual.
Obtenido de www.monografias.com/trabajos70/fisiologia-ocular

Las fibras que salen del ojo formando el nervio óptico llegan sin interrupción al quiasma óptico y a partir de ahí se dirigen a distintas zonas del cerebro. La mayoría de ellas (80% aproximadamente) envía la información a través del tracto óptico al núcleo geniculado lateral, el resto es información para el control de funciones de movimiento ocular y reflejo pupilar a la luz y también, para procesos de sincronización de ritmos biológicos (hipotálamo).

En el *quiasma óptico* se produce una decusación de la información visual procedente de los nervios ópticos, de forma que al *núcleo geniculado lateral* derecho le llega información procedente del hemicampo visual izquierdo y a la inversa para el núcleo geniculado lateral izquierdo. Cada núcleo geniculado lateral (situado en el tálamo) se encuentra dividido en 6 capas (figura 1.7). Estas capas a su vez se pueden dividir en magnocelulares o ventrales, (capas 1 y 2) y parvocelulares o dorsales (capas de 3 a 6) según el tamaño de las células que las forman y su respuesta al estímulo visual.

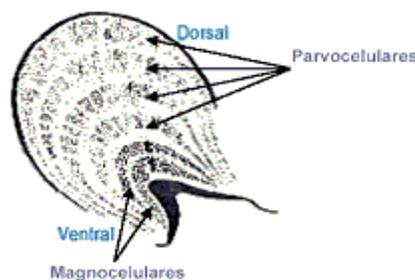


Figura 1.7 Sección del cuerpo geniculado lateral

La información visual sale de los cuerpos geniculados laterales a través de las *radiaciones ópticas* que la encaminan hasta la *corteza visual primaria* (V1). La corteza visual primaria es una capa de células de unos 2 mm de grosor situada en la parte occipital del cerebro. Contiene aproximadamente 200 millones de células frente a los 1.5 del cuerpo geniculado lateral. Estas células fueron clasificadas en células simples y complejas (Hubel y Wiesel, 1966).

Las células simples y sus campos receptivos responden a líneas que tienen tanto una posición como una dirección específica. A medida que la señal progresa hacia capas superiores, algunas neuronas denominadas células complejas responden a líneas orientadas, estacionarias y en movimiento (donde presentan una mayor respuesta). O sea, que la línea puede ser desplazada lateralmente en cualquier dirección a lo largo de una distancia moderada y la neurona compleja seguirá respondiendo. Algunas de las neuronas de las capas externas de cada columna llamadas células hipercomplejas responden solamente a líneas o límites de longitudes específicas, tratándose de un orden aún superior para interpretar la información. Las respuestas de estas células pueden explicarse a partir del concepto de campo receptivo, considerando que a este nivel del procesamiento existe un grado de integración mayor. Es decir, que una célula en la corteza puede estar obedeciendo a la suma de respuestas de varios campos receptivos de etapas anteriores (Snowden, 2006). De esta manera el procesado en la corteza puede dar cuenta del comportamiento del sistema visual en términos globales. Esta explicación simplificada es útil para comprender cómo mientras en una tarea de detección de un objeto son importantes las interacciones locales que se dan en la retina, en una tarea de evaluación de claridad influyen decisivamente la organización global de la escena.

Finalmente, y por primera vez en todo el proceso de percepción, aparecen células en la corteza visual primaria que reciben aferencias de ambos ojos, es decir, hay una convergencia binocular que permitirá construir una única imagen de la escena visual.

Las células que forman la corteza visual primaria (estratificada en 6 capas) se encuentran dispuestas en columnas verticales relacionadas con la orientación del estímulo. Además, se produce también una agrupación de células sensibles a una determinada frecuencia espacial. Se configuran así *detectores de frecuencia espacialmente orientada* con las células de V1. Se debe tener en cuenta que hay también otras capas de la corteza (desde V2 a V5) que participan en el proceso visual realizando diversas tareas. Así, por ejemplo, la zona V4 estaría relacionada con el procesamiento del color.

En conclusión, el sistema visual humano que se ha descrito es modular y paralelo. Se podrían diferenciar básicamente tres etapas: La primera de ellas sería la óptica (equivalente a un enfoque), la segunda la retiniana (transducción de la señal luminosa en impulsos eléctricos) y finalmente el procesamiento cerebral. Por otro lado, el procesamiento paralelo se daría por ejemplo, por medio de las corrientes magno y parvocelular.

1.2. Función de sensibilidad al contraste

En esta sección se van a recordar aspectos ampliamente conocidos y empleados en Óptica, pero que han de ser mencionados para enmarcar y situar al lector antes de incorporarse al contenido experimental del trabajo.

La función de sensibilidad al contraste, de ahora en adelante *CSF*, refleja la capacidad de detección de contrastes del sistema visual en un amplio rango de tamaños. De hecho, la introducción de la medida de sensibilidad al contraste se usa como método general que busca la caracterización de la visión espacial humana.

1.2.1. La función de transferencia del sistema visual humano y los sistemas lineales

Un objeto visible tiene una distribución espacial de luminancias que se puede caracterizar por una expresión analítica. Esta función se puede descomponer mediante el análisis de Fourier en una suma de componentes de distintas frecuencias. Si bien la suma es infinita basta un número finito de términos para que se aproxime lo suficientemente bien a la función espacial del objeto. A la hora de traducirlo a estímulos visuales, cada uno de los componentes representa distribuciones sinusoidales de luminancias de distintas frecuencias.

Análisis de Fourier

Dada una función $f(x)$ es posible representarla como una serie trigonométrica, es decir, como una combinación lineal infinita de funciones trigonométricas dada por la expresión:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{p}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nx}{p}\right) \quad (1.1)$$

siendo a_0 , a_n , y b_n coeficientes que se pueden calcular mediante las siguientes expresiones:

$$a_0 = (1/p) \int_0^p f(x) dx$$

$$a_n = (2/p) \int_0^p f(x) \cos\left(\frac{2\pi nx}{p}\right) dx$$

$$b_n = (2/p) \int_0^p f(x) \sin\left(\frac{2\pi nx}{p}\right) dx$$

El patrón de red u onda sinusoidal se puede definir por distintos parámetros (figura 1.8):

- La luminancia media (L_0) representa el nivel de luminancia medio del estímulo que corresponde al valor cero de la función sinusoidal.
- Las luminancias máxima y mínima (L_{max} y L_{min}) corresponden a la amplitud de la modulación en la luminancia del patrón siendo los puntos máximo y mínimo, respectivamente.
- La frecuencia mide el número de ciclos sinusoidales por grado visual (c/g).
- El contraste en este tipo de estímulos se define por la fórmula de Michelson que viene dada por la expresión:

$$C = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min}) \quad (1.2)$$

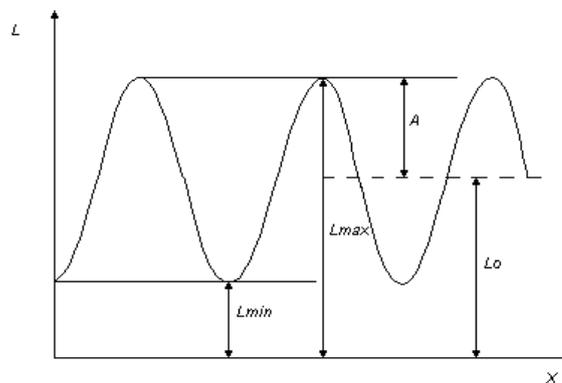


Figura 1.8 Parámetros característicos de un perfil de luminancias sinusoidal

Estos patrones sinusoidales de luminancia constituyen el elemento más simple para describir la formación de la imagen por el sistema óptico humano. La función que da el comportamiento de dicho sistema frente a este tipo de patrones es la función de transferencia óptica.

Función de Transferencia Óptica

Un sistema óptico lineal se caracteriza por transmitir una imagen de perfil sinusoidal sin distorsión en la forma del perfil, produciéndose variaciones sólo en la amplitud o en la fase de la red. La técnica del análisis de Fourier, tomada de la Teoría de las Señales en la década de los sesenta, se ha implementado con tal fuerza que sigue vigente en la actualidad, a pesar de que hoy por hoy el estudio de la calidad de sistemas ópticos permite llegar a las mismas conclusiones sin dicho análisis. En todo caso, las imágenes con perfiles sinusoidales o redes sinusoidales siguen siendo ampliamente utilizadas para el estudio de sistemas ópticos, ya que permiten determinar cómo altera el sistema el contraste o la fase en cada una de las frecuencias espaciales. La respuesta global del sistema al contraste constituye la función de transferencia de modulación (*MTF*) y para el caso de la fase la función de transferencia de fase (*PTF*). Estas dos funciones forman la función de transferencia del sistema óptico (*OTF*).

En este trabajo nos vamos a detener en la *MTF*. Una buena forma de cuantificar la variación de la modulación es a través del cociente entre el contraste de la imagen y el contraste del objeto para cada frecuencia. Es lo que se conoce como Función de Transferencia de Modulación (*MTF*) que se puede expresar para cada frecuencia como:

$$MTF(u) = \frac{M_i(u)}{M_o(u)} \quad (1.3)$$

donde M_i y M_o son la modulación de la imagen y del objeto respectivamente y u es la frecuencia espacial de la senoide. Por tanto se puede caracterizar el comportamiento de un sistema óptico por medio de la *MTF*.

El sistema visual humano como sistema lineal

Para aplicar el concepto de función de transferencia al análisis del sistema visual humano, este debe cumplir las condiciones de linealidad y homogeneidad, al menos para un rango determinado de condiciones.

En principio, parece lógico considerar lineal la parte óptica del sistema visual humano pues no se diferencia esencialmente de cualquier otro sistema óptico, sin embargo, la parte no óptica, es decir, el sistema retina-cerebro tiene un comportamiento típicamente no lineal. De esta manera, si bien el sistema visual en su conjunto no es lineal, pueden hacerse suposiciones y restricciones para la aplicación de las técnicas de Fourier.

Cuando el sistema visual está adaptado a un nivel bajo de iluminación, el incremento de luz necesario para producir una respuesta es mucho menor que el necesario para producir la misma respuesta a un nivel alto de adaptación (Conrswet, 1970). Este comportamiento, muestra la característica alineal del sistema visual. Pero cuando se fija el nivel de adaptación y se estudia la respuesta del sistema visual en un rango limitado de intensidades, se puede considerar que responde de forma lineal. Esta condición se presenta cuando las señales están compuestas por un fondo uniforme sobre el que existen pequeñas variaciones de luminancia del orden del umbral.

Por otra parte, el sistema óptico del ojo humano parece ser razonablemente homogéneo cerca del eje óptico, pese a que hay evidencia de que la anatomía de la retina y el campo visual es marcadamente inhomogéneo. Junto a esto se debe considerar que el procesamiento posterior de la información visual minimiza o compensa la falta de homogeneidad en la estructura, comportándose el sistema de manera global como homogéneo (Artigas et al., 1995).

Función de transferencia de modulación del sistema visual humano

La forma experimental de determinar la *MTF* consiste en medir el contraste de la red para una frecuencia dada que actúa como objeto, formar la imagen con el sistema óptico en cuestión y volver a medir el contraste en dicha imagen, con lo que se calcula el cociente entre ambos. El procedimiento se repite para cada una de las frecuencias obteniendo finalmente una curva característica del sistema. En el caso del sistema visual humano resulta imposible medir directamente el contraste de la

imagen. Por ello, se propuso emplear el método inverso. En lugar de mantener un contraste fijo en la entrada y medir el que se obtiene en la imagen, lo que se hace es variar la modulación del objeto manteniendo constante la de la salida, esto es, el contraste de la imagen percibida. Este contraste se toma tal que el observador perciba un campo uniforme, es decir, cuando se alcance el umbral de detección. Por tanto, el procedimiento experimental consiste en ir variando el contraste de una red sinusoidal que se le presenta al observador hasta que éste vea un campo uniforme. Para ese valor de contraste de la red se calcula su inverso que se conoce como sensibilidad al contraste, de ahora en adelante *CS*. Al repetir el procedimiento para cada frecuencia espacial se obtendrá la función de sensibilidad al contraste.

Esta función de sensibilidad al contraste viene a representar la función de transferencia de modulación del sistema visual.

Comportamiento general y parámetros que afectan a la función de sensibilidad al contraste (CSF)

La curva de la *CSF* para ondas sinusoidales (figura 1.9) se caracteriza por tener la forma correspondiente a un filtro pasa-banda, forma de U invertida, que posee un máximo de sensibilidad entre 4 y 8 ciclos/grado para niveles de iluminación fotópicos (Campbell and Robson, 1968) o entre 2 y 4 c/g según otros autores (Owsley et al., 1983, Colombo et al., 2009). A partir de ese valor, la sensibilidad disminuye a medida que la frecuencia espacial aumenta. De esta manera se llega a una frecuencia límite, que corresponde a la máxima frecuencia que es posible detectar, para la cual se necesita un contraste máximo. Esta frecuencia de corte es una medida de la agudeza visual y se sitúa alrededor de los 60 c/g. El comportamiento hacia las bajas frecuencias espaciales a partir del máximo alcanzado adquiere una pendiente de aproximadamente la unidad medida en unidades logarítmicas.

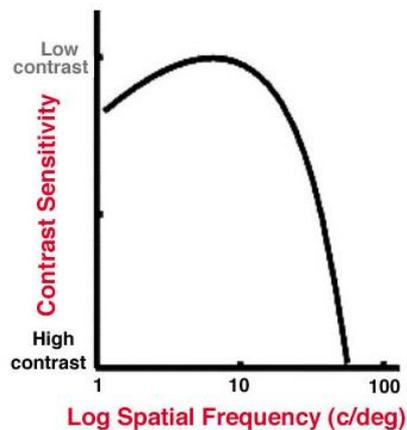


Figura 1.9 Función de sensibilidad al contraste fotópica.
Obtenido de www.webvision.umh.es

La *CSF* de ondas cuadradas es similar en altas frecuencias, pero con una pendiente cero para bajas frecuencias y esta es similar a la obtenida en letras de bajo contraste (Ginsburg, 1978).

La sensibilidad del sistema visual humano para detectar estímulos sinusoidales depende de parámetros como la luminancia media, el color, la localización en el campo visual, el tamaño del estímulo, etc. Un análisis de estos parámetros permitirá definir las condiciones óptimas para la determinación de la *CSF*. Teniendo en cuenta que en el trabajo que aquí se presenta se va a determinar la sensibilidad al contraste de letras vamos a prestar más atención a aquellos parámetros más relevantes para este tipo de sensibilidad al contraste, dejando al margen aquellos que no comprometan al trabajo realizado.

Luminancia

Para un individuo en condiciones fotópicas de luminancia se obtiene una curva de *CSF* parecida a la de la figura 1.9. Van Nes y Bouman en 1967 estudiaron cómo variaba la sensibilidad al contraste en función de la luminancia del fondo, para redes sinusoidales, manteniendo constante el resto de los parámetros (pupila, tamaño de test). El tamaño del test empleado para este experimento fue de 4.5° de ancho por 8.25° de alto, y se obtuvo iluminando una transparencia de una red sinusoidal con una radiación en el entorno de 525 nm. Las condiciones de luminancia que había alrededor del test, es decir la luminancia del entorno fueron de oscuridad. Se utilizó visión maxwelliana y una pupila artificial de 2 mm. El análisis de los resultados reveló los siguientes cambios (figura 1.10):

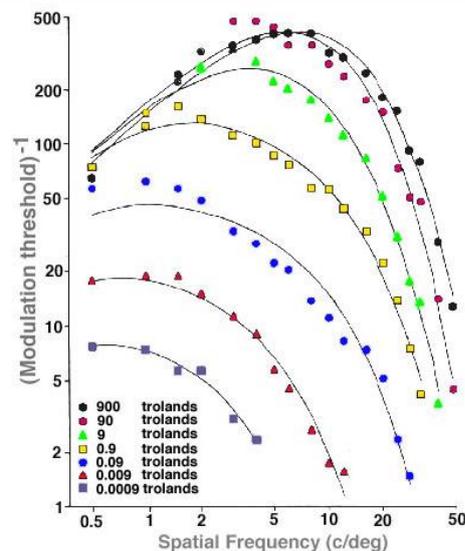


Figura 1.10 Función de sensibilidad al contraste que muestra una forma de pasa-baja en bajas luminancias a pasa-banda en altas luminancias. Obtenido de www.webvision.umh.es

La sensibilidad aumentaba al aumentar la luminancia (L). Sin embargo, a bajas frecuencias espaciales todas las curvas tendían a un punto, con lo cual se cumple la conocida ley de Weber, es decir, $\Delta L/L = \text{cte}$, siempre que L se situó en el rango fotópico. En la región de las altas frecuencias, la ley de adaptación ya no sigue la ley de Weber, sino que los datos muestran que ΔL es proporcional a \sqrt{L} , lo que se conoce como ley de De Vries-Rose. Según se avanza del rango fotópico al mesópico se obtiene menos sensibilidad a frecuencias medias y altas pero la sensibilidad a frecuencias bajas no parece prácticamente afectada. De tal manera que la forma general de la curva varía desde la forma de filtro pasa-banda con

luminancias superiores hasta un filtro pasa-baja, con luminancias inferiores. También se observó que al aumentar la luminancia, la máxima sensibilidad del sistema se desplaza hacia frecuencias mayores y la frecuencia límite aumenta.

Al alcanzar el rango escotópico, la sensibilidad decrece en gran medida para todas las frecuencias espaciales. Estos resultados indican que bajo una luz tenue no distinguimos los pequeños detalles pero todavía somos capaces de distinguir bien objetos de gran tamaño angular o rasgos más groseros.

Mientras que la influencia de la luminancia del test (L_T) sobre la sensibilidad al contraste está más estudiada, la que ejerce el entorno (L_S) está mucho menos documentada. Este desconocimiento es aún más evidente si se considera como estímulo visual letras en vez de redes. En este trabajo se analizará la influencia de los dos parámetros L_T y L_S sobre el reconocimiento de letras de contraste umbral.

En ocasiones la literatura científica emplea diferentes términos para definir un mismo concepto o similar; así, nos podemos encontrar luminancia del background, surround, del fondo o del ambiente como vocablos diferentes que se refieren a una misma expresión, también ocurre con la luminancia del test a veces llamada de fondo, de tarjeta, de estímulo, etc. Por este motivo, a continuación vamos a concretar la terminología que va a ser empleada a partir de ahora y a lo largo de esta memoria.

Dentro de la escena visual del observador, definiremos dos zonas de su campo visual: test y entorno. Llamamos test a los 3.8° centrales que subtienden desde el observador; a partir de dicha zona y hasta alcanzar los 34° centrales lo denominaremos entorno. Nos vamos a referir, por tanto, a la luminancia del entorno como L_S que viene definido como la luminancia que hay desde los 3.8° hasta los 34° que alcanza aproximadamente la escena visual del observador. Hablaremos de la luminancia del test (L_T) como la luminancia de la zona donde se situarán las cartas o tarjetas del optotipo de sensibilidad al contraste. Dicha luminancia será medida sobre un DIN-A4 en el que se imprimirán los optotipos. A partir de la luminancia del test y del optotipo, mediante la expresión de Weber,

$$C_W = \frac{L_T - L_{\text{optotipo}}}{L_T} \quad (1.4)$$

podremos determinar el contraste de la letra, donde C_W representa el contraste de Weber y L_{optotipo} la luminancia del optotipo o letra. La figura 1.11, muestra una fotografía de las dos zonas definidas, en ella se muestra un ejemplo donde la luminancia del test es menor que la luminancia del entorno.

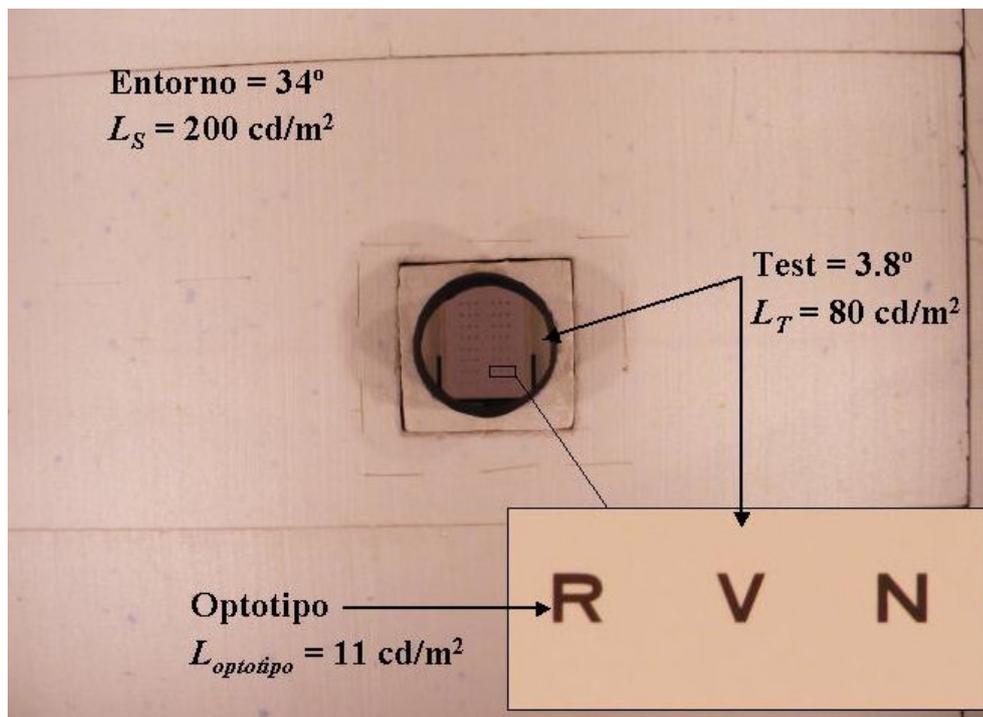


Figura 1.11 Fotografía de las zonas de la escena visual vistas desde el observador. Se ha incluido la luminancia del test y del entorno.

Longitud de onda

Al medir la *CSF* con luz roja, azul o verde mediante filtros de color con una anchura de banda espectral determinada e isoluminante, las tres curvas se parecen mucho y todas ellas se asemejan a la obtenida con luz blanca (Capilla et al., 1993), a igualdad de luminancias y corregida la aberración cromática. Dependiendo del ancho de banda de los filtros la igualdad encontrada por Capilla et al., 1993 puede verse alterada encontrándose pequeñas diferencias entre unas curvas y otras. Este resultado se ha tenido en cuenta en el tercer experimento del trabajo. En él, mediante filtros de densidad neutra, se ha variado la luminancia manteniendo la temperatura de color. De manera que, se ha pretendido estudiar la influencia de esta en la sensibilidad al contraste de letras.

Merece la pena destacar que si se determina la *CSF* correspondiente a los tres tipos de conos, S, M y L, (sensibles para las longitudes de onda corta, media y larga, respectivamente), entonces sí que aparecen diferencias notables en la curva de la *CSF*: Las *CSF* de los mecanismos L y M se parecen mucho entre sí y ambas se parecen a la *CSF* acromática. Ambas tienen su máximo de sensibilidad a 5 ciclos/grado, pero la del M presenta una sensibilidad tres veces superior a la del L. La *CSF* acromática se sitúa entre la *CSF* del M y la *CSF* del L, pareciéndose más a ésta última. El mecanismo S, en cambio, presenta muchas más diferencias: la máxima sensibilidad se halla en 1 ciclo/grado, pudiendo ser del orden de 50 veces menor que la sensibilidad del M para la misma frecuencia y, además, la curva decae rápidamente desde el máximo, siendo la sensibilidad muy baja para frecuencias medias y altas.

Orientación de la red

Los seres humanos son más sensibles a enrejados con orientaciones horizontales y verticales, que a otras oblicuas (Campbell et al., 1966, Orban et al. 1984). Este efecto, conocido como *oblicuo*, es más pronunciado en el intervalo de las altas frecuencias espaciales

Excentricidad

La *CSF* varía también con la ubicación retiniana del patrón que se está detectando, reduciéndose a medida que dicho patrón se desplaza de la fovea hacia la periferia (de Valois & de Valois, 1990). En los experimentos de este trabajo siempre se ha trabajado con tareas foveales.

Tamaño del test

La *CSF* es independiente del tamaño del test cuando este subtiende más de 2° de ángulo visual (Noorlander et al., 1980) como ocurre en nuestro trabajo (3.8°), pero si este fuera menor se observará una disminución de la sensibilidad en la zona de frecuencias espaciales medias y bajas. Por otro lado, la sensibilidad a las altas frecuencias espaciales (a partir de 12 a 16 c/g) no cambia con el tamaño del test a menos que éste llegue a tener un número de ciclos visibles inferior al crítico. Por último, también se encuentra que el punto de máxima sensibilidad esta desplazado hacia las altas frecuencias espaciales.

Diámetro pupilar

La pupila actúa como diafragma de apertura del sistema óptico del ojo con la peculiaridad de que su tamaño varía con la intensidad de la luz. El tamaño de la pupila determina la difracción y por consiguiente la función de transferencia de modulación del sistema y el valor de su frecuencia de corte. También del diámetro pupilar depende la magnitud de las aberraciones que afectan al sistema.

El efecto de la difracción disminuye cuando aumenta el diámetro de la pupila, por lo que el sistema óptico del ojo aumenta su frecuencia de corte. Sin embargo, este hecho, que en principio podría interpretarse como una mejora de la resolución, es contrarrestado por el aumento de las aberraciones, que hacen que disminuya considerablemente la sensibilidad, sobre todo para las altas frecuencias espaciales. Por ello, en la práctica, al variar el tamaño de la pupila, el límite de resolución de frecuencias espaciales no cambia tanto como cabría esperar si sólo se considerase el efecto de la difracción.

La frecuencia espacial de corte (f_c) del sistema óptico limitado por la difracción (sin considerar aberraciones) se obtiene de la expresión:

$$f_c = d \operatorname{tg}(1^\circ) / \lambda \quad (1.5)$$

donde d es el diámetro pupilar y λ la longitud de onda de la luz. Con $\lambda = 632,8$ nm, las frecuencias de corte correspondientes a pupilas de 1, 2, 3 y 4 mm de diámetro son, respectivamente 28, 55, 83, 110 c/g. Sin embargo, experimentalmente se

obtiene que el límite para la resolución del sistema con estas pupilas es 28, 42, 43 y 44 c/g con una iluminación retiniana de 707 td (Artigas et al., 1986). De ello se deduce que el efecto de las aberraciones es decisivo frente a la difracción con pupilas de 2 mm y superiores, pero con un diámetro pupilar de 1 mm el sistema puede considerarse libre de aberraciones y limitado exclusivamente por la difracción.

En nuestro trabajo se ha diseñado un pupilómetro formado por LEDs de infrarrojos y una cámara CCD conectada a un ordenador. Este sistema ha permitido tomar medidas de los diámetros pupilares naturales de varios sujetos en las diferentes condiciones de luminancia en que se ha realizado el trabajo experimental.

Desenfoque

Mientras que la reducción de la sensibilidad al contraste en altas frecuencias espaciales debido al desenfoque es conocida desde hace tiempo (Campbell y Green, 1965) observándose además una disminución del valor de la frecuencia límite de resolución, la cantidad de desenfoque necesaria para provocar un cambio en bajas frecuencias espaciales está menos documentada. Son varios los estudios que se han llevado a cabo sobre cómo afecta el desenfoque en la sensibilidad al contraste, y aunque la mayoría de ellos han utilizado como estímulo ondas sinusoidales (Jansonius et al., 1997, Atchison et al., 1998, Strang 1999, Woods, et al., 2000, Radhakrishnan et al., 2004) también este tipo de investigación ha sido llevada a cabo con letras de bajo contraste (Rabin, 1994, Liou, 1998). La mayoría de estos trabajos han empleado una sustancia cicloplejica que permitía la paralización de la acomodación y la dilatación pupilar del sujeto, también se ha tenido en consideración varios tamaños de pupila (Atchison et al., 1998, Strang 1999), diferentes desenfoques provocados por el uso de lentes de distintas potencias (Jansonius et al., 1997, Liou, 1998, Strang 1999, Radhakrishnan et al., 2004) y el empleo de varios niveles de contraste (Liou, 1998) y de frecuencias espaciales (Jansonius et al., 1997, Radhakrishnan et al., 2004).

Los resultados demuestran que el desenfoque, incluso de pequeñas cantidades (~ 0.5 D) (Rabin, 1994; Jansonius et al., 1997) modifican la forma de la curva de sensibilidad al contraste, de ahí la importancia de una correcta compensación óptica para las medidas de la sensibilidad al contraste no solo en investigación sino también en las medidas clínicas. Por este motivo, en todos los experimentos de este trabajo se realizó una refracción que asegurase la compensación óptima de la ametropía del sujeto montándolo en una gafa que fue empleada exclusivamente para las medidas experimentales.

Tiempo de exposición

El periodo de tiempo que el sujeto se mantiene observando el estímulo es una variable que ha de ser controlada. Se ha demostrado (Arend, 1976) que en general un aumento del tiempo de exposición permite una mayor eficiencia en la detección, es decir, la sensibilidad al contraste crece y lo hace de forma diferente según la frecuencia considerada. En síntesis, conforme el tiempo de exposición se hace más corto, la *CSF* pierde su forma característica de pasa-banda para adquirir la de un

filtro pasa-baja. Estos resultados ponen de manifiesto que los mecanismos que procesan las diferentes frecuencias espaciales son dependientes del tiempo.

Edad del observador

La pérdida de ciertas capacidades visuales con la edad, como la facultad de acomodación o la transparencia de los medios ópticos, unido en ocasiones a otras deficiencias o patologías del sujeto, generan una pérdida de sensibilidad al contraste a medida que el sujeto envejece (Owsley, 1983).

1.2.2. El sistema visual y el modelo de filtros espaciales

Hasta los años sesenta se pensaba que el sistema visual trabajaba como un mecanismo simple donde la forma de la curva de la *CSF* representaba un filtro global que transmitía de forma óptima un rango de frecuencias espaciales. Sin embargo, en 1968 Campbell y Robson, propusieron que el sistema visual funciona como un conjunto de detectores independientes, cada uno de ellos precedido de un filtro de banda relativamente estrecha (una octava), sintonizado a una frecuencia espacial diferente, denominada frecuencia de sintonía. Cada filtro y detector constituye un canal separado y cada canal tiene su propia función de sensibilidad al contraste. De acuerdo con esto, la función de sensibilidad al contraste del sistema visual global sería la resultante de la sensibilidad al contraste de todos los canales independientes, pudiendo darse la detectabilidad de modo independiente en aquel canal que sea sensible a una cierta banda de frecuencias espaciales (figura 1.12).

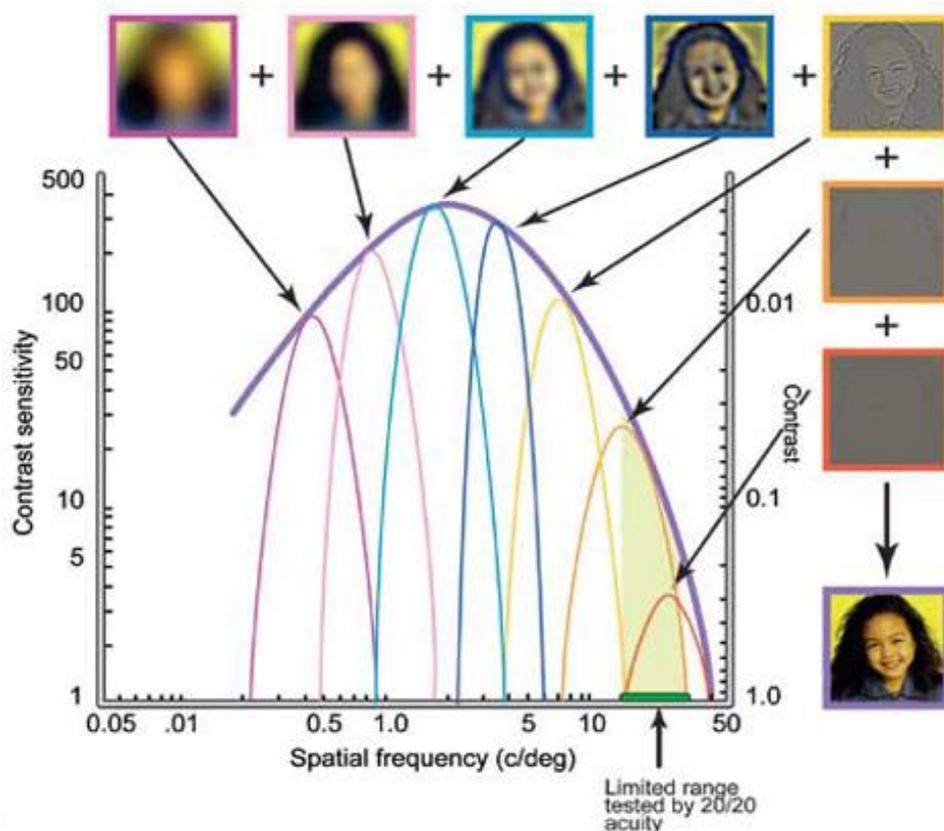


Figura 1.12 Función de sensibilidad al contraste como envolvente de los canales selectivos a frecuencias espaciales sintonizadas. Obtenida de www.contrastsensitivity.net/es/cm.html

A esta forma de interpretar el funcionamiento de la visión espacial se la conoce como modelo de múltiples canales o modelo multicanal. En consecuencia, la teoría multicanal presupone que el sistema visual humano ejecuta algo así como un análisis de Fourier troceado (por canales) de la imagen de entrada, y que cada canal analiza unos determinados componentes espectrales (frecuencia, amplitud, orientación, fase, longitud de onda, velocidad, etc). La disposición espectral de los canales es tal que cubren todo el rango de frecuencias espaciales y de orientaciones que son visibles por el ser humano.

Las bases fisiológicas del modelo multicanal del sistema visual humano pueden encontrarse en los campos receptivos asociados a las neuronas. Como ya se ha comentado en la sección 1.1.2, en el caso de una célula ganglionar, dentro de su campo receptivo se pueden identificar dos zonas concéntricas sustancialmente diferentes en cuanto a su comportamiento; una zona excitatoria, que al ser estimulada con luz produce un aumento en la frecuencia de descarga, es decir, una respuesta positiva, y otra zona inhibitoria, que para un estímulo similar produce una disminución en la frecuencia de descarga de la célula.

En la figura 1.13 se representa la estimulación de un campo receptivo con franjas de distintas frecuencias espaciales. Este campo receptivo, tipo centro ON-OFF (centro excitatorio y periferia inhibitoria) se caracteriza por presentar la respuesta máxima cuando la zona central es estimulada con una señal excitatoria y en la periferia con una señal inhibitoria, como se representa en la figura 1.12 a), de manera que para estímulos de estas características la respuesta que presenta este campo es la máxima. En este caso se dice que el campo receptivo se encuentra *sintonizado* a la frecuencia espacial del estímulo que se presenta. En el caso b) el centro del campo está igualmente estimulado tanto por una señal excitatoria como por una inhibitoria, de tal forma que la respuesta promedio de este campo será cercana a cero, mientras que en el caso c) el centro y gran parte de la periferia del campo son estimulados con una señal excitatoria, con lo que la respuesta será algo mayor a cero. En conclusión, las frecuencias mejor detectadas serán aquellas que mejor se correspondan con el tamaño del campo receptivo en cuestión.

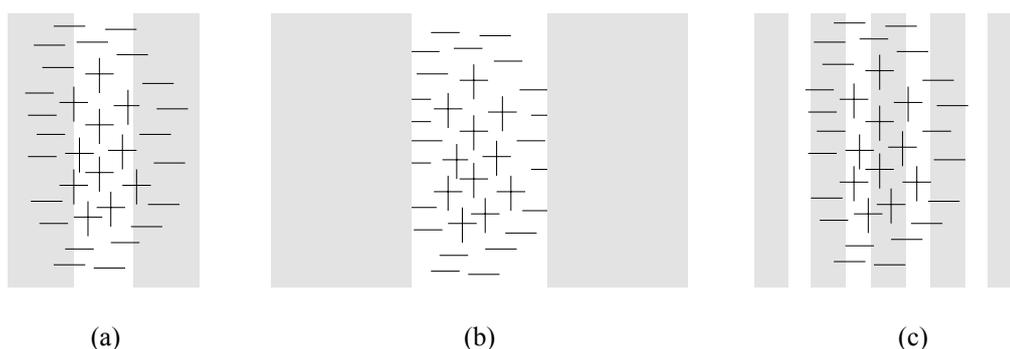


Figura 1.13 Esquema descriptivo de cómo las neuronas simples corticales actúan como un filtro espacial pasa-banda

El modelo multicanal no es la única manera de caracterizar la visión espacial. Una alternativa es el modelo de dominio espacial basado en detectores de rasgos o modelos basados en la extracción de características. En este modelo se admiten como estímulos elementales o primitivos de la visión un conjunto de características,

o rasgos locales, que actuarían como disparadores para determinadas clases de células del sistema visual. Las evidencias psicofísicas y neurofisiológicas que sustentan al modelo de múltiples canales, hacen de él una herramienta sumamente sólida para entender y predecir el comportamiento del sistema visual humano, aunque cabe la posibilidad de que sean ambos modelos quienes intervengan en la percepción visual final.

1.2.3. Modelos visuales para la evaluación de la *CSF* de redes

Este trabajo versa sobre un aspecto tan familiar como es el reconocimiento de letras, en nuestro caso de contraste umbral, en diferentes condiciones de luminancia. A pesar de que las letras son relativamente simples en relación a los demás objetos que rodean nuestro entorno, no se han encontrado modelos matemáticos sólidos y sencillos capaces de justificar cómo el sistema visual es capaz de procesar dicha información. En cambio, la descomposición de los estímulos a través del análisis de Fourier en redes sinusoidales, ha cobrado importancia para la realización de modelos por su simplicidad matemática, a pesar de que las ondas nada tienen que ver con los estímulos visuales que recibimos diariamente. En todo caso no debemos olvidar que el análisis de Fourier no es más que una simplificación radical, que ayuda a crear modelos visuales, pero que se encuentra muy alejado de la percepción de patrones más complejos como las letras.

Por otro lado, la tradición en el uso de redes sinusoidales ha introducido un lenguaje que sigue siendo utilizado en la sensibilidad al contraste de letras. Por este motivo, se ha considerado conveniente presentar dos de los modelos más referenciados en la literatura a pesar de ser relativamente recientes. El segundo de ellos ha sido utilizado en el análisis de los resultados del primer experimento de este trabajo, ya que gran parte de los parámetros que lo caracterizan están fuertemente vinculados con variables experimentales controladas en nuestro dispositivo experimental.

Modelo de Watson y Ahumada

El desarrollo de modelos de sensibilidad espacial ha sido y continúa siendo una meta para muchos investigadores. Watson y Ahumada, basándose en las características que fueron surgiendo a lo largo del tiempo para definir los modelos de sensibilidad espacial (sumación, canales de múltiples filtros espaciales, excentricidad, tamaño del patrón, etc), desarrollaron en el 2005 un modelo estándar para la detección de contraste foveal que contempla los parámetros más relevantes.

En la figura 1.14 se muestra un diagrama de bloques del modelo de componentes de Watson y Ahumada, que consiste en una cascada de elementos que pueden ser introducidos o eliminados y cuyos parámetros pueden ser fijos o variables.



Figura 1.14 Elementos del modelo de componentes

Como estímulos se han empleado los patrones de visión espacial del ModelFest. El ModelFest es una base de datos construida a partir de los contrastes umbrales de 43 estímulos monocromáticos que se presentan a diferentes sujetos y en varios laboratorios de todo el mundo. Prácticamente todos los estímulos (excepto 3 de ellos) son ondas sinusoidales. La finalidad del mismo consiste en construir un conjunto de datos cada vez mayor que sirva como base para poder desarrollar y probar modelos de visión espacial foveal o de detección de contrastes.

En este modelo, una vez obtenido el contraste de la imagen el siguiente paso consiste en emplear un filtro que permite obtener la *CSF*. En realidad el filtro emplea distintas métricas y cada una de ellas será analizada para seleccionar aquella que mejor se ajuste a los datos experimentales de cada situación específica. Después, el modelo permite incluir distintos parámetros, como un efecto oblicuo que reducirá los valores umbrales de la función de sensibilidad al contraste, a medida que la información relevante se aleja de la horizontalidad o verticalidad; seguidamente se considerará la apertura, que define la atenuación de la sensibilidad fuera del punto de fijación. Posteriormente, considerando las evidencias psicofísicas y psicológicas de la existencia de canales de visión, se ha implementado un conjunto de canales. El estado final en el modelo de componentes consiste en la aplicación de la sumación de Minkowski sobre el espacio, y si estuvieran presentes, sobre los canales.

Después de realizar un análisis estadístico muy completo utilizando los modelos basados en métricas donde se compara el mejor ajuste con las predicciones de los 43 estímulos del ModelFest, Watson and Ahumada proponen como métrica estándar la métrica de no-canal, que incluye apertura gaussiana, efecto oblicuo fijo y una *CSF* de tipo hiperbólica secante. Esta métrica consta de 5 parámetros: f , f_0 , f_1 , a y p y viene definida por la siguiente expresión:

$$CSF(f; f_0; f_1; a; p) = \sec h\left[\left(f / f_0\right)^p\right] - a \sec h\left[f / f_1\right] \quad (1.6)$$

siendo f la frecuencia espacial en ciclos/grado, f_0 , f_1 , a y p parámetros de ajustes de la *CSF*.

Tal y como comentan los autores después del análisis de sus resultados, este conjunto de datos no satisfacen plenamente algunas condiciones, siendo importantes en nuestro experimento, por ejemplo no contempla objetos complejos o con mezcla de frecuencias; si se añade al modelo la métrica del canal el ajuste no es tan bueno y tampoco consideran la variación en la sensibilidad debido a los cambios en la iluminación de entorno. Por estos motivos a pesar de ser un modelo muy referenciado, no se ajusta a las necesidades de nuestros datos, y fue la razón principal para rechazarlo.

Modelo de Barten

Este modelo (Barten, 1999) está basado en la hipótesis de que la sensibilidad al contraste está principalmente determinada por el ruido interno generado en el sistema visual. Para llevarlo a cabo, se han hecho supuestos adicionales sobre las propiedades ópticas del ojo y sobre el procesamiento neural de la información y por razones prácticas ha sido restringido a visión fotópica, excluyendo además el efecto

de la orientación direccional de las variaciones de luminancia en el sistema. A pesar de estas limitaciones este modelo teórico ha tenido gran éxito por ser de fácil implementación y ha sido comparado con numerosos trabajos aplicados a una gran variedad de situaciones experimentales. De hecho, se ha demostrado que este modelo es un buen predictor de la *CSF* particularmente en el dominio de altas frecuencias espaciales.

La sensibilidad al contraste se considera como una función de la frecuencia espacial (u) de la siguiente forma:

$$CSF(u) = M_{opt}(u) N(u) \quad (1.7)$$

siendo la M_{opt} la función de transferencia de modulación del ojo (*MTF*) y $N(u)$ la función neural, la cual incluye ruido neural, ruido del fotón, efectos de inhibición lateral así como la influencia de la iluminación retiniana y otras características físicas del ojo y del test. Por otro lado, Barten describe la *MTF* como una función gaussiana que resulta de la convolución de diferentes efectos ópticos del ojo, pérdida de luz en los medios oculares, difusión en la retina y la naturaleza discreta de los fotorreceptores.

En la figura 1.15 se muestra un diagrama de bloques del modelo. El diagrama se ha completado incluyendo ruido externo a pesar de que el modelo no lo contemple.

En este modelo se asume que la señal que entra en el ojo es primero filtrada por la *MTF* óptica del ojo (determinada principalmente por el cristalino y la estructura discreta de la retina) y luego por la *MTF* del proceso de inhibición lateral (determinada por procesos neuronales), después la señal será integrada en espacio y tiempo para finalmente poder ser detectada si la modulación de la misma (m) es mayor que la modulación de la señal del ruido interno (km_n).

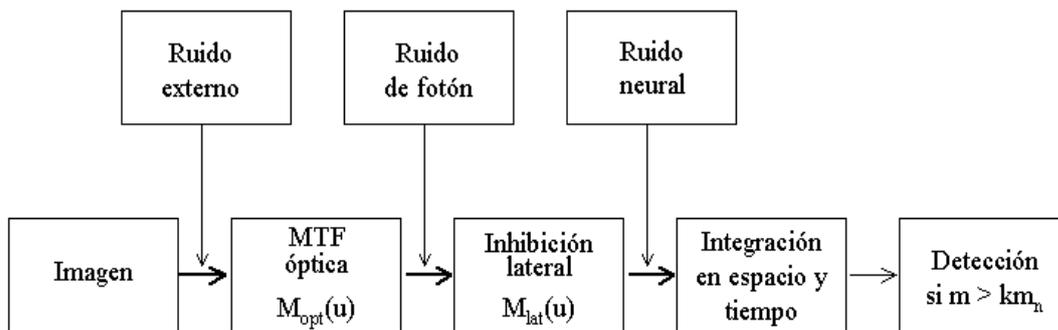


Figura 1.15 Diagrama de bloque del procesamiento de la información y ruido de acuerdo al modelo de sensibilidad al contraste descrita por Barten.

Basándose en datos experimentales Barten obtuvo la siguiente fórmula analítica para describir la *CSF*:

$$CSF(u) = \frac{M_{opt}(u)/k}{\sqrt{\frac{2}{T} \left(\frac{1}{X_o^2} + \frac{1}{X_{max}^2} + \frac{u^2}{N_{max}^2} \right) \left(\frac{1}{\eta\rho E_r} + \frac{\Phi_0}{1 - e^{-(u/u_0)^2}} \right)}} \quad (1.8)$$

En esta ecuación $M_{opt}(u)$ es la *MTF* óptica del ojo, en la que se considera el diámetro pupilar donde intervienen factores ópticos como la difracción y las aberraciones; también la densidad de los fotorreceptores y el tamaño del objeto son aspectos que tiene en cuenta esta función. u es la frecuencia espacial, k es una constante y da cuenta del cociente señal-ruido y T es la integración del tiempo en el ojo. La X_o indica el tamaño angular del objeto y X_{max} el tamaño angular máximo del área de integración, N_{max} es el máximo número de ciclos sobre el cual el ojo puede integrar la información y se le ha asignado un valor fijo de 15 ciclos, η es el cuanto de eficiencia en el ojo y se refiere al promedio del número de fotones que causan excitación a los fotorreceptores dividido entre el número de fotones que entran en el ojo. Se considera una constante de valor 0.03. El factor de conversión del fotón, que va a depender de la fuente de luz, se expresa con el símbolo ρ y la iluminación retiniana expresada en troland (E_r) está definida por la luminancia del objeto y el diámetro pupilar. Con Φ_0 , Barten se refiere a la densidad espectral del ruido neural y u_0 es la frecuencia espacial sobre la cual cesa la inhibición lateral.

Con este modelo Barten combina varios aspectos involucrados en la sensibilidad al contraste del sistema visual humano, parámetros que son conocidos en nuestro experimento, de manera que este hecho ha sido un factor decisivo para aplicarlo a los resultados obtenidos en nuestro trabajo.

1.2.4. Reconocimiento de letras

Hasta este punto de la memoria se han recordado algunos conceptos tradicionales sobre la función de sensibilidad al contraste, fundamentalmente de redes sinusoidales, que como ya se ha comentado tienen su importancia porque introducen un lenguaje que sigue siendo empleado al referirnos a la sensibilidad al contraste de letras, aunque sean conceptos distintos y por tanto no comparables.

Esta sección incluye dos partes, en la primera de ellas se pretende tan solo dar una perspectiva de la importancia que tiene el reconocimiento de las letras frente a las ondas sinusoidales en la vida diaria, tal es así que uno de los focos de la investigación más actual en neuropsicología visual se centra en esa línea, de hecho se aportan algunas pinceladas sobre la misma. La segunda parte permite acercarnos a las teorías que han ido surgiendo a lo largo del tiempo sobre el reconocimiento de letras de contraste umbral, en las que se trata de identificar el ancho de banda o los canales visuales que intervienen en su reconocimiento, o sobre el número de ciclos/letra necesario para poder reconocerlas etc, aspectos sobre los que hoy por hoy todavía no existe un consenso.

Letras supraumbral

Antes de comenzar con esta sección vamos a definir las letras supraumbral como aquellas que presentan un contraste elevado de manera que son fácilmente visibles, un ejemplo de las mismas puede ser las letras impresas en un texto escrito.

Por otro lado, el objetivo final del sistema visual humano consiste no tanto en el simple reconocimiento de los objetos que nos rodean, sino más bien en la extracción de la información relevante del medio con el fin de podernos desenvolver en él de la forma más eficiente posible. Cómo es la evolución espacio-temporal de las imágenes a lo largo de la vía visual, o por qué necesitamos en ocasiones procesados de alto nivel en los que se utilizan recursos como la atención y la memoria para percibir los objetos, son algunas de las preguntas que surgen entre los investigadores de la neurociencia y la psicología visual.

Por otro lado, el desarrollo del lenguaje escrito representa un logro importante tanto cognitivo como cultural. La lectura representa una de las tareas más complejas que los humanos pueden dominar y que no se puede atribuir a una predisposición genética. Para muchos científicos, la lectura constituye un campo de investigación especialmente atractivo en el que aparece de forma obligada el reconocimiento de ciertos patrones visuales. Obviamente no podemos entender lo que leemos si no reconocemos las letras para formar palabras y la percepción de dichas letras envuelve la reunión de los rasgos visuales dentro de las mismas. Por este motivo, el reconocimiento de las letras como estímulo experimental es ampliamente utilizado en investigación. Estos estímulos son patrones visuales que ya han sido aprendidos, son fáciles de construir, fáciles de controlar y además se pueden nombrar.

En este sentido y desde el punto de vista de la neuropsicología existen varios frentes de investigación abierta. Por un lado nos encontramos con estudios sobre la percepción de letras supraumbral (Fiset et al., 2009, Pelli et al., 2009), entre los que se incluyen técnicas de electrofisiología (Rey et al., 2009). En estos trabajos se investiga cómo partiendo de ciertos rasgos visuales somos capaces de construir las letras.

Pero sin duda alguna, los avances desarrollados en la última década en técnicas de imagen para la neurociencia visual ha suscitado gran interés en el campo de la percepción humana. En la actualidad el uso de imágenes de resonancia magnética funcional (*fMRI*) busca mimetismos entre los patrones de actividad neuronal que son evocados por letras y los evocados por pseudoletras, es decir, por caracteres con los mismos rasgos que las letras pero que en su conjunto no llegan a formar una letra que pueda ser reconocida como tal (James et al., 2009, Wong et al., 2009). Se ha encontrado que la identificación de letras responde a procesados de alto nivel donde intervienen no sólo las propiedades del estímulo sino también la experiencia del observador (James et al., 2009). Otros investigadores (Wong et al., 2009) sugieren que una experiencia motora, como la escritura, puede activar algunas zonas del cerebro cambiando el procesamiento visual y avalan la idea de una interacción íntima entre los sistemas perceptivo y motor para la posterior percepción de las letras.

Aunque la investigación sobre letras supraumbral está en un momento álgido, incluso podría decirse que más que en ondas sinusoidales, gracias sobre todo al avance de las nuevas tecnologías como la *fMRI*, en este trabajo vamos a ceñirnos a letras de contraste umbral, aportando a continuación algunas de las teorías sobre el reconocimiento de este tipo de letras.

Teorías del reconocimiento de letras de contraste umbral

Desde hace unos 25 años, ha surgido un fuerte interés por las letras de contraste umbral para caracterizar la visión espacial humana, pero en ningún caso ha desbancado al empleo de ondas sinusoidales; es más, la fuerte tradición en el uso de las mismas ha generado un denominador común, el lenguaje, un lenguaje heredado de la experiencia con redes. Cuando nos referimos a las letras seguimos hablando de frecuencias espaciales, de canales visuales y de su ancho de banda; aún sin tener claro si esa terminología es suficientemente precisa para definir la información obtenida de una letra los distintos investigadores se han empeñado en mantenerla, intentando equiparar aspectos de la visión tan difíciles de comparar como una red sinusoidal y una letra.

En esta tesis en la que se ha trabajado con letras de contraste umbral necesitamos algunos conceptos y tenemos que respetar los ya establecidos, por este motivo, a continuación se va a hacer un breve repaso de cómo la investigación ha ido acoplado el lenguaje de las ondas sinusoidales a las letras y de las teorías que han surgido y siguen surgiendo.

En primera instancia, vamos a suponer, de forma muy simplificada, que el procesado de la información por el sistema visual humano consiste en filtros selectivos a algunas características que definen el objeto y que suprimen otras, para obtener la representación final percibida por el sujeto. Partiendo de esta premisa, los investigadores manipulan las letras introduciendo elementos (filtros, ruido visual, emborronamiento a través de lentes positivas, etc), que reduzcan la información que define dichos estímulos, para determinar cuál es la frecuencia de corte del filtro que permite seguir identificando la letra. Independientemente de si es lo más adecuado o no, la frecuencia espacial del filtro utilizado ha sido el elemento por excelencia empleado para definir el número de ciclos/letra necesario para la identificación de la misma. Ginsburg, 1987, en su estudio sobre el reconocimiento de objetos entre los que se encontraban rostros y letras, determinó mediante filtros de distintas frecuencias espaciales y diferentes anchos de banda, que se requieren 2.5 ciclos/letra para la identificación de la letra "E", pero sólo 1.5 para la "L", de manera que la frecuencia espacial necesaria para el reconocimiento de las letras de Snellen lo estableció entre 1.5 y 2.5 ciclos/letra. Otros autores como Pelli et al., en 1988, encuentran que 2.5 ciclos/letra es la frecuencia espacial necesaria que proporciona la señal visual suficiente para que un sujeto sea capaz de identificar una letra. En el mismo sentido que Ginsburg, pero empleado distintos tipos de filtrado, los resultados de Akutsu et al., (2000), sugieren que la frecuencia espacial crítica requerida para reconocer letras desenfocadas con una borrosidad óptica relativamente pequeña (< 4.00 D) corresponde aproximadamente a 1.5 ciclos/letra, mientras que, con grandes cantidades de borrosidad (> 6.00 D) es de 2.5 c/l, atribuyendo este hallazgo a que los componentes de altas frecuencias espaciales en letras grandes tienen una mayor visibilidad.

También el ancho de banda y el canal visual son conceptos que se siguen manteniendo cuando nos referimos al reconocimiento de las letras. Si tenemos en cuenta que en la vida diaria pasamos horas reconociendo rasgos entre los que se encuentran las letras pero no detectando ondas sinusoidales, parece razonable utilizar dichas letras para caracterizar los canales que se activan durante una actividad cotidiana como es la lectura. Mientras que las redes tienen un ancho de banda estrecho, las letras están formadas por rasgos con múltiples orientaciones y contienen un rango de frecuencias espaciales más amplio, lo cual complica la interpretación teórica de los resultados de los trabajos que estudian los mecanismos visuales. Por otro lado, es conocido que para optimizar la transmisión de la información en cualquier sistema de comunicación, hay un principio básico que consiste en que las características del transmisor y del que recibe la señal deben ser igualadas. Pero en el caso del sistema visual humano y teniendo en cuenta que el espectro de frecuencias espaciales de las letras es ancho, no está claro cuál es el canal o los canales que se activan en los observadores para sintonizar con la frecuencia espacial objeto en el proceso de identificación de las letras; más aún teniendo en cuenta que las letras de distintos alfabetos están formadas por líneas que las definen y que son muy distintas según la fuente empleada. Así, las letras de Sloan tienen pocas líneas y gruesas y las de Monotype cursiva o Kunstler varias líneas curvadas y finas. Obviamente, la investigación llevada a cabo en este sentido, dependiendo de la fuente, las letras... genera distintos resultados, aunque bien es verdad que no difieren tanto como se podría esperar. En 1985 Legge preocupado siempre por la lectura, ha basado gran parte de su investigación en determinar cuáles son los factores visuales que limitan la capacidad lectora. En su trabajo ha estudiado cuál es el ancho de banda crítico necesario para alcanzar una lectura óptima, encontrando que ese valor es de 2.0 ciclos/caracter (Legge et al., 1985). Para llevar a cabo su investigación, Legge et al., (1985) manipularon las letras con filtros paso-baja revelando, entre otros resultados, que el ancho de banda crítico era independiente del tamaño del carácter. El resultado obtenido en este trabajo sugiere que para la lectura puede ser necesario tan sólo un canal de frecuencia espacial de una octava de ancho de banda, aspecto que ya había sido apuntado por Ginsburg (1978) y corroborado posteriormente por Solomon y Pelli en 1994 en el reconocimiento de algunos objetos entre los que se incluían las letras.

También la interpretación humana de la señal filtrada en función del ángulo subtendido ha suscitado interés entre los investigadores, y aunque en principio se postulaba sobre la independencia del tamaño para la identificación, las últimas investigaciones apuntan a que las frecuencias espaciales objetos empleadas en la identificación de las letras dependen del tamaño de las mismas (Alexander 1994). Se ha observado un desplazamiento en la banda crítica de frecuencias espaciales objeto (Parish et al., 1991; Nasanen et al., 1993, Hall et al., 1996) hacia frecuencias espaciales más bajas a medida que el ángulo subtendido por la letra va disminuyendo hacia el límite de la agudeza. Esto implica que la identificación relativa de varias letras, por ejemplo las letras de Sloan, pueda ser diferente para letras grandes que para letras pequeñas, empleándose las altas frecuencias espaciales en el reconocimiento de letras grandes y las bajas en el caso de las pequeñas.

Majaj et al., (2002) en base a la falta de consenso entre los distintos autores, donde la frecuencia espacial para la identificación de la letra difiere dependiendo del

alfabeto o de la fuente utilizada, introduce un término nuevo: la *stroke frequency*, que define como el número promedio de líneas cruzadas a lo largo de la letra dividida por la anchura angular de las mismas. De tal manera que para las letras de Sloan la *stroke frequency* es de 1.6 líneas/letra y para los caracteres del alfabeto chinos que contienen muchos más rasgos, será de 2.8 líneas/letra. Los autores muestran que en todas las tareas visuales que han sido estudiadas en el trabajo (ondas sinusoidales, cuadradas, letras filtradas y no filtradas), los sujetos siempre emplean un único canal de 1 ± 0.7 octavas de ancho, cuya frecuencia central viene determinada por la *stroke frequency* de la letra y que para letras de bordes definidos (letras no filtradas), como las letras empleadas en nuestro trabajo, la frecuencia central del canal empleada en el reconocimiento puede ser determinada por la siguiente expresión:

$$f_{canal} / 10c / g = (f_{stroke} / 10c / g)^{2/3} \quad (1.9)$$

En base a estos resultados los autores concluyen que la identificación de la letra está mediada únicamente por las propiedades de la señal que será quien genere la sintonización del canal en el observador; por otro lado, demuestran que la identificación de la letra depende del tamaño de la misma, aspecto que ya había sido sugerido con anterioridad (Alexander et al., 1994).

Majaj et al., 2002, realizaron un trabajo muy completo en el que se ha contemplado no sólo los diferentes estímulos con los que trabajan otros autores, sino también, diferentes tipos de filtros, ruido, etc. La solidez de sus resultados ha permitido explicar las diferencias encontradas en la literatura, y esto ha sido el factor condicionante para el empleo de su teoría en esta tesis.

1.3. Iluminación y adaptación del sistema visual

El trabajo que se presenta versa sobre la sensibilidad al contraste en el reconocimiento de letras, pero no debemos olvidar que se van a cuantificar los umbrales de sensibilidad al contraste en función de las variables de iluminación ambiental que envuelve el proceso de reconocimiento, de ahí que le dediquemos una parte del capítulo a las magnitudes radiométricas y fotométricas.

1.3.1. Magnitudes radiométricas y fotométricas

Este apartado no tiene más pretensiones que la simple definición de algunas de las magnitudes radiométricas y fotométricas que irán apareciendo a lo largo del trabajo y aunque son ampliamente conocidas en la literatura clásica (McCluney, 1994) se ha considerado oportuno mencionarlas.

Hay cuatro magnitudes fundamentales en radiometría que son la base de ambas, radiometría y fotometría. Definiendo las primeras, las segundas son inmediatas al considerar su densidad espectral. Se define el *flujo radiante* ($\Phi_e = dQ/dt$) como la cantidad de energía (dQ) que llega, atraviesa o sale de un área determinada o superficie específica por unidad de tiempo. Su unidad es el watio (W) y es interesante para los casos en los que se quiere estudiar la radiación total por unidad

de tiempo, que llega a un dispositivo (sensor o detector). Si consideramos la densidad espectral como $d\Phi_e/d\lambda$, podemos obtener la magnitud fotométrica derivada, usada para medir el efecto de la luz. Es el llamado *flujo luminoso* (Φ), cuya unidad es el lumen (lm), definido por la siguiente expresión:

$$\phi = 638 \int_{380}^{770} V(\lambda) \phi_e d\lambda \quad (1.10)$$

donde 638 es la constante empleada para relacionar las magnitudes radiométricas con las fotométricas en condiciones fotópicas, dada en lm/W, y λ viene dado en nanómetros (nm). $V(\lambda)$ es la función de sensibilidad espectral fotópica del observador patrón.

Para aplicaciones prácticas muchas veces es necesario cuantificar el flujo radiante por unidad de superficie receptora, para ello hay que hablar de *irradiancia* ($E_e = d\Phi_e/dS$) y se define como la cantidad de energía que llega o sale de un área determinada o superficie específica por unidad de tiempo y unidad de superficie, en este caso sin importar la distribución angular o direccional de la radiación en cuestión. Su unidad es el W/m². Su equivalente en fotometría es la *iluminancia* ($E = d\Phi/dS$) siendo esta el flujo luminoso que incide en una superficie por unidad de área. Se mide en lux (lx) que es equivalente a lm/m².

Cuando la dirección de incidencia o emergencia interesa, se habla de *intensidad radiante* ($I_e = d\Phi_e/d\omega$), como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, que incide o emerge de un determinado punto en el espacio en una dirección específica. Este concepto es muy útil para referirse a la radiación que viene de las estrellas o fuentes puntuales, donde la dirección de observación es importante. Su unidad es el W/sr. En magnitudes fotométricas se conoce como *intensidad luminosa* ($I = d\Phi/d\omega$) de la fuente puntual, medida en candelas (cd) que es equivalente a lm/sr, al flujo luminoso que incide en una superficie en una determinada dirección por unidad de ángulo sólido.

Por último, la *radiancia* ($L_e = d^2\Phi_e/dS d\omega \cos\theta$) es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido y unidad de área proyectada, que incide, atraviesa o emerge de un punto específico en una superficie específica en una dirección determinada. Su unidad es W/m²sr. Por eso, cuando se habla de la radiancia es importante hacer referencia a los tres conceptos que la definen: superficie, el punto de ella y la dirección desde ella. Esta magnitud es utilizada para describir la propagación de la radiación a través del espacio y en materiales transparentes o semitransparentes. Se puede hablar en fotometría de *luminancia* ($L = d^2\Phi/dS d\omega \cos\theta$) que es el flujo luminoso emitido por unidad de área proyectada y por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, que se mide en cd/m² o lm/m²sr.

La distribución espectral de radiancia de un cuerpo negro ($L_{bb\lambda}$) viene dada por la expresión:

$$L_{bb\lambda}(\lambda, T_c) = \frac{2hc^2}{\lambda^2 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1.11)$$

donde h es la constante de Planck, c la velocidad de propagación de la luz en el vacío y K la constante de Boltzmann. La temperatura que mejor ajusta la densidad

espectral de luminancia de una lámpara a una función de cuerpo negro se conoce como *temperatura de color*, y se representa por T_c y viene dada en Kelvin (K).

Si la luminancia proveniente de un área determinada aumenta, el efecto inmediato en el ojo es la disminución del tamaño pupilar, con lo cual la cantidad de luz que llega a la retina no tiene que ser necesariamente superior a la que llegaría si la luminancia fuera menor. Por ello, cuando se estudian procesos relacionados con el sistema visual humano se emplea otra magnitud denominada *iluminación retiniana* (E_r), que indica el flujo luminoso que incide en la retina por unidad de área y se calcula como $E_r = LS$, donde L representa la luminancia de la superficie, expresada en cd/m^2 y S la superficie de la pupila expresada en mm^2 . Se define una nueva unidad para esta magnitud que es el troland (td) definido como el producto de una luminancia de 1 cd/m^2 por un área pupilar de 1 mm^2 . En nuestros experimentos la iluminación retiniana siempre ha sido fotópica.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las magnitudes más importantes y su unidad correspondiente.

Magnitud radiométrica	Unidad SI	Definición	Equivalente fotométrico	Unidad SI
Flujo Radiante (Φ_e)	W	$\Phi_e = dQ/dt$	Flujo Luminoso (Φ)	Lumen (lm)
Irradiancia (E_e)	W/m^2	$E_e = d\Phi_e/ds$	Iluminancia (E)	$\text{Lumen/m}^2 = \text{lux}$ (lx)
Intensidad radiante (I_e)	W/sr	$I_e = d\Phi_e/dw$	Intensidad luminosa (I)	$\text{lm/sr} = \text{candela}$ (cd)
Radiancia (L_e)	$\text{W/m}^2\text{sr}$	$L_e = \frac{d^2\phi_e}{dw ds \cos\theta}$	Luminancia (L)	$\text{lm/m}^2\text{sr}$
			Iluminancia retiniana (E_r)	troland (td)

Tabla 1.1 Resumen de las magnitudes fundamentales

1.3.2. Adaptación del sistema visual

Las superficies de los objetos que nos encontramos en la vida diaria presentan reflectancias que pueden variar hasta en un factor 30. Sin embargo, dichas superficies pueden ser iluminadas a través de un extenso rango de radiación que pueden generar diferencias aún mayores condicionando al sistema visual a adaptarse. En este trabajo se ha empleado variaciones de luminancia desde 1 cd/m^2 a 1000 cd/m^2 , provocando en el sujeto adaptaciones a las diferentes condiciones de luminancia consideradas.

Si a su vez se tiene en cuenta que la relación entre las respuestas máximas y mínima de una célula ganglionar es de 100 a 1 se puede deducir que el sistema visual está preparado, en principio, para responder al intervalo de luminancias presentes en la

escena visual, aunque deberá recurrir a mecanismos que le permitan adecuar su respuesta final. El proceso de “adaptación a cambios de iluminación” permite al ojo que se adapte a ambientes luminosos cuya luminancia varía hasta en 12 órdenes de magnitud, siendo capaz de detectar pequeñas variaciones de luminancia en el campo visual (Blackwell, 1946). A medida que aumenta la luminancia del campo se requiere mayor luminancia del estímulo para que este pueda ser detectado. La relación entre el incremento de luminancia necesario para detectar el estímulo (ΔL) y la luminancia del fondo (L) es constante, cumpliéndose así la Ley de Weber, cuando los niveles de iluminación del fondo son mayores de 1 cd/m^2 .

Esto evidencia que la retina realiza un re-escalamiento de los niveles presentes en la escena hasta adecuarlos al rango operativo con que trabajan las etapas posteriores del procesamiento visual. De hecho se considera que la adaptación es un fenómeno fundamentalmente retiniano, sin olvidar que también hay otros factores que contribuyen en la adaptación, como la variación en el tamaño de la pupila, cambios en la actividad neural, etc.

Adaptación a la oscuridad y umbral absoluto

El umbral de detección del sistema visual se puede definir como el mínimo estímulo luminoso necesario para evocar una respuesta detectada como sensación luminosa. Si se mide el tiempo requerido por el sistema visual para alcanzar dicho umbral de detección partiendo de condiciones fotópicas (figura 1.15) se observa que después de 60 minutos en la oscuridad se alcanza el umbral absoluto. El ojo no puede detectar un estímulo con una luminancia menor que este nivel.

Como se observa en la figura 1.16 donde se representan el log umbral de intensidad relativo en función del tiempo de adaptación a la oscuridad, existen dos curvas bien diferenciadas, esto sugiere que existen dos mecanismos implicados en la sensibilidad a la luz. Esta es la base de la teoría de la duplicidad de la visión, la cual asume que la visión escotópica, está mediada por los bastones, y la visión fotópica implica otro mecanismo mediado por los conos.



Figura 1.16 Curva de adaptación a la oscuridad

El cambio de la visión escotópica a la fotópica no es realmente tan abrupto como sugiere la curva de la figura 1.16 sino que, como ya se ha comentado, existe un rango de luminancias entre 0.001 y 3-10 cd/m^2 en el que los mecanismos de conos y bastones operan simultáneamente, denominado rango mesópico.

Adaptación a la luz

Mientras que la adaptación a la oscuridad es un proceso en el que la sensibilidad del sistema visual humano se incrementa, la adaptación a la luz es un proceso de reducción de la sensibilidad.

Pasar de un estado en el que el ojo está adaptado a la oscuridad a otro de mayor luminosidad puede resultar bastante molesto. No obstante, una visión cómoda se recupera en menos de un minuto. La adaptación a la luz es un fenómeno relativamente rápido si se compara con la adaptación a la oscuridad. Este aspecto fue tenido en cuenta en el diseño del procedimiento experimental de este trabajo.

El proceso de adaptación modifica, mediante los mecanismos de adaptación del ojo, la sensibilidad retiniana según las variaciones espacio-temporales o las características espectrales de la luz. Los mecanismos que intervienen como ya se ha comentado son: los cambios en el tamaño de la pupila, los cambios en el estado estable de concentración de pigmentos fotosensibles en la retina y cambios en el nivel de actividad neural de las células del sistema visual.

El tamaño de la pupila controla la cantidad de luz que entra en el ojo, por tanto debe ser considerado como un factor determinante en la iluminación retiniana. Pero si se considera la relación entre el diámetro pupilar máximo y mínimo que puede ser alcanzado en función de una baja y alta iluminación respectivamente, se observa que su acción puede dar cuenta de un factor 30, poco más de una unidad logarítmica. Esto es sólo una pequeña parte de la variación total que sufre el sistema visual durante el proceso de la adaptación. Por otro lado, el tiempo que tarda el diámetro pupilar en ajustarse a un nuevo grado de iluminación va a depender, no solo del salto producido, sino también del sentido en que se realiza, pudiendo variar desde una fracción de segundo hasta unos pocos minutos. Partiendo de una situación en la que el sujeto se encuentra adaptado a la oscuridad y ha de adaptarse a una luminancia de 320 cd/m^2 la variación en el diámetro pupilar, que será de 8 mm a 3 mm se produce en 4.5 s mientras que el mismo cambio en sentido contrario puede tardar hasta 3 minutos (Wyszecki and Stiles, 1982).

Por otra parte, los cambios en el estado estable de concentración de pigmentos fotosensibles pueden alterar la sensibilidad del ojo sobre un rango de intensidades de luz más amplio, ocho unidades logarítmicas, aunque para ello requiere de periodos de tiempo del orden de los minutos.

Finalmente, los cambios en la actividad de las células de la retina ajustan la sensibilidad a cambios en la intensidad de la luz en un rango de tres unidades logarítmicas y sucede en tiempos del orden de los milisegundos, por lo que se asocian a los procesos rápidos de adaptación.

1.3.3. Deslumbramiento. Tipos.

Según la Comisión Internacional de Iluminación se define el deslumbramiento como aquella condición de visión en la que existe una molestia y/o reducción en la habilidad para ver objetos significantes, debido a una distribución o rango de luminancias inapropiado o a contrastes extremos en el espacio o en el tiempo. Comúnmente, y en términos menos complejos, entendemos por deslumbramiento la sensación que sufre un sujeto cuando en su campo de visión existe una luminancia considerablemente más alta que aquella a la que su sistema visual está adaptado.

Se distinguen dos tipos de deslumbramiento (Stiles, 1929): el molesto y el incapacitante.

Deslumbramiento molesto

El deslumbramiento molesto es un fenómeno subjetivo que aparece cuando la iluminancia de alguna zona parafoveal es mayor que la foveal pudiendo ocasionar una reducción del confort visual aunque no interfiera con la resolución o identificación del estímulo visual.

Deslumbramiento incapacitante

Uno de los tipos de deslumbramiento más estudiados es el denominado deslumbramiento incapacitante o más conocido por su nombre inglés *disability glare*. Aunque en principio se discutió sobre el origen de este tipo de deslumbramiento, Vos en 1984 mostró que los fenómenos de scattering intraocular generados principalmente por la córnea, cristalino y la retina son la causa fundamental de esta situación visual. Dicha situación va a provocar una *luminancia equivalente de velo* sobre la imagen retiniana que genera una reducción del contraste de ésta, causando una pérdida en la calidad visual del individuo.

Numerosas investigaciones han focalizado la atención en cuantificar la pérdida de visibilidad debida al deslumbramiento. El principio de que una fuente de luz pueda ser representada por una luminancia de fondo uniforme fue desarrollada por Holladay en 1926, quien realizó mediciones para diferentes valores de la iluminación en el plano del ojo del observador (E) y del ángulo entre la fuente deslumbrante y el punto de fijación (θ), encontrándose una relación que vincula la luminancia de velo (L_V) con estos dos parámetros:

$$L_V = \frac{KE}{\theta^n} \quad (1.12)$$

donde K y n son constantes que Holladay determinó como 9.3 y 2 respectivamente, para ángulos de entre 7° y 25° . Posteriormente se han ido desarrollado sucesivos trabajos que han ido ampliando este rango e introduciendo parámetros tan importantes como la edad. En la actualidad la CIE ha adoptado la siguiente expresión para determinar la luminancia de velo:

$$L_V = \frac{10E}{\theta^2} \left[1 + \left[\frac{Edad}{70} \right]^4 \right] \quad (1.13)$$

expresión empleada siempre y cuando la fuente deslumbrante sea una fuente puntual ubicada a un cierto ángulo (θ) del eje visual del sujeto, generando un velo prácticamente uniforme sobre la zona foveal de la retina.

Hay otros casos, como el que se presenta en esta memoria, donde la geometría de la fuente deslumbrante no tiene una forma puntual, sino que sigue un patrón que podríamos asemejar a anillos concéntricos situados alrededor del estímulo de observación (Adrian and Topalova 1991). Si el test es visto fovealmente, el estado de adaptación viene dado por la luminancia de la fovea central, la cual tiene un diámetro angular cercano a los 2°. Por otro lado, la luminancia del entorno que hay alrededor del test provoca una luz difusa en los medios ópticos que se extiende de manera uniforme hasta la fovea, aumentando de esta forma la luminancia de adaptación foveal. De manera que si se integran las condiciones de entorno, se puede obtener una variante de la expresión 1.15, así, la luminancia en la fovea esta compuesta por la luminancia de los 2° centrales y la luminancia de velo debida al entorno visual. Esto puede ser expresado:

$$L_{Adapt} = L_{2^\circ} + L_V \quad (1.14)$$

Para un observador de edades comprendidas entre 20 y 30 años, la luminancia de velo puede ser obtenida a través de la expresión de Holladay:

$$L_V = 9.2 \times 2\pi \int L(\theta) \frac{\cos\theta \sin\theta}{\theta^2} d\theta \quad (1.15)$$

con $L(\theta)$ como el promedio de la luminancia en un anillo situado a una distancia angular θ con la línea de fijación y θ el ángulo desde el anillo a la línea de fijación.

Simplificando la expresión se obtiene:

$$L_V = 0.017608 \sum_{i=1}^n L_i (\ln\theta_{i+1} - \ln\theta_i) \quad (1.16)$$

siendo L_i el promedio de luminancia en cada anillo, expresado en cd/m^2 y θ_i en grados son los límites angulares de cada anillo subtendidos desde el observador. En este modelo se puede asumir que los dos primeros grados centrales del campo visual no intervienen en la luminancia de velo.

Capítulo 2

Influencia de la luminancia del entorno en el reconocimiento de letras de contraste umbral para distintos tamaños angulares

Este capítulo comienza con la motivación del grupo de Óptica de la Visión que hizo poner en marcha una serie de tres trabajos que cubrieran los aspectos no debidamente profundizados en la literatura, sobre la influencia de la iluminación en las medidas de sensibilidad al contraste de letras. Esta primera sección del capítulo 2 se ha completado además con algunas de las referencias más interesantes relacionadas con el tema.

A continuación se describirá el desarrollo experimental empleado en este primer trabajo. Para ello, comenzaremos con la selección y evaluación de los participantes en el estudio, y continuaremos con el diseño y acondicionamiento de la sala donde fueron realizadas las medidas de CS de letras para los experimentos realizados en esta tesis.

Posteriormente, se detallará cómo se llevó a cabo la calibración de la luminancia del entorno próximo al test, del fondo donde se dispusieron los optotipos de letras para la medida de la sensibilidad al contraste y de los tonos de grises que fueron empleados para el diseño de dichas letras. Seguidamente, se describirá el procedimiento empleado en la realización de las medidas de CS de los sujetos.

Este capítulo concluye con el análisis estadístico de los resultados obtenidos, y con su comparación y discusión con otros resultados tanto teóricos como experimentales conocidos en la literatura.

El capítulo está basado en el artículo de Aparicio, J. A. et al., (2010) “Quantitative and functional influence of surround luminance on the letter contrast sensitivity function”, publicado en *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol 30: 188–199. El estudio fue parcialmente publicado en el 2006 por Mar, S. et al., en *Óptica Pura y Aplicada*, 39 (3) 235-245, bajo el título “Líneas de investigación del Grupo de Óptica de la Visión de la Universidad de Valladolid”. También fue presentado en la edición número 19 y 21 del Congreso Internacional de Optometría, Contactología y Óptica Oftálmica correspondientes a los años 2006 y 2010 respectivamente, en la Octava Reunión Nacional de Óptica en el 2006 y en el Congreso Internacional Luxamerica 2008.

La contribución de Isabel Arranz al estudio, en colaboración con otros coautores, fue la búsqueda bibliográfica, diseño del experimento, realización de las medidas e interpretación de los resultados.

2.1. Motivación

Una forma de caracterizar la eficacia visual de un individuo es a través de sus funciones visuales como la agudeza visual (AV), la sensibilidad al contraste, la discriminación de colores, etc. Tras evaluar cada una de ellas, se puede obtener información sobre la calidad visual del sujeto, siempre y cuando las condiciones en que se realizan las pruebas sean las adecuadas. De hecho, sus resultados van a depender, entre otros factores, de las condiciones de iluminación empleadas, de manera que se hace necesario mantener dichas condiciones dentro de unos márgenes adecuados.

Desde hace años se defiende la idea de que para poder valorar la capacidad visual de un sujeto no es suficiente con la evaluación de la agudeza visual; hay características importantes de una escena visual que para poder ser percibidas requieren otras habilidades que pueden ser evaluadas con la medida de la función de sensibilidad al contraste. Incluso se ha extendido su uso para la detección de patologías oculares en estadios incipientes y monitorización de las mismas (Regan and Neima, 1983).

Un problema importante en la práctica clínica es la falta de estandarización en las condiciones de luminancia del entorno (L_S) en las que se realizan las pruebas visuales, problema especialmente acusado en los casos donde se precisa una comparación de los resultados obtenidos con otras medidas, realizadas con frecuencia en condiciones ambientales que pueden ser diferentes, comparaciones que son necesarias para proporcionar un diagnóstico y tratamiento adecuado. En relación a la medida de la agudeza visual, existe suficiente información en la bibliografía que analiza de forma exhaustiva la influencia tanto de la luminancia del entorno como del test (L_T) (Lythgoe, 1932; Shlaer, 1937; Patel, 1966; Sheedy et al., 1984). Gracias a estos trabajos ha sido posible la estandarización de las recomendaciones y directrices concernientes a las condiciones de luminancia en la AV (National Academy of Science. National Research Council (NAS-NRC), 1983; International Organization for Standardization (ISO), 1996; - American National Standard - Instruments ANSI, 2004). En cuanto a la medida de la CS , la situación no está tan clara. A pesar de que hay varios autores que han observado una disminución de la misma con la reducción de la luminancia del test (Blackwell, 1946; de Valois et al., 1974; Kelly, 1977; Banks et al., 1987; Sucs and Uvijls, 1992; Puell et al., 2004), el nivel de luminancia del entorno constituye una variable poco estudiada en la función de sensibilidad al contraste. De hecho, en la práctica clínica habitual no existen normativas que regulen este aspecto y en ocasiones se pueden observar diferencias importantes entre los resultados obtenidos de un gabinete a otro, incluso dentro del mismo, en base a la ausencia de consenso en las condiciones de L_S .

Cox et al., (1999) midieron la sensibilidad al contraste en diferentes condiciones de luminancia del entorno para los dos tipos de test de CS conocidos, el test de

reconocimiento (letras) y el test de detección (ondas sinusoidales). Para las pruebas de reconocimiento emplearon tarjetas de letras de Pelli-Robson impresas y para las de detección usaron estímulos sinusoidales presentados en un monitor de ordenador. Uno de los resultados observados fue la discrepancia obtenida sobre la influencia de la luminancia del entorno en la *CSF* para letras y para ondas sinusoidales. Mientras que para las primeras se observa un aumento del log (*CS*) con la luminancia del entorno, para las redes no se observan cambios significativos en la medias del log (*CS*) al aumentar la L_s . Para ambas medidas el número de participantes fue pequeño y en las fotografías mostradas en el artículo se observa una falta de homogeneidad en las condiciones de luminancia, además, se emplearon únicamente dos frecuencias espaciales menores de 4 ciclos/grado en el caso de letras; de aquí que el trabajo no aporte suficiente información sobre la influencia de la luminancia de entorno en la medida de la *CSF*. Otro artículo, escrito por Khanani et al., (2004) describe la medida de umbrales de contraste con letras de Sloan realizada a 30 sujetos para tres frecuencias espaciales (8, 12 y 20 ciclos/grado) pero únicamente contempla dos condiciones de L_s , por lo que el trabajo no proporciona suficiente información sobre la influencia de la luminancia del entorno en la medida de *CS*.

Un asunto controvertido no sólo en investigación sino también en la práctica clínica es la elección del test (ondas sinusoidales o letras) empleado en la medida de la sensibilidad al contraste. Los resultados obtenidos por ambos métodos no proporcionan idéntica información, los test de letras no representan frecuencias espaciales puras en el espectro de Fourier y se basan en el contraste de Weber, precisan una tarea visual más compleja, que consiste en el reconocimiento de la letra, y no en la simple detección de las ondas sinusoidales (basado en el contraste de Michelson). Las diferencias entre ambos métodos no sólo residen en los estímulos presentados, la *CS* de letras está formada por una mezcla de frecuencias espaciales con un ancho de banda mayor que el de las ondas sinusoidales, de hecho, los mecanismos neurológicos implicados parecen ser diferentes (Strasburger et al., 1991, 1994, Strasburger and Rentschler, 1996). De manera que en la literatura nos podemos encontrar con argumentos a favor y en contra de cada uno de los métodos.

La mayor familiaridad de las letras, el no requerir aprendizaje o entrenamiento especial, unido a un diseño más sencillo y una mayor fiabilidad obtenida en pruebas de validación “test-retest”, ha favorecido su uso tanto en investigación como en la práctica clínica y ha sido la opción elegida por nuestro grupo de trabajo para la determinación de la medida de la sensibilidad al contraste.

Los test comerciales empleados en la medida de *CS* tienen inconvenientes importantes. Uno de los test más ampliamente utilizado en clínica, es la tarjeta de letras de Pelli-Robson, que permite determinar dos frecuencias espaciales fundamentales cuando se sitúa a dos distancias diferentes del observador. Proporciona dieciséis contrastes con una diferencia entre cada uno de ellos de 0.15 unidades logarítmicas. Otro tipo de test son los denominados test de agudeza de bajo contraste que permiten la medida de frecuencias espaciales medio-altas y altas pero sólo en cinco contrastes. Podemos concluir que las tarjetas de letras de *CS* típicas no proporcionan información en todo el dominio de frecuencias espaciales y/o sobre cambios sutiles en la sensibilidad al contraste. Existen métodos basados en ordenador que son fiables, precisos y simples de utilizar, aunque necesitan ser calibrados regularmente (Bach, 1996; Strasburger, 1997; Colombo et al., 2009). En

este trabajo, la idea nació de la aplicabilidad clínica donde el uso de test impresos, en la actualidad, es más frecuente, por este motivo las pruebas de sensibilidad al contraste obtenidas a través de monitores de ordenador han sido desestimadas.

En este trabajo se ha diseñado una prueba de sensibilidad al contraste basado en letras para reducir la mayoría de estos inconvenientes. La prueba está formada por cuatro cartas de optotipos. Cada una de ellas está constituida por varios grupos de tres letras de tamaño constante pero con un contraste que decrece linealmente en unidades logarítmicas entre tripletes consecutivos. Cada tarjeta tiene un tamaño de letra diferente y el paso de contraste va a depender del tamaño del optotipo, pero en todos los casos es menor que los que proporcionan los test comerciales, lo cual mejora considerablemente la habilidad de detectar pequeños cambios en la CS. Se han realizado medidas de sensibilidad al contraste en letras de cuatro tamaños diferentes, 60.5 mm, 18.2 mm, 9.1 mm y 6.1 mm que vistos a una distancia de 5.2 m subtenden un tamaño angular de 40.33', 12.03', 6.02' y 4.03' respectivamente, bajo condiciones de luminancia del entorno también distintas, 1, 10, 100 y 1000 cd/m² y una luminancia del test de 200 cd/m², manteniendo en todo momento una atención especial a la homogeneidad de la luminancia. Treinta y un participantes de edades comprendidas entre los 19 y los 24 años fueron incluidos en el estudio. Se eligió a sujetos jóvenes para evitar que la opacidad de medios debida a la edad contaminara los resultados obtenidos en la medida de la sensibilidad al contraste.

En el presente trabajo se trata de estudiar la influencia de la luminancia del entorno en los resultados de la medida de la sensibilidad al contraste de letras. La idea fundamental que se persigue es la de obtener medidas cuantitativas de dicha influencia en función de los distintos tamaños de letra considerados en el estudio.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos de trabajo:

1. El sistema visual tiene una gran capacidad de adaptación a cambios de luminosidad ambiente; la sensación visual percibida mejora cuando aumenta la luminancia del entorno, viéndose reducida en condiciones de penumbra. Se propone que una luminancia del entorno alta, más elevada que la luminancia del test, mejore los resultados obtenidos en la sensibilidad al contraste.
2. Situaciones muy luminosas como la que se presenta en un día muy soleado puede impedir una visión cómoda, incluso dependiendo del grado de luminosidad podrá no solo dificultar sino incapacitar la visibilidad. El exceso de luminancia provoca situaciones en las que bien aparece un disconfort molesto o bien un deslumbramiento que puede llegar a ser discapacitante. La premisa es que una luminancia del entorno elevada, mucho más alta que la luminancia del test puede producir una reducción en los valores de sensibilidad al contraste de letras.
3. En la vida diaria nos encontramos con situaciones en las que con distintas condiciones de luminosidad ambiente tenemos que discernir diferentes objetos de tamaños variados y con diferentes contrastes, la sensación visual para observar unos u otros es también distinta dado que el sistema visual no procesa por igual la información contenida en unos y otros objetos. Se plantea que la luminancia del entorno pueda influir de diferente manera para los distintos tamaños de letra.

2.2. Desarrollo del experimento

Seguidamente se pasará a describir las características de los participantes en este estudio, así como el acondicionamiento del laboratorio de Iluminación y Visión de la Facultad de Ciencias donde se realizaron las medidas de sensibilidad al contraste. Del mismo modo, se incluye la calibración de las luminancias y el procedimiento de medida empleado con los participantes en el trabajo.

2.2.1. Sujetos

En el estudio participaron treinta y un sujetos, 20 de los cuales eran mujeres y 11 varones, todos ellos con edades comprendidas entre los 19 y los 24 años, con un promedio de edad de 22 años y una desviación estándar de 1.6. Todos eran estudiantes de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid y, cada uno de ellos firmó un consentimiento informado previo a la realización de las pruebas (anexo 1.1). Después de contestar al cuestionario, se realizó un examen optométrico completo que incluía observación de los medios oculares con oftalmoscopio directo y biomicroscopio.

El criterio de exclusión eliminó a aquellos candidatos con pasado de ambliopía, estrabismo, anisometropía mayor de +1.50 D, defectos o pérdida de transparencia en los medios oculares o cualquier observación anormal durante el examen visual, así como aquellos que estuvieran tomando cualquier tipo de medicación de forma habitual y/o durante los días previos a la revisión optométrica o a las medidas de la sensibilidad al contraste.

En una sala con buena iluminación se realizaron las pruebas optométricas. Para determinar la agudeza visual, se diseñó un test de letras de Bailey-Lovie con escala logarítmica. La refracción del sujeto se obtuvo por métodos objetivos y subjetivos buscando aquella que proporcionará la máxima agudeza visual de cada individuo (Jansonius and Kooijman, 1997; Atchison et al., 1998; Strang et al., 1999; Woods et al., 2000; Radhakrishnan et al., 2004) en visión de lejos, distancia a la que se realizaron las medidas de sensibilidad al contraste, evitando de esta manera, que el resultado pudiera estar afectado por el estímulo acomodativo (Hernández et al., 1996). Se indicó a los usuarios de lentes de contacto que prescindieran de ellas al menos dos días antes de la refracción y de las medidas. En cuanto a la *AV* se refiere, aquellos sujetos con una agudeza visual binocular menor que $-0.09 \log MAR$ (1.2 Decimal) con su mejor compensación óptica, fueron rechazados en este estudio. El rango de la *AV* binocular de los participantes fue de -0.09 a $-0.32 \log MAR$ (1.2 a 2.1 Decimal), aunque el 80% de estos valores se encontraban en un rango de -0.18 a $-0.32 \log MAR$ (1.5 a 2.1 Decimal). En el anexo 1.1 pueden encontrarse los parámetros optométricos obtenidos tras la evaluación visual de los sujetos. Si consideramos que tan solo un 15% de los candidatos iniciales fueron rechazados y no pudieron participar en el estudio, podríamos concluir que el grupo de participantes seleccionado es representativo de una población joven. Otro aspecto a considerar es que a pesar de que prácticamente todos eran estudiantes de la Diplomatura de Óptica y Optometría, ninguno de ellos había participado nunca en ningún experimento de psicofísica, por lo que se podrían considerar inexpertos en las pruebas que se llevaron a cabo.

A la hora de realizar las medidas de la sensibilidad al contraste, todos los sujetos, incluidos los usuarios de lentes de contacto y los emétopes, utilizaron lentes oftálmicas de las mismas características montadas en gafa (mineral 1.523 blanco Signet Armorlite Ibérica), que compensaba su defecto refractivo, si lo tuviere, para evitar que el método compensador de la ametropía pudiera influir en los resultados de la sensibilidad al contraste (Wachler et al., 1999; Tomlinson and Mann, 1985; Liou and Chiu, 2001). Dichas gafas fueron empleadas exclusivamente para la realización de las pruebas.

2.2.2. Dispositivo experimental

De forma simultánea a la selección de los participantes en el estudio, se procedió a adecuar el laboratorio de Iluminación y Visión para que, de forma controlada, se pudieran obtener las diferentes condiciones de luminancia del entorno con las que se iban a realizar las medidas de sensibilidad al contraste de letras.

La figura 2.1. muestra un esquema del dispositivo experimental. Como se puede observar, se dispone de una habitación con paredes blancas, aislada de la luz exterior, de medidas 6.0 x 3.0 x 3.0 m (largo x alto x ancho) en la que se ha construido una pared de corcho blanco, detrás de la cual y a la altura de los ojos de los sujetos, se coloca una caja cuadrada (0.7 x 0.7 x 0.7 m). En el fondo de la caja, que ha sido pintada de blanco mate, se situaron las tarjetas de sensibilidad al contraste las cuales eran visibles a través de un agujero circular en la pared de corcho de 0.3 m de diámetro, que actuaba como ventana para el observador. Cuatro lámparas de luz incandescente halógenas estabilizadas, también localizadas en el interior de la caja, proporcionaban una luminancia del test constante y homogénea de 200 cd/m², valor que fue seleccionado como un valor medio del intervalo de luminancias del test recomendado por las diferentes directrices que aporta la literatura consultada (International Organization for Standardization (ISO), 1996; - American National Standard - Instruments ANSI, 2004). El entorno de corcho inmediatamente exterior a la caja cuya semiapertura angular es de unos 17° aproximadamente se iluminó con 8 lámparas incandescentes de 300 W cuya intensidad podía controlarse con un autotransformador de tensión variable. Este dispositivo permitía que el corcho blanco se comportase como una fuente luminosa que proporcionaba una luminancia que de forma controlada se podía variar desde 1 hasta 1000 cd/m², con inhomogeneidades menores del 7% en el log de la luminancia, evitándose en todos los casos fuentes puntuales deslumbrantes y reflexiones no deseadas.

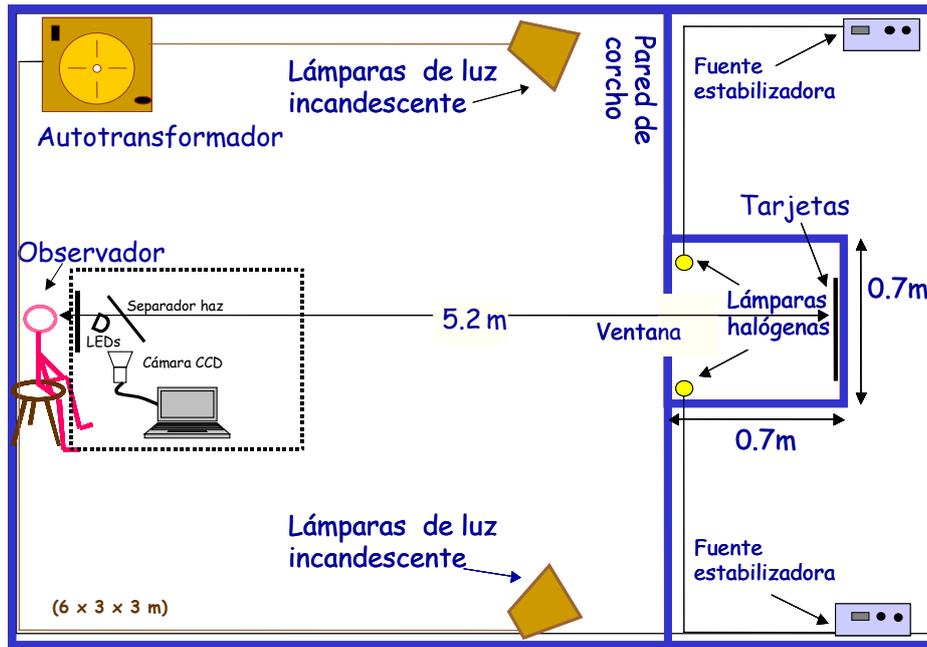


Figura 2.1 Esquema de la disposición de los elementos del equipo experimental

Por otro lado, se utilizó un cilindro de cartulina negra de 0.3 m de diámetro que se colocó en el orificio circular de la pared de corcho que hacia de ventana para la observación de los test por el sujeto. La finalidad del cilindro de cartulina negra era generar un apantallamiento que evitaba que la luz del interior de la caja iluminara las paredes de la habitación cuando el entorno era más oscuro que la luminancia del test y al contrario, también evitaba que la luz del entorno se introdujera en el interior de la caja, iluminado los tarjetas de letras, cuando la luminancia de estas últimas fuera menor que la L_S .

Las pruebas experimentales se realizaron siempre con pupila natural y para medir su diámetro se diseñó un pupilómetro. Ocho LEDs de infrarrojos situados en un cabezal circular, sobre un brazo ajustable, iluminaban la pupila del sujeto cuya imagen, tras reflejarse en un separador de haz, era obtenida con una cámara CCD equipada con un filtro que eliminaba la luz visible. La cámara estaba conectada a un ordenador que registraba la imagen de la pupila y la analizaba para medir su diámetro, siendo el error estimado, en el peor de los casos, menor de un 10% lo cual está en la línea de los resultados de Spadea et al., 2005 y de Bootsma et al., 2007.

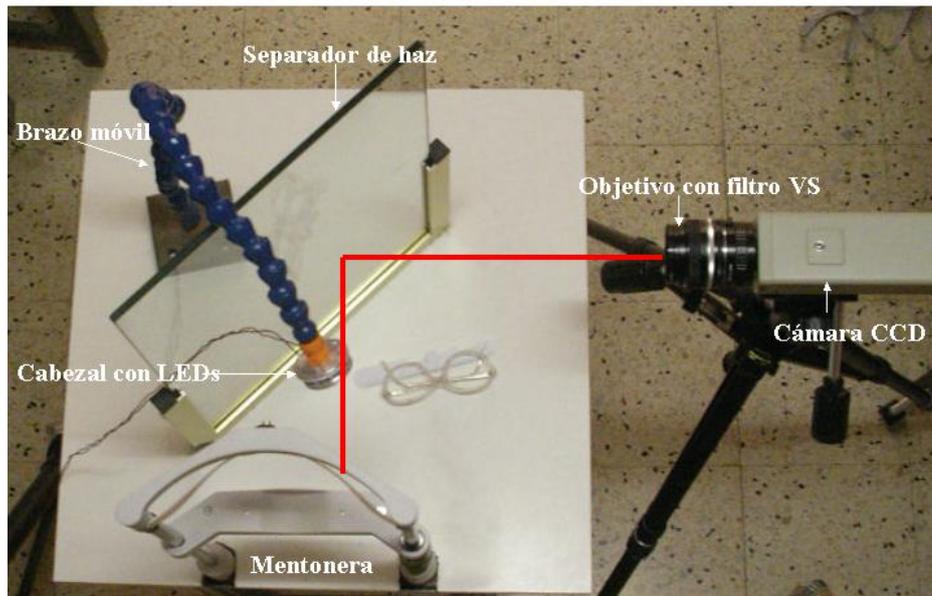


Figura 2.2 Fotografía del pupilómetro vista desde arriba

2.2.3. Calibración fotométrica de los dispositivos

A continuación se describe cómo se realizó la calibración de las luminancias utilizadas en el experimento, comenzando por la zona donde se situaron las tarjetas de letras, posteriormente la luminancia de la pared de corcho que corresponde a la zona circundante al test, y por último los niveles de grises correspondientes a los diferentes contrastes con los que se diseñaron los optotipos. Previamente se analizaron las derivas de las lámparas y del luminancímetro que fueron empleadas en la iluminación del test y del entorno.

Para finalizar se explicará el procedimiento empleado en las medidas de la sensibilidad al contraste con letras.

Una de las preocupaciones habituales en el laboratorio de Iluminación y Visión es la repetibilidad a lo largo del tiempo de las medidas fotométricas que se realizan. Esa repetibilidad es la que permite asegurar la veracidad de las mediciones tomadas en diferentes instantes a lo largo de un mismo experimento. Por un lado, se calibraron fotométricamente los tonos de grises que serían empleadas para el diseño del contraste de las letras en la medida de la *CS*, medidas que se realizaban durante 3 ó 4 horas al día y durante varios días. Por otro lado, en base a las pruebas preliminares que se realizaron sobre tres sujetos, la duración aproximada de las medidas de la *CS* que se llevaron a cabo para cada individuo se estimó en unas 3 horas.

Ambas medidas presentaban una duración muy larga que exigía el análisis de las derivas del sistema luminancímetro-lámpara con el tiempo. Los resultados obtenidos proporcionan información sobre el tiempo que tarda el sistema en estabilizarse, momento a partir del cual han de comenzar a tomarse las medidas en el laboratorio. Y también, de las variaciones de luminancia que podíamos tener desde el comienzo de las pruebas hasta la finalización de las mismas.

Todas las calibraciones fotométricas fueron realizadas con el luminancímetro Spectra Pritchard 1980A (Photo Research, Burbank, CA, USA). Partiendo del montaje experimental comentado en la sección 2.2.2, se procedió a medir las derivas del sistema luminancímetro-lámpara, teniendo en cuenta que contábamos con dos tipos de luminarias, las que iluminaban el test y las que iluminaban el entorno (pared de corcho).

Análisis de las derivas del sistema luminancímetro – lámparas (50 W)

Para medir las derivas del sistema luminancímetro - lámparas, se utilizó un entorno de oscuridad; el luminancímetro fue situado a 2 m de distancia del test que se encontraba iluminado por 4 lámparas halógenas (OSRAM 64440 12 V 1098, Germany) de 50 W cada una, conectadas a fuentes de alimentación estabilizadas a una intensidad de corriente de 4.0 A. Las lámparas se colocaron en el interior de la caja inmediatamente por detrás de la pared de corcho, dos a cada lado de la pared, como se muestra en la figura 2.1. La disposición de las mismas fue tal que dividía la pared interna, en vertical, en tres espacios equidistantes, proporcionando de esta manera una iluminación homogénea al fondo de la caja donde se situarían las tarjetas de optotipos. Con un spot o campo de medición de 6' en el luminancímetro y enfocando sobre una zona blanca donde se situarían los test de letras, se adquirió y registró la luminancia de forma constante, una vez cada 20 minutos, durante 5 horas, asegurándonos en todo momento que la intensidad de corriente permanecía invariable y corrigiéndola en el caso de encontrar ligeras variaciones, situación que ocurrió únicamente en los primeros 20 minutos del encendido de las fuentes de alimentación.

A continuación se muestran dos gráficas en las que se representa la evolución temporal de luminancia, expresada en cd/m^2 , del sistema luminancímetro - lámparas y en la segunda en unidades normalizadas a la primera medida.

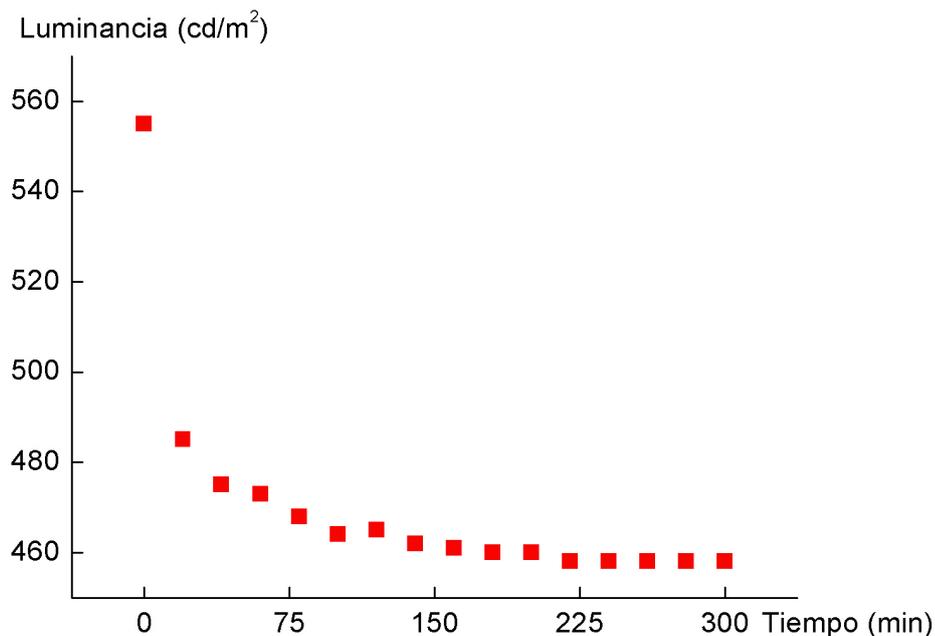


Figura 2.3 Derivas del sistema luminancímetro - lámparas del test

Como se puede apreciar en las figuras, las variaciones de luminancia del sistema luminancímetro - lámparas son sustanciales a lo largo de la primera media hora, donde llegan a alcanzar valores del 14% respecto a la medida inicial. Posteriormente, las oscilaciones en el resto del experimento, hasta completar las 5 horas, fueron menores del 5%. En base a estos resultados y de cara a la realización de cualquier medida con este instrumento, nos planteamos que éste estuviera funcionando al menos durante media hora antes de registrar ningún dato. No obstante, para una menor fluctuación siempre se comenzaron las medidas 1 hora después de haber encendido el luminancímetro y las lámparas, obteniendo en el peor de los casos, un 3% de variación desde la primera toma a la última.

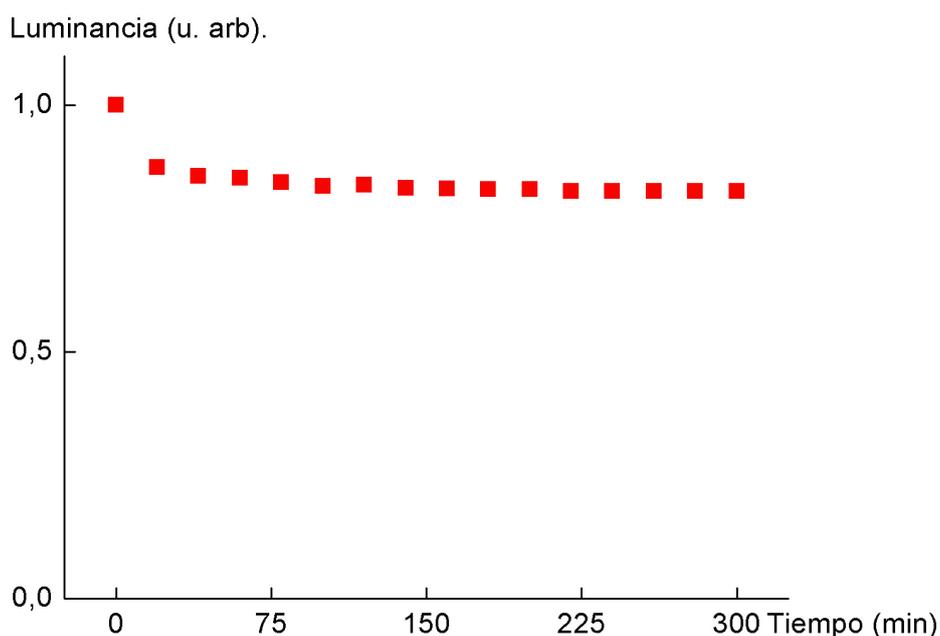


Figura 2.4 Derivas normalizadas del sistema luminancímetro - lámparas del test

Análisis de las derivas de las lámparas de 300 W

En base a los resultados obtenidos en el análisis de las derivas del sistema luminancímetro - lámparas del test, se procedió a la medida de las derivas de las lámparas incandescentes de 300 W (OSRAM 230 V HALOLINE 64701, Germany) que iluminaban el entorno. Lo primero que se hizo fue colocar las luminarias de forma estratégica para proporcionar la mejor homogeneidad posible. A 1.40 m de distancia de la pared de corcho y a ambos lados de la misma se situaron dos bases con una barra vertical que iba desde el suelo hasta el techo. En cada una de las barras se colocaron tres luminarias orientables que fueron equiespaciadas unas de otras y dirigidas para iluminar la pared de corcho blanco. Colgadas del techo se situaron otras dos luminarias. Todas ellas estaban conectadas a dos autotransformadores que permitían variar la tensión de alimentación de forma controlada.

A 2 metros de la pared de corcho y con un campo de medición de 6', se situó el luminancímetro dirigido hacia un punto del entorno seleccionado al azar. Los

autotransformadores fueron conectados a dos polímetros que indicaban la tensión de salida necesaria para obtener las luminancias del entorno que serían empleadas en el experimento. Sin mover el luminancímetro de posición y dirigido hacia el mismo punto con una tensión de salida de 215, 118, 71 y 46 V se conseguía aproximadamente unas 1000, 100, 10 y 1 cd/m^2 , respectivamente.

Después de una hora de encendido del luminancímetro se procedió a comprobar las derivas de la L_S , cada 2 minutos y durante 10 minutos, que fue el tiempo empleado para medir la CS a cada sujeto para cada condición de luminancia, comenzando con una tensión de salida de 215 V. Trascurridos los primeros 10 minutos se cambió la tensión de salida a 118 V, y se realizaron igualmente medidas cada 2 minutos durante un periodo de 10 minutos. Durante los 10 minutos siguientes se realizó la misma operación pero en este caso con una tensión de salida marcada por el polímetro de 71 V y, finalmente se repitió la operación con 47 V de tensión de salida. De esta forma se determinaron las variaciones de luminancia en las cuatro condiciones de L_S que serían empleadas en el experimento (1000, 100, 10 y 1 cd/m^2), durante el periodo de tiempo que permanecerían encendidas las luminarias en cada una de las pruebas de medida de CS de letras.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 2.5 donde se representa el log de la luminancia en función del tiempo en minutos. Se puede comprobar como las derivas podrían considerarse prácticamente inexistentes, por lo que los valores de L_S se pueden considerar estables en todo momento.

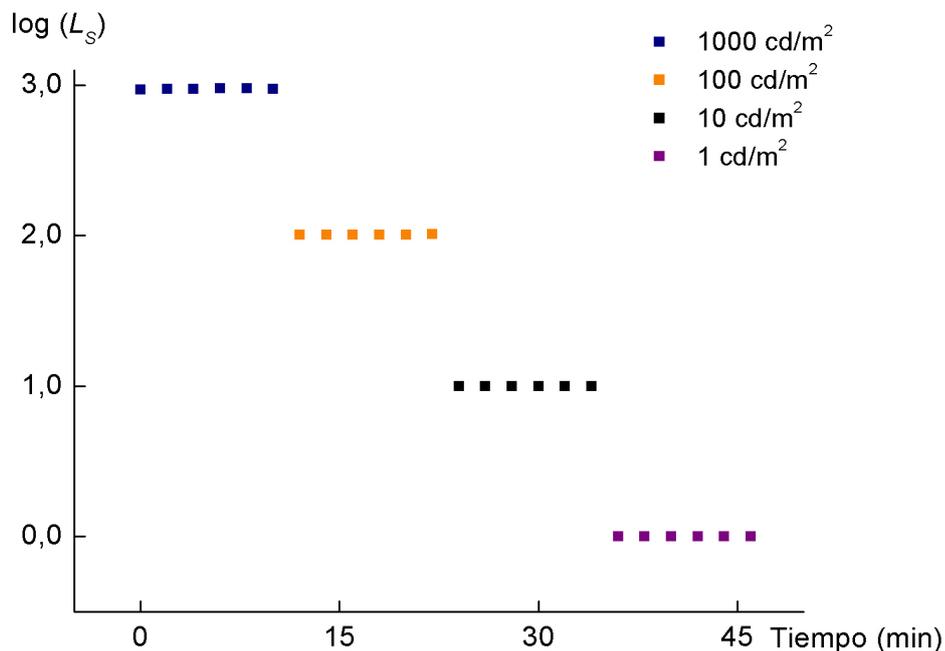


Figura 2.5 Evolución temporal de la luminancia de las lámparas que iluminaban el entorno.

Análisis de la homogeneidad espacial de la Luminancia del test

A pesar de que la disposición de las lámparas hacía sospechar una buena homogeneidad espacial en la luminancia del test, se realizó un análisis de la misma que lo pudiera garantizar. Para ello, con el luminancímetro y las lámparas en las mismas condiciones que para la medida de las derivas (luminancímetro a 2 m, con

un campo de medición de 6' y lámparas de 50 W a 4.0 A) se procedió a tomar 13 medidas sobre un DIN A-4, de 80 gr/m² de espesor y no satinado, (Navigator), una central y las otras 12 según una red de 3 x 4. Este tipo de folio DIN A-4, Navigator, fue el que posteriormente se empleó para imprimir las letras de sensibilidad al contraste con las que se realizaron las tarjetas de optotipos para dichas medidas. Los resultados obtenidos mostraron inhomogeneidades de luminancia menores del 2%.

Análisis de la homogeneidad espacial de la Luminancia del entorno

Para comprobar la distribución de luminancia en la pared de corcho blanco (luminancia del entorno) que, como ya se ha comentado, era iluminada con 8 lámparas incandescentes (OSRAM 230V HALOLINE 64701, Germany) de 300 W cada una, controladas mediante dos autotransformadores, y asegurarnos de que dicha luminancia fuera homogénea a lo largo y ancho del entorno, se procedió a medir la luminancia en distintos puntos de la pared de corcho, seleccionados según una red cuadrada de 8 x 8. Los puntos distaban entre sí 38 cm tanto en horizontal como en vertical y fueron iluminados a través de 215 V de tensión de salida, que correspondía aproximadamente con unas 1000 cd/m².

En la Figura 2.6 se ha representado el log (L_s) encontrado en la pared de corcho, donde el eje de las x corresponde a la horizontal y el de las y a la vertical de la pared, medidos en metros. El "0" en ambos ejes corresponde al centro del entorno desde donde, una vez hecho el orificio correspondiente que actuaría como ventana para el observador, se podrían observar las tarjetas de sensibilidad al contraste.

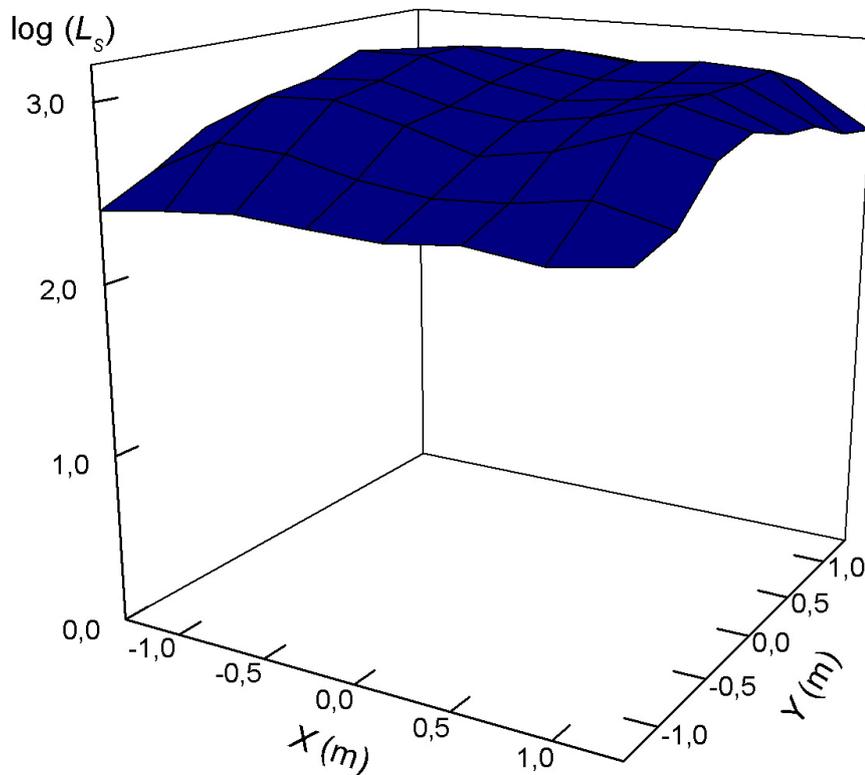


Figura 2.6 Homogeneidad espacial de la L_s

Como se puede observar, las diferencias de la luminancia en los distintos puntos de la pared que actuaba de entorno, cuando este se encontraba iluminado con las 8 lámparas con un voltaje de 215 V era muy pequeña. De hecho, después de realizar las 64 medidas se obtuvo un promedio la luminancia de 933 cd/m² ($\log(L_s) = 2.97 \pm 0.2$).

2.2.4. Diseño de los optotipos

Calibración de contrastes

Para poder determinar el contraste de las letras que íbamos a utilizar en las medidas de *CS* se requerían medidas fotométricas de cada una de ellas, pero para todos los casos y especialmente en las letras pequeñas (6.1 mm), resultaba complicado realizarlo con cierta precisión, porque el tamaño del spot del luminancímetro empleado en la calibración podía interaccionar con los bordes de las letras contaminando de esta manera los resultados obtenidos.

Por este motivo, se optó por definir manchas rectangulares, de 59 x 19 mm, como las que se observan en la figura 2.7, con diferentes tonos de grises sobre las que era más factible la calibración para, una vez definido el contraste, diseñar con los mismos parámetros las tarjetas de letras.

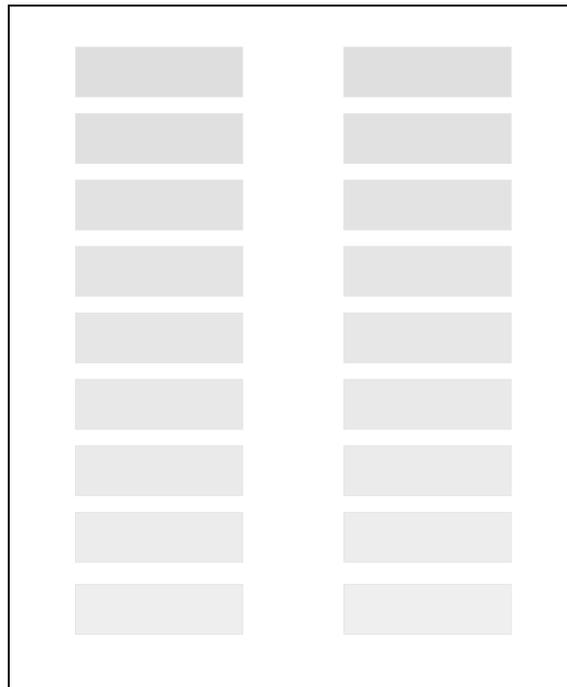


Figura 2.7 Ejemplo de las manchas de grises empleadas para la calibración fotométrica.

Las diferentes manchas de grises fueron generadas, sobre un DIN-A4, con una impresora (Hewlett-Packard HP9800 deskjet) de chorro de tinta que admite en su forma digital 256 tonos de grises (incluido el negro y el blanco), desde el 0 hasta el 255.

Todos los tonos de grises impresos en forma de manchas fueron calibrados fotométricamente con el luminancímetro Spectra Pritchard 1980A. (Photo Research, Burbank, CA, USA). Las medidas se realizaron con entorno oscuro y con una

intensidad de corriente de 4.1 A en las lámparas del interior de la caja. El luminancímetro se situó a 2 m de distancia del papel sobre el que estaban impresas las manchas. El tamaño del campo de medición, utilizado para la calibración fue de 6', tamaño suficientemente grande para obtener medidas estables pero suficientemente pequeño para evitar la reducción del contraste debido a la entrada de la luz procedente de los alrededores del rectángulo gris en la zona de medida. Sobre cada una de las manchas se tomaron 4 valores de luminancia en cuatro localizaciones diferentes próximas a las esquinas. En el fondo blanco alrededor de cada mancha se tomaron otras 4 medidas que ayudarían a calcular el contraste (figura. 2.8). Para todas las calibraciones, tanto las de dentro como las de fuera del rectángulo gris, se puso especial cuidado en que la localización del spot o campo de medición, estuviera próximo a los límites de las manchas pero con una distancia como mínimo igual al doble del tamaño del spot, para evitar que la luminancia interfiriera con los bordes, especialmente cuando la luminancia del fondo y de la mancha eran muy distintas. Las 2048 medidas fotométricas se llevaron a cabo durante varios días, y para confirmar que no hubiera variaciones de un día para otro, se repetían las tres últimas medidas del día anterior.



Figura 2.8 Distintas localizaciones del campo de medida empleado en la calibración fotométrica de las manchas de grises.

Posteriormente y con el promedio de las medidas se calculó el contraste de cada mancha mediante la expresión 1.4, donde se distingue entre L_T y $L_{optotipo}$ refiriéndonos en este último caso a la luminancia del tono de gris impreso en forma de mancha rectangular.

A partir de los datos registrados se calculó el log (CS) que ha sido representado en función del tono de gris (g), en la figura 2.9.

Para este trabajo lo más relevante de la figura lo constituye la posibilidad de calibrar fotométricamente todas las manchas o tonos de gris (g) que es posible obtener con la impresora Hewlett-Packard HP9800 deskjet; es decir los 256 tonos de gris. No obstante, a pesar de las posibilidades que nos ofrece la impresora, no fue necesario emplear todos los tonos de gris de los que disponíamos para las medidas de CS en los participantes, sino que estos fueron seleccionados en función de pruebas previas a las medidas, realizadas en sujetos ajenos al estudio.

En conclusión, la gráfica nos muestra las prestaciones que nos ofrecía la impresora, es decir de qué grises disponíamos para poder trabajar en el diseño de las tarjetas de CS de letras.

Se pudieron diseñar y medir un rango de contrastes desde 90% a 0.25% (siendo el rango del $\log(C)$ de - 0.05 a - 2.69) en pasos que dependían del contraste.

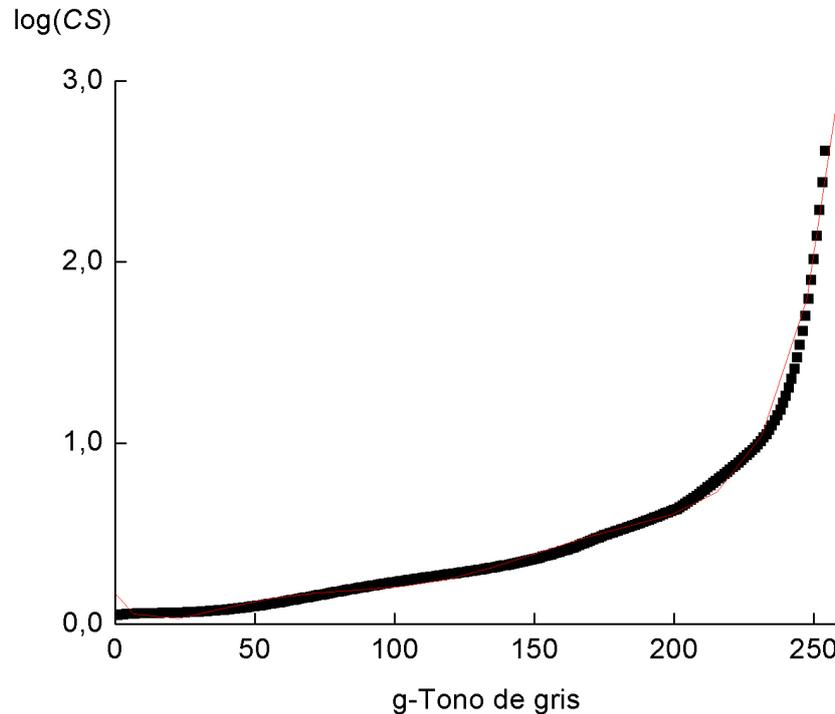


Figura 2.9 Calibración de los tonos de gris desde 0 a 255 impresos en forma de manchas

Diseño de las letras de bajo contraste

Para las pruebas de sensibilidad al contraste se diseñaron cuatro tarjetas diferentes, formadas por letras cuadradas. Cada tarjeta tenía optotipos de un tamaño diferente. El primero contenía letras de 60.5 mm que vistas a 5.2 m de distancia subtendían un tamaño angular, $\phi = 40.32'$, el segundo de 18.2 mm, que a la misma distancia subtendía $12.03'$, y los otros dos de 9.1 mm ($6.02'$) y 6.1 mm ($4.03'$). Dichos tamaños corresponden al tamaño angular de la letra completa, no al mínimo ángulo de resolución, como suele emplearse en la medida de la agudeza visual. La tabla 2.1 muestra los tamaños de letra empleados en el experimento y su equivalente en diferentes notaciones.

Tamaño lineal (mm)	Tamaño angular (ϕ) en '	Equiv. log MAR	Equiv. Snellen	Equiv. Decimal
60.5	40.32	0.90	20/160	0.12
18.2	12.03	0.38	20/48	0.40
9.1	6.02	0.08	20/24	0.80
6.1	4.03	-0.09	20/17	1.2

Tabla 2.1 Diferentes notaciones de los tamaños de letras empleadas en el trabajo y observadas a 5.2 m, expresadas en tamaño lineal, angular y sus equivalentes en log MAR, en fracción de Snellen y en decimal.

Cada una de las tarjetas o cartas de optotipos estaba formada, siguiendo la idea general del modelo del test de sensibilidad al contraste de Pelli-Robson, por líneas de dos tripletes cada una (figura 2.10), que fueron impresos en un DIN A-4 (Navigator), excepto el test que contenía las letras de mayor tamaño que consistía en tres tarjetas, cada una de las cuales contenía dos líneas con un triplete cada uno. La separación entre letras fue al menos de una letra, excepto para el tamaño angular de $40.32'$ que fue menor. Para el diseño de las tarjetas se eligió el conjunto de letras de Sloan (D, H, N, V, R, Z, S, K, O, C), que fueron hechas siguiendo el patrón especificado para su realización (National Academy of Science. National Research Council (NAS-NRC), 1980). Las letras siguieron una disposición aleatoria dentro de la tarjeta de optotipos.



Figura 2.10 Fotografía de una tarjeta de sensibilidad al contraste para letras con un $\phi = 4.03'$

Siguiendo las recomendaciones de la Academia Americana de Oftalmología (Rubin et al., 1990), el test de *CS* ha de diseñarse con estímulos cuyo contraste siga una progresión logarítmica uniforme, de manera que no se emplearon todos los tonos de gris que nos ofrecía la impresora, sino que estos fueron seleccionados de forma que al representar el $\log(CS)$ se obtuviera linealidad, como se puede observar en la figura 2.11.

Tomando en consideración esta recomendación se procedió a valorar los tonos de grises que iban a definir los optotipos de las tarjetas de *CS* y que iban a depender

del tamaño de la letra. Mientras que para los optotipos de mayor tamaño se requería menor contraste, para los más pequeños el contraste necesario para poder reconocerlos era mayor. Se realizaron medidas previas a 3 sujetos de características similares a las indicadas en el criterio de inclusión. En función del promedio de los resultados obtenidos y dejando una horquilla suficientemente grande para cubrir todos los contrastes, se diseñaron las tarjetas con los tonos de gris que serían empleados en los distintos tamaños de letras seleccionadas en el trabajo.

Por otro lado, para poder determinar el paso de contraste entre un triplete de letras y el siguiente, se realizaron 4 gráficas, correspondientes a los cuatro tamaños de letra, donde se representaba el $\log(CS)$ en función del índice de grupo (i). En dicha figura se ha utilizado como eje "x" el índice de grupo entendiendo por tal el número de orden que representa un triplete (de tono de gris g y CS dado) dentro de la carta de optotipos. Así, por ejemplo, el índice de grupo 1 representa el primer triplete situado típicamente en la parte superior izquierda de una de las cartas de optotipos diseñados. Se muestra un ejemplo (figura 2.11) de la gráfica que corresponde al mayor tamaño angular empleado en el trabajo.

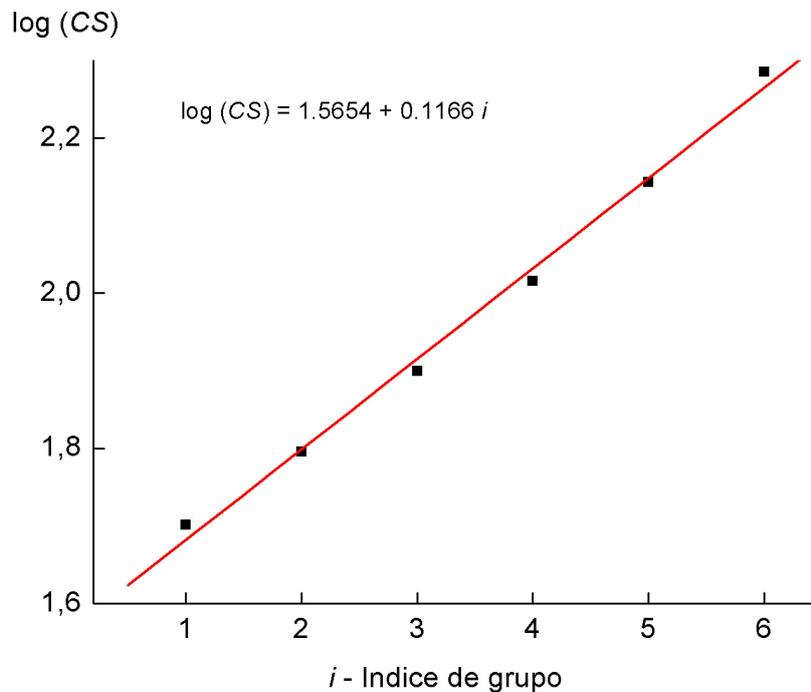


Figura 2.11 Log (CS) en función del índice de grupo (i), para una letra de 40.32'

Posteriormente, y para todas las gráficas se realizó un ajuste de regresión lineal donde la pendiente (b) obtenida en cada gráfica va a definir el paso de contraste en unidades logarítmicas, entre un triplete de letras y el siguiente. La tabla 2.2 recoge, para los tamaños angulares de letra completa, el número de tripletes que fue necesario para la evaluación de la sensibilidad al contraste y el rango del $\log(CS)$ que abarcan dichos tripletes, así como el paso de contraste entre dos tripletes consecutivos en unidades logarítmicas (b). La última columna indica el coeficiente de correlación (R^2) obtenido de cada ajuste de regresión lineal.

Tamaño angular de letra	Nº de tripletes	Rango de log (CS)	Paso de contraste (b)	R ²
40.32'	6	1.70-2.28	0.12	0.995
12.03'	14	1.18-2.14	0.07	0.966
6.02'	14	1.18-2.14	0.07	0.966
4.03'	16	0.52-1.26	0.04	0.969

Tabla 2.2 Relación entre el número de tripletes necesario para cada tamaño angular de letra, con el rango de log (CS) que abarca, así como el paso de contraste entre cada triplete (b) con su coeficiente de correlación lineal (R²).

Como se puede observar en la tabla 2.2, el contraste entre cada triplete disminuía en una escala logarítmica en pasos que dependían del tamaño de la letras. Esto se debía a las prestaciones particulares de contraste que nos ofrecía nuestra impresora HP 9800. De manera que para las letras de 40.32' se consiguieron pasos de contraste de 0.12 unidades logarítmicas de promedio, para 12.03' y 6.02' los pasos de contraste fueron de 0.07 unidades logarítmicas de promedio, siendo de 0.04 unidades logarítmicas para el tamaño de letra menor. En los tres primeros casos, el paso de contraste corresponde a la máxima prestación que nos puede ofrecer nuestro sistema, y para 4.03', aún se puede conseguir un paso más fino, como se verá en el capítulo 3. Como puede observarse dichos saltos son, en todos los casos, inferiores a las 0.15 unidades logarítmicas que utilizan la mayoría de los test comerciales, permitiéndonos por este motivo apreciar, con las tarjetas diseñadas para el estudio, variaciones sutiles de dicha función visual.

2.2.5. Procedimiento experimental

El sujeto, con la compensación visual que le permitía alcanzar su máxima agudeza visual y que de forma expresa había sido valorada para la realización del estudio, se situaba a una distancia de 4.5 m de la pared de corcho, es decir, a 5.2 m del test. Para esa distancia, el test y el entorno subtendían 3.8° y 33.8° respectivamente tanto vertical como horizontalmente.

Las medidas de sensibilidad al contraste se llevaron a cabo en condiciones binoculares con la finalidad de obtener la máxima función visual (Rabin, 1995). Se realizaron 16 medidas de sensibilidad al contraste para cada individuo, las correspondientes a las combinaciones de los cuatro tamaños de letra estudiados en el trabajo y las cuatro condiciones de luminancia del entorno ($L_S = 1, 10, 100$ y 1000 cd/m^2), manteniendo siempre constante la luminancia del test $L_T = 200 \text{ cd/m}^2$. Para cada sujeto el orden en que se realizaban las pruebas fue aleatorio y debido a ello, en ocasiones, se tenía que utilizar la misma tarjeta varias veces seguidas (2, 3 o incluso 4) con diferentes condiciones de luminancia del entorno, por este motivo, y para evitar la memorización de las letras de la tarjeta durante las medidas, se hicieron cuatro versiones de cada una de ellas en las que se variaban las letras de los tripletes pero se mantenía el mismo contraste que había sido definido previamente. La disposición de las letras en la carta de optotipos también fue aleatoria.

Antes de comenzar con las medidas de sensibilidad al contraste en cada una de las condiciones de iluminación, el sujeto se adaptaba durante 10 minutos a cada una de

ellas, considerándose este tiempo más que suficiente para alcanzar estabilidad en el grado de dilatación pupilar (Brown et al., 2004).

Se utilizó el método psicofísico de elección forzada, de tal manera que el sujeto comenzaba a leer las letras de un contraste fácilmente legible para ir reduciéndolo, animándole en todo momento a acertar los tres optotipos de cada triplete, aunque no los viera perfectamente claros (Pelli et al., 1988). Se tomaba la sensibilidad al contraste como la inversa del contraste del último grupo de letras en la cual 2 de las 3 letras eran reconocidas correctamente. Aunque existen otros procedimientos de contabilización basados en el número de letras individuales que son identificadas correctamente (Elliott et al., 1991), resultan más largos y más tediosos, motivo por el cual fueron descartados, más aún teniendo en cuenta que los resultados obtenidos no difieren sustancialmente con el método empleado (Arditi, 2005).

Para cada sujeto la prueba de las 16 medidas de sensibilidad al contraste duraba aproximadamente 3 horas. Las medidas fueron realizadas con pupila natural y debido al tiempo tan prolongado que llevaba realizarlas, se intentó que fueran lo más cómodas posible, motivo por el cual, no se utilizó mentonera aunque se insistió en que el sujeto prestara la máxima atención y tuviera el menor movimiento de cabeza posible.

El tamaño de la pupila fue medido en 10 de los participantes del estudio bajo las cuatro condiciones de iluminación utilizadas y empleando un tamaño angular de test de 12.03'. Se desestimó la posibilidad de miosis provocada por la acomodación puesto que todos los sujetos estaban emetropizados y la distancia a la que se presentaba el test fue de 5.2 m (Iwasaki and Tawara, 2002). Tras un periodo de adaptación de 10 minutos a cada una de las cuatro condiciones de iluminación empleadas en el trabajo, se tomaron varias imágenes de la pupila para cada ojo y se calculó el diámetro promedio y su desviación estándar. El orden en que se realizaron las medidas del diámetro pupilar también fue aleatorio.

2.3. Análisis de los resultados

La prueba de sensibilidad al contraste de letras que ha sido diseñada en este experimento proporciona una gran precisión a la hora de obtener valores umbrales, incluso mejores que los test que actualmente se comercializan.

Con el fin de evitar la polémica ya comentada en la sección 1.2.4 del capítulo 1 sobre el número de ciclos/letra necesarios para poder reconocer una letra y las implicaciones que conlleva a la hora de calcular el número de ciclos/grado, se ha optado por eludir ese término, empleando en el análisis de los resultados el tamaño angular de la letra en minutos de arco.

En la figura 2.12 se han representado los log (CS) originales para los participantes en el estudio, en función del logaritmo de la luminancia del entorno para los cuatro tamaños angulares de letra. Para facilitar la interpretación de la gráfica se han mostrado exclusivamente los resultados de 5 individuos, resultados caracterizados por colores de línea diferentes. Estos 5 individuos son representativos de los 31 que intervinieron en el trabajo; de hecho, se muestran los resultados de la sensibilidad al

contraste de los sujetos que presentaban en promedio mayor y menor CS (líneas continuas roja y azul respectivamente), y los correspondientes a los tres cuartiles.

Por otro lado, para facilitar la lectura y teniendo en cuenta que en el análisis de los resultados vamos a referirnos constantemente al logaritmo de la luminancia del entono se va a definir una variable nueva, $s = \log(L_S)$.

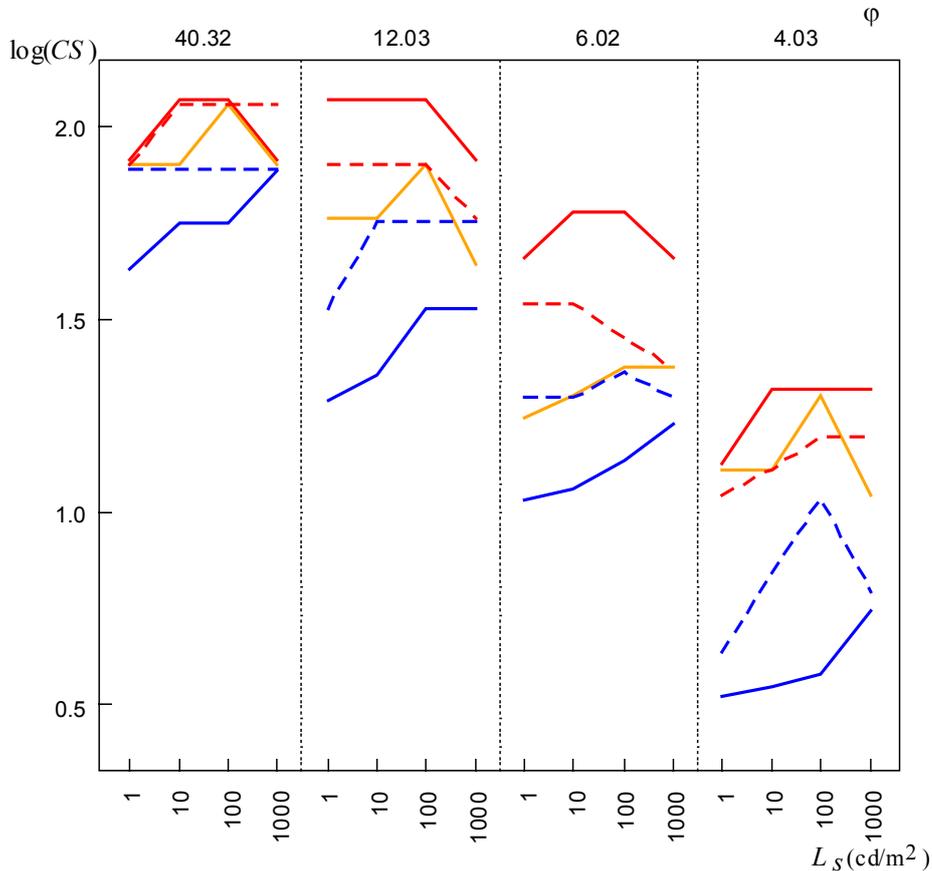


Figura 2.12 Influencia de la luminancia de entorno (L_S) sobre la función de sensibilidad al contraste para distintos tamaños angulares subtendidos. Con línea roja y azul se representan los ojos de mayor y menor sensibilidad al contraste en promedio, y con líneas discontinuas y amarilla los tres cuartiles

Lo primero que llama la atención en dicha figura es la relación existente entre el log (CS) y el tamaño angular de letra ϕ , pudiéndose observar una disminución de aquel a medida que se reduce dicho tamaño angular. Por otro lado, para un ϕ determinado, al observar el comportamiento de un individuo cualquiera para las diferentes condiciones de L_S , se puede apreciar que el log (CS) no es plano, es decir, parece que la luminancia del entorno tiene cierta influencia sobre la sensibilidad al contraste en cada individuo. Además, merece la pena destacar la relación entre la luminancia del entorno y el tamaño angular de la letra. De nuevo, para cualquier individuo que tomemos como ejemplo, la dependencia funcional del log (CS) con L_S parece diferente para cada ϕ . Por tanto, el modelo que pretenda dar cuenta de los datos del log (CS) obtenidos en nuestro experimento debe contemplar, a priori, los parámetros que parecen influir en la sensibilidad al contraste, L_S , ϕ , y la interacción $L_S \leftrightarrow \phi$.

Por otro lado, cada sujeto tenía su propia agudeza visual, y es conocido que, sujetos con alta AV presentan mayor sensibilidad al contraste que aquellos que tienen una agudeza visual menor. En la figura 2.12, si tomamos como ejemplo el individuo con menor CS para $\varphi = 40.32'$, representado en color azul, podemos observar que sistemáticamente es el que presenta la sensibilidad al contraste más baja para todos los tamaños de letra. Mientras que el individuo de mayor CS representado en color rojo, para todos los φ considerados siempre presenta la sensibilidad al contraste más alta. Además, está demostrado que para un sujeto normal, la CS disminuye con el tamaño angular de letra. En conclusión, los resultados obtenidos no pueden considerarse como sucesos independientes, pues cada uno de los valores de $\log(CS)$ obtenidos en cada condición analizada en el estudio no se hizo a un sujeto diferente, sino que cada observador con sus características visuales intrínsecas, fue sometido a dieciséis medidas.

En este tipo de situación, uno de los modelos estadísticos que mejor se ajusta a los resultados de $\log(CS)$ obtenidos es un modelo lineal mixto. Por este motivo, se ha ajustado este tipo de modelo que contempla no sólo los parámetros que han sido fijados para realizar el experimento, sino también el efecto del propio sujeto y aquellos que interaccionan con cada observador el cual está condicionado a sus propias características visuales. El modelo también permite explicar que una parte de la variabilidad en la respuesta del $\log(CS)$ es debida a las propias diferencias entre los sujetos. La expresión que define el modelo es la siguiente:

$$\log(CS)_{i\varphi L_S} = \alpha + \beta_\varphi + \gamma_{L_S} + \delta_{L_S \leftrightarrow \varphi} + b_i + b_{i \leftrightarrow \varphi} + e_{i\varphi L_S} \quad (2.2)$$

donde, i corresponde a los 31 individuos, L_S a las cuatro condiciones de luminancia del entorno y φ , a los cuatro tamaños angulares de la letra. En este modelo se consideran *parámetros fijos* β_φ , γ_{L_S} y la interacción $\delta_{L_S \leftrightarrow \varphi}$ mientras que los efectos que tienen que ver con el individuo se consideran *efectos aleatorios*, b_i y $b_{i \leftrightarrow \varphi}$. El término $e_{i\varphi L_S}$ corresponde al error aleatorio propio del ajuste de cualquier modelo estadístico. La interacción del efecto aleatorio $b_{i \leftrightarrow L_S}$ se ha desestimado en este modelo porque un análisis previo ha confirmado no ser significativo ($p > 0.05$).

La distribución de los efectos aleatorios considerados en el modelo son los siguientes: de b_i es $N(0, \sigma_i^2)$, de $b_{i \leftrightarrow \varphi}$ es $N(0, \sigma_{i \leftrightarrow \varphi}^2)$ y de $e_{i\varphi L_S}$ es $N(0, \sigma_{i\varphi L_S}^2)$. Es decir, todos los efectos aleatorios tienen una distribución normal centrada en 0 y cada uno de ellos con su propia varianza correspondiente (σ^2). En este sentido y como se puede observar, una parte de la variabilidad observada en los datos medidos se debe a las características visuales intrínsecas de cada individuo (b_i y $b_{i \leftrightarrow \varphi}$), y el resto corresponde al error residual.

Un análisis de la varianza ha verificado que los efectos aleatorios relativos al individuo son ambos estadísticamente significativos. Las componentes de la varianza asociadas a dichos efectos ($\sigma_i = 0.106$ y $\sigma_{i \leftrightarrow \varphi} = 0.069$) explican en buena parte la variabilidad observada en los datos del $\log(CS)$ debido al hecho de que las diferencias entre individuos se mantienen a lo largo de los diferentes niveles de φ y de L_S . La variabilidad residual es $\sigma_{i\varphi L_S} = 0.076$. Es muy importante destacar que el parámetro fijo de interacción $\delta_{L_S \leftrightarrow \varphi}$ también es estadísticamente significativo ($p =$

0.026), es decir, que se puede concluir que, desde un punto de vista estadístico, la luminancia del entorno influye en el $\log(CS)$, y dicha influencia es diferente para los diferentes tamaños angulares de letras.

Con el fin de obtener una visión general de los resultados obtenidos en el experimento se ha representado en la figura 2.13, el logaritmo de los promedios de la sensibilidad al contraste de letras para cada logaritmo de la luminancia de entorno (s) y para cada logaritmo de los cuatro tamaño angulares de letra considerados en el trabajo.

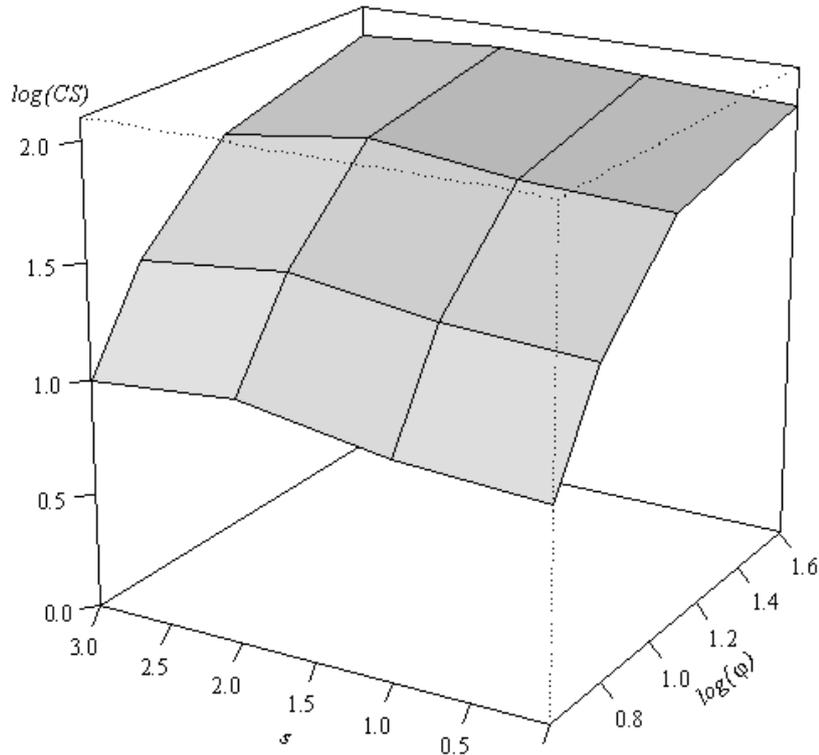


Figura 2.13. Influencia de la luminancia del entorno (L_s) sobre la función de sensibilidad al contraste para distintos tamaños angulares subtendidos, todo ello en unidades logarítmicas.

Como se puede observar, las diferencias de la sensibilidad al contraste de letras para las distintas luminancias del entorno son muy pequeñas. También se puede observar que para un test de 200 cd/m^2 , la sensibilidad al contraste aumenta con la luminancia del entorno desde 1 a 100 cd/m^2 , disminuyendo cuando pasa de 100 a 1000 cd/m^2 . Este es un comportamiento que puede observarse para todos los tamaños angulares de letra, si bien es verdad que la gráfica no permite cuantificar si esta influencia es cuantitativamente similar para todos los tamaños de letra.

A partir de los resultados de la figura 2.13 y del ajuste del modelo se han calculado las diferencias de los valores promedio del $\log(CS)$ para cada luminancia del entorno con respecto a los obtenidos en condiciones de oscuridad (1 cd/m^2). Dichas diferencias $\Delta \log(CS)$ se muestran en la figura 2.14 en función del logaritmo de L_s para los cuatro tamaños angulares de letra considerados.

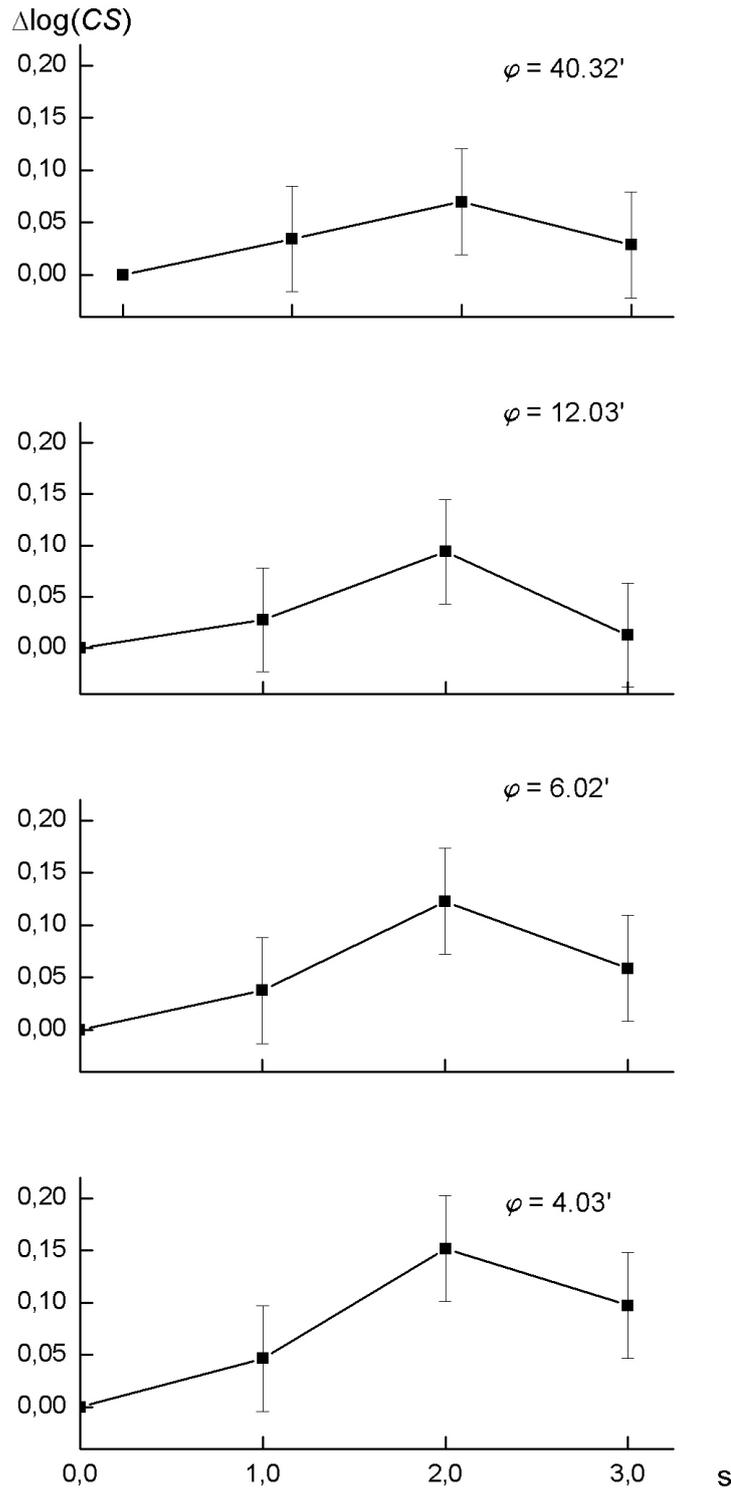


Figura 2.14 Cambios en los valores del log (CS) inducidos por un incremento en la luminancia de entorno tomando como referencia la condición de oscuridad ambiente. Se muestran los resultados para los cuatro tamaños de letra estudiadas en los 31 participantes.

Estas gráficas representan el efecto global de un incremento de la luminancia del entorno en la sensibilidad al contraste de la letra la cual fue medida en condiciones de oscuridad. Para una confianza del 95%, el intervalo de confianza del $\Delta\log(CS)$,

con corrección de Bonferroni para $n = 12$, es de ± 0.0506 . Estos intervalos de confianza se indican en la figura 2.14 por las correspondientes barras de error verticales.

En la figura 2.14 se puede observar que la tendencia en el $\Delta \log (CS)$ con la s es similar para los 4 tamaños de letra. El $\Delta \log (CS)$ adquiere siempre valores positivos, aunque se consideran estadísticamente significativos para todos los tamaños de letra cuando la $L_S = 100 \text{ cd/m}^2$, y también cuando la luminancia del entorno es de 1000 cd/m^2 para los tamaños angulares menores ($6.02'$ y $4.03'$). Otro aspecto que merece la pena comentar es que el valor más alto del $\Delta \log (CS)$ se alcanza, cuando la luminancia del entorno es de 100 cd/m^2 . Estas observaciones y también la disminución observada en los valores del $\log (CS)$ cuando la luminancia del entorno pasa de 100 a 1000 cd/m^2 , para los tamaños de letra correspondientes a $\phi = 12.03'$, $\phi = 6.02'$ y $\phi = 4.03'$ han sido confirmadas estadísticamente.

También se analizó la influencia de la L_S en la medida de la CS para los distintos tamaños de letras diferenciándolo por género. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$, test de Wilcoxon y t de Student) entre mujeres y varones para ninguna de las 16 condiciones examinadas, resultado que va en la línea de Khanani et al., 2004.

El parámetro óptico que varía de forma más significativa cuando se modifica la luminancia del entorno es el tamaño pupilar. En la tabla 2.4 se muestran las medidas promedio del diámetro pupilar d , así como la iluminación retiniana foveal correspondiente (E_r), para las distintas condiciones de luminancia del entorno consideradas en el trabajo. Los valores de E_r medidos en trolands fotópicos (td) han sido calculados teniendo en cuenta la que la iluminación retiniana foveal está influida por la iluminación retiniana que genera el test (E_T) a la que se adiciona la iluminación retiniana de velo (E_V). La primera ha sido obtenida a través de la expresión:

$$E_T = \pi d^2 L_T / 4 \quad (2.3)$$

y la segunda a partir de la expresión de Whitaker, et al., 1994:

$$E_V / E_T = L_V / L_T \quad (2.4)$$

siendo L_T la luminancia del test y L_V la luminancia de velo. Como se puede ver en la expresión 2.3. la iluminación retiniana disminuye con el cuadrado del diámetro de la pupila, la cual se reduce de forma significativa con el incremento de la luminancia del entorno en este experimento.

L_S (cd/m ²)	d (mm)	E_r (td)	L_V (cd/m ²)	$1+L_V/L_T$	Log ($1+L_V/L_T$)
1	4.7	3510	2.29	1.011	0.005
10	4.0	2546	2.64	1.013	0.006
100	3.0	1457	6.10	1.030	0.013
1000	2.5	1182	40.72	1.204	0.081

Tabla 2.3 Medida de diámetros pupilares d , iluminación retiniana foveal E_r para las diferentes condiciones de luminancia de entorno (L_S) de este experimento y luminancias de velo foveal (L_V) calculadas según Adrian and Topalova (1991). La columna 5 contiene el factor $1+L_V/L_T$. La sexta columna contiene el logaritmo del valor de dicho factor.

La tabla 2.3 también contiene la luminancia de velo foveal L_V estimada para distintos valores de L_S . En la última columna se presenta el logaritmo del factor por el cual la luminancia foveal es aumentada, o el contraste de la letra disminuida, debido a la luminancia de velo. Cuando la distribución de luminancia en el campo visual del observador está formada por anillos luminosos concéntricos y centrados en la línea de fijación, como de forma aproximada ocurre en este experimento, la luminancia de velo para jóvenes de 20 a 30 años de edad puede calcularse a través de la expresión 1.18 de Adrian and Topalova (1991), en la que se consideran el promedio de luminancia en cada anillo y los límites angulares de cada anillo subtendidos desde el observador. En este modelo se puede asumir que los dos primeros grados centrales del campo visual no intervienen en la luminancia de velo. Como se observa en la figura 2.15 la luminancia de velo de este experimento se produce por dos anillos ($n = 2$), el primero podemos aproximarlos a la zona que va desde los dos grados centrales hasta el extremo de la ventana que se hizo en la pared de corcho. Visto desde el observador, tiene un tamaño angular de 0.9 grados con un $\theta_1 = 1$ grado y $\theta_2 = 1.9$ grados, donde $L_1 = L_T$. El segundo anillo corresponde a la zona comprendida entre la ventana de corcho y el extremo del campo angular de entorno del sujeto cuando observa el test, el cual subtiende un ángulo de 15 grados, con un $\theta_3 = 16.9$ grados siendo $L_2 = L_S$.

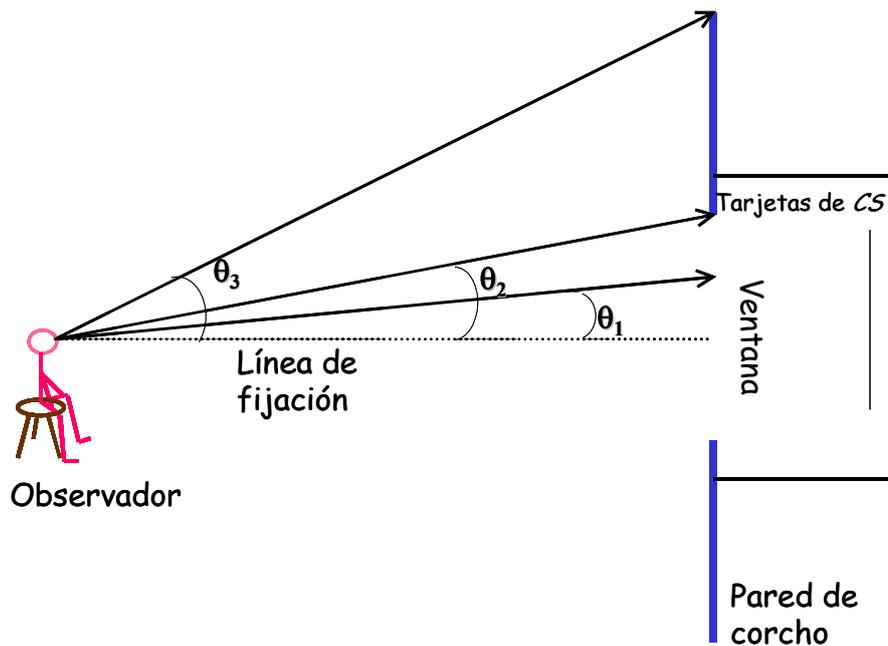


Figura 2.15 Límites angulares de los anillos concéntricos los cuales producen luminancia de velo sobre la retina debido al efecto de deslumbramiento. En este experimento $\theta_1 = 1$ grado, $\theta_2 = 1.9$ grados y $\theta_3 = 16.9$ grados.

El factor por el cual la luminancia foveal es multiplicada debida a la luminancia de velo se ha obtenido partiendo del contraste de Weber (2.1) y considerando que el contraste retiniano (C_R) estará influido por dicha luminancia de velo que habrá que añadir a cada uno de los términos de la expresión de Weber, obteniendo de esta forma la siguiente expresión:

$$C_R = \frac{C_W}{1 + \frac{L_V}{L_T}} \quad (2.5)$$

Se puede observar como la luminancia de velo permite cuantificar la reducción de contraste que se produce en la imagen retiniana. El contraste umbral de detección del individuo es menor que el contraste del objeto y está en función de la luminancia de velo y de la del test.

Análisis de los efectos del tamaño de la pupila.

Algunos autores (Abrahamsson and Sjöstrand, 1986), han medido la *CSF* con y sin fuente deslumbrante y la discrepancia entre ambas ha sido usada como una medida del *disability glare*. Teniendo en cuenta los cambios sufridos en el diámetro de la pupila en presencia de una fuente deslumbrante, han propuesto utilizar un factor de corrección obtenido empíricamente para el cálculo de la fracción que expresa la luminancia de velo. Otros autores (Whitaker et al., 1994) más tarde han demostrado que no es necesario introducir ningún factor de corrección de la pupila porque los cambios pupilares afectan en el mismo sentido a la luminancia del estímulo y a la luminancia de velo, así que el ratio entre ellos permanece constante. En otras

palabras, aunque la iluminación retiniana correspondiente debido a la luminancia de velo depende del tamaño de la pupila, los ratios L_V/L_T , los cuales son datos relevantes para el efecto del deslumbramiento, y sus correspondientes ratios de iluminación retiniana, deberían ser independientes del tamaño de la pupila.

Entre los factores ópticos que influyen en estos resultados, el tamaño de la pupila juega un papel importante. La variación del diámetro pupilar cambia la función de transferencia de modulación (*MTF*) del ojo. Otros efectos como las aberraciones o las ametropías residuales también se ven afectadas con la miosis o la midriasis. Todos estos efectos juntos influyen en la calidad de imagen retiniana y esto también es un factor clave en el proceso de reconocimiento de letras.

No se han encontrado modelos en la literatura que puedan predecir la influencia del tamaño de la pupila en los umbrales de contraste para el reconocimiento de letras. De manera, que para intentar entender el papel que juega el diámetro pupilar en el reconocimiento de estas y poderlo aplicar a las medidas realizadas en este trabajo, hemos recurrido a los modelos que han sido desarrollados para la detección de ondas sinusoidales. El tema de los componentes de frecuencia espacial en el espectro de Fourier de las letras directamente involucradas en su reconocimiento es aún, como ya se ha comentado en el capítulo anterior, un tema que en investigación está siendo objeto de estudio. (Majaj et al., 2002; Petkov and Weestenbergh, 2003). De entre las diferentes teorías que han ido surgiendo en el reconocimiento de letras, en este trabajo se ha tomado como referencia el modelo de Majaj por ser un modelo sólido, con un excelente soporte empírico cuyo análisis es capaz de justificar los resultados obtenidos en trabajos anteriores en base a las características de la letra y al tipo de tratamiento realizado en las mismas. Dichas características vienen determinadas por el alfabeto y por el tipo de fuente, entre las que incluye las letras de Sloan, que han sido elegidas en este trabajo. Por otro lado, también hace distinciones entre letras que han sido tratadas con filtro y letras no filtradas, como en nuestro caso.

Siguiendo dicho modelo, las propiedades espaciales de las letras fueron definidas en términos de su *stroke frequency*, la cual fue posteriormente convertida a frecuencia espacial retiniana, en ciclos/grado, en base a la expresión 1.8.

De manera que para poder comparar nuestros resultados con las predicciones de modelos teóricos de redes sinusoidales, se ha convertido el tamaño angular de letra en frecuencia espacial según la expresión 1.8. Los resultados obtenidos muestran una frecuencia espacial de 3.8 c/g para la letra de $\phi = 40.32'$, 8.6 c/g para la letra de $\phi = 12.03'$, y para los tamaños angulares de letra de 6.02' y 4.03' corresponde una frecuencia espacial de 13.7 c/g y de 17.8 c/g respectivamente.

Si hubiéramos aplicado otro modelo, como el de Legge et al., (1985), donde considera que la frecuencia crítica de reconocimiento de una letra es de 2 c/letra, los resultados en cuanto a las frecuencias espaciales consideradas podrían haber variado ligeramente, de hecho, habríamos trabajado con 3, 10, 20 y 30 c/g para tamaños angulares de 40.32', 12.03', 6.02' y 4.03' respectivamente. En todo caso, los resultados siguen siendo los mismos proporcionándonos una idea del efecto de la luminancia del entorno para letras de frecuencia espacial baja, medias y alta sobre la

CS. La tabla 2.4 muestra el tamaño angular de letra y las equivalencias en frecuencia espacial según distintas teorías encontradas en la literatura.

Tamaño angular(‘)	Equivalente en ciclos/grado	
	Majaj et al.	Legge et al.
40.32	3.8	3
12.03	8.6	10
6.02	13.7	20
4.03	17.8	30

Tabla 2.4 Equivalente en ciclos/grado de los tamaños angulares utilizados en nuestro experimento, según los modelos de letras de Majaj et al., y de Legge et al.

Aunque existen modelos de *CSF* de redes sinusoidales recientes como el de Watson and Ahumada, 2005, se ha seleccionado, en la comparación con los resultados obtenidos en este trabajo, el modelo de Barten de 1999, que ha tenido gran éxito en la comparación con numerosos trabajos y presenta una gran variedad de condiciones experimentales, lo que hace más fácil su aplicación. Este modelo comentado en el primer capítulo, combina la $M_{opt}(u)$ (*MTF* del ojo) con una función neural ($N(u)$) la cual incluye ruido neural, ruido del fotón, y efectos de inhibición lateral, así como la influencia de la iluminación retiniana y otras características físicas del ojo y del test. Todos estos parámetros son conocidos en nuestro experimento por lo que la aplicación ha sido inmediata. El modelo relaciona la sensibilidad al contraste con la frecuencia espacial u del siguiente modo:

$$CSF(u) = M_{opt}(u)N(u) \tag{2.6}$$

En los últimos años, un punto de discusión ha sido la naturaleza funcional de la *MTF*. En este trabajo se han considerado tres posibilidades. Barten (1999) propuso una función de transferencia de modulación Gaussiana resultado de la combinación de diferentes efectos, pérdida de luz en los medios oculares, difusión en la retina y la propia naturaleza de los fotorreceptores. Esta dependencia funcional, combinada con su función neural ha sido probada y se ha comprobado que este modelo es un buen predictor de la *CSF* final especialmente en el dominio de altas frecuencias espaciales. Por otro lado, Artal y Navarro, en 1994, según un método de medida de doble-paso sugieren para el modelo ocular de *MTF* la siguiente función de doble exponencial:

$$MTF(u) = (1 - C) \exp(-Au) + C \exp(-Bu) \tag{2.7}$$

donde A , B y C son los parámetros fijados (A y B en grados; C es adimensional). Este modelo se ajusta muy bien en el dominio de frecuencias espaciales bajas e intermedias. Estos modelos, aunque basados en pruebas realizadas con luz monocromática, arrojan resultados muy similares a otros obtenidos con luz policromática (Campbell and Gubisch, 1966). Combinando datos de medidas psicofísicas con información de varios trabajos previos, Rovamo et al., en 1998, proponen para la *MTF* ocular una dependencia funcional del siguiente tipo:

$$M_{opt}(u) = \exp\left(-\left(u/u_c\right)^n\right) \quad (2.8)$$

siendo $u_c = 16.6 - 1.49d$; $n = \exp [(0.48/d - 0.318)]$ y d el diámetro de la pupila en mm. Se ha combinado la función neuronal $N(u)$ propuesta por Barten (1999) con los tres tipos de funciones de $M_{opt}(u)$ para calcular el $\Delta \log (CS)$. Para estos cálculos se ha tenido en cuenta la luminancia del test, del entorno, medida de tamaño pupilar y dimensiones del test empleado en estos trabajos. Estos resultados, junto con los obtenidos en este estudio se han representado en la figura 2.16 en función del logaritmo de la luminancia del entorno (s) para los cuatro tamaños angulares de letras empleadas.

El primer aspecto destacable que puede observarse en la figura, es el buen ajuste en la influencia funcional y cuantitativa de la luminancia del entorno en los valores de $\Delta \log (CS)$ de los resultados obtenidos en este experimento para letras y las predicciones teóricas para detección de ondas sinusoidales. Nuestros resultados están, en todos los casos, situados entre alguna de las curvas teóricas. Todos los cálculos predicen aumentos en la sensibilidad al contraste cuando aparece un incremento en la luminancia de entorno de 1 a 100 cd/m^2 , excepto en las predicciones con la MTF gaussiana (Barten, 1999). Dicho aumento de sensibilidad al contraste con L_S parece reflejar que la mejora en la calidad de imagen retiniana debido a la miosis pupilar y reducción de las aberraciones ópticas producida con el aumento de la luminancia de entorno, prevalece y domina sobre la pérdida de iluminación retiniana foveal.

Para obtener una comparación cuantitativa de nuestras medidas con estos cálculos, para cada frecuencia espacial y tipo de MTF considerado, se ha calculado la desviación estándar (σ) de las diferencias entre nuestros datos y las predicciones teóricas. En la tabla 2.5 se incluyen las desviaciones estándar y los promedios de cada tipo de MTF calculado.

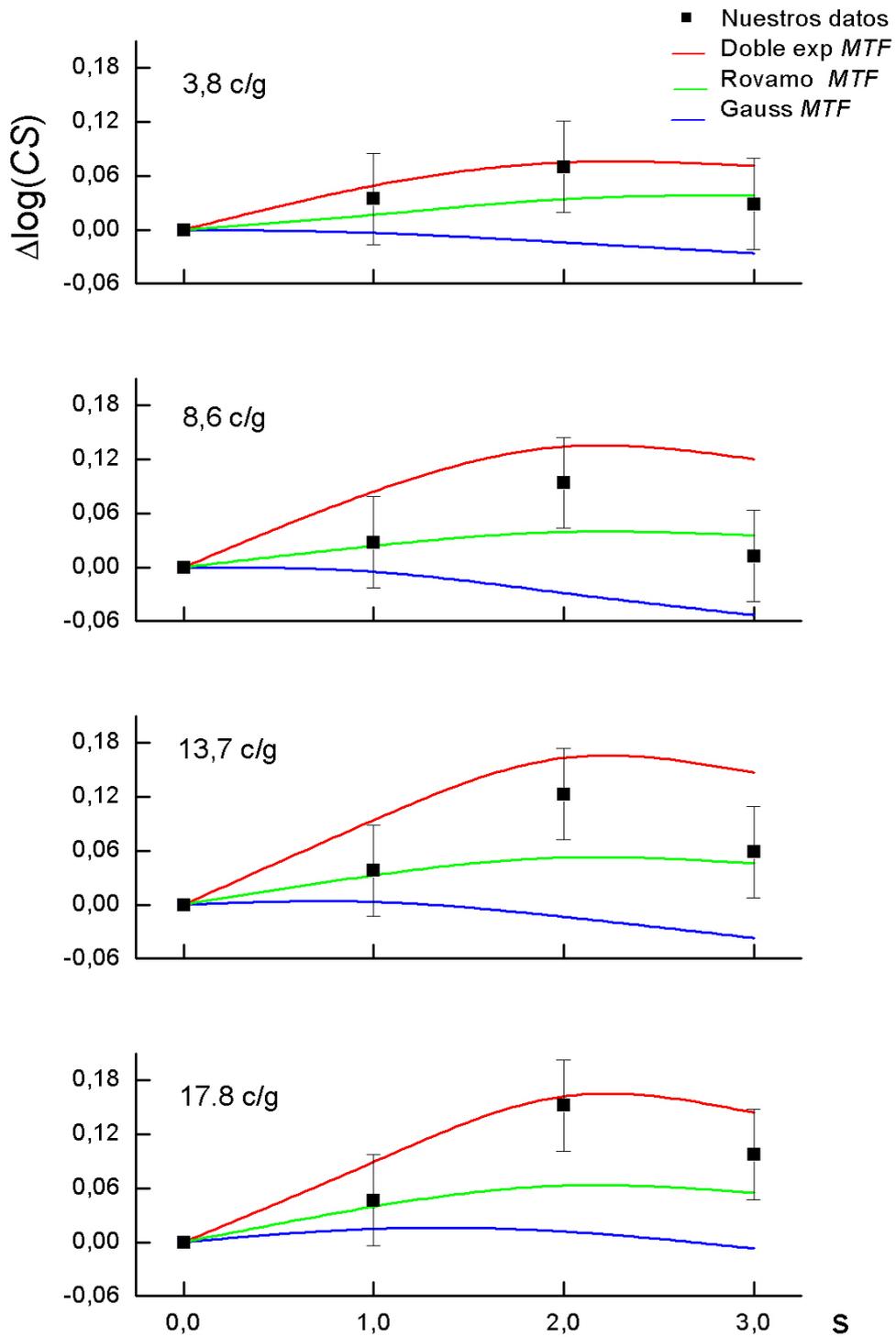


Figura 2.16 Comparación de los cambios en los valores del log (CS) en nuestras medidas en función del log (L_S) con los cálculos de las predicciones teóricas por combinación de las diferentes

u (c/g)	Barten (1999)	Artal y Navarro (1994)	Rovamo et al. (1998)
3.8	0.107	0.045	0.041
8.6	0.143	0.128	0.059
13.7	0.170	0.112	0.071
17.8	0.177	0.064	0.099
Promedio σ	0.149	0.087	0.068

Tabla 2.5 Desviación estándar (σ) de las diferencias entre nuestras medidas $\Delta\log$ (CS) y las predicciones teóricas para cada frecuencia espacial (u) y tipo de MTF considerada.

Para bajas frecuencias espaciales, la mejor aproximación entre nuestros datos y los modelos teóricos corresponden a la propuesta por Rovamo et al., 1998, y se encuentra muy próxima a aquella en el cual se considera una función de doble exponencial para la función de transferencia de modulación (Artal y Navarro, 1994). Por otro lado, para las más altas frecuencias espaciales consideradas en este trabajo (17.8 c/g), la mejor aproximación se obtiene con la MTF de doble exponencial. En el dominio de frecuencia espaciales intermedias, la MTF propuesta por Rovamo et al. en 1998, arroja las menores diferencias con nuestras medidas. Si se observan los promedios de las desviaciones estándar, esta última dependencia funcional de MTF ofrece la mejor aproximación a nuestros datos en todo el intervalo de frecuencias espaciales desde 3.8 a 17.8 c/g.

2.4. Discusión

Se ha encontrado una pequeña, pero medible, influencia de la luminancia del entorno en la forma de la FSC de letras. Aspecto que puede ser observado en la figura 2.13, pero que se hace más evidente en la figura 2.14. Este resultado no es completamente nuevo. Algunos estudios previos muestran que las sensibilidades al contraste encontradas con una iluminación del entorno son más altas, que aquellas obtenidas con un ambiente de oscuridad o próximo al mismo. Blommaert and Timmers (1987) en un experimento que llevaron a cabo en dos sujetos y con letras de 18 a 42 c/g, observaron que los valores de CS eran mayores con un campo de adaptación de 150 cd/m^2 que con otro de 0.9 cd/m^2 . En el trabajo realizado por Cox et al., (1999) se obtuvieron valores de CS más altos para 900 cd/m^2 de luminancia de entorno que para 5.6, 9.0 ó 30 cd/m^2 utilizando una $L_T = 160$ cd/m^2 , un test de Pelli-Robson y tan sólo cuatro individuos. Estas diferencias fueron encontradas a 4 m (frecuencia espacial fundamental de 3.49 c/g aproximadamente), pero no a 1 m (frecuencia espacial fundamental de 0.87 c/g); las diferencias en la CS desaparecieron cuando se utilizó pupila artificial. En un experimento realizado con el mismo tipo de test y 30 individuos, pero con una única frecuencia espacial fundamental correspondiente a 10.9 c/g y una luminancia de test de 200 cd/m^2 , Vizmanos et al., (2004) encontraron valores de CS más altos cuando la luminancia de entorno fue de 150 cd/m^2 que cuando era de 0.5 cd/m^2 , dichos valores eran estadísticamente significativos. Finalmente Khanani et al., (2004) realizaron medidas de sensibilidad al contraste con letras de Sloan en un ordenador cuya luminancia media fue de 95 cd/m^2 . Se analizaron tres frecuencias espaciales y se utilizaron dos condiciones de luz ambiente, la primera donde la habitación estaba

iluminada con los típicos fluorescentes colocados en el techo y la segunda prácticamente a oscuras. Ellos encontraron que con la luminancia de entorno provocada por los fluorescentes, la CS era más alta que cuando se media bajo condiciones de entorno oscuro. Esto indica una necesidad de establecer directrices de estandarización de las condiciones de iluminación. La existencia de esas directrices podría ayudar a hacer de la medida de la CS una prueba más útil en la valoración y diagnóstico clínico al aumentar la confianza entre los profesionales dedicados al cuidado del sistema visual.

El segundo punto de interés es la diferente influencia de la L_S sobre los distintos tamaños de letra, al menos en término cuantitativos. La figura 2.14 muestra esto y también la interacción estadísticamente significativa encontrada entre la luminancia del entorno y el tamaño de letra explicada en la sección 2.3. Esta influencia es pequeña para letras de gran tamaño ($40.32'$ y $12.03'$) pero es claramente más importante en $6.02'$ y aún más evidente para $4.03'$. Estos resultados han sido observados previamente por Blommaert and Timmers (1987) y por Khanani et al., (2004) pero ellos no pudieron probar ninguna información concerniente a la influencia funcional de la luminancia de entorno para cada tamaño de letra (frecuencia espacial) porque estos dos estudios se llevaron a cabo sólo con dos condiciones de entorno, oscuro e iluminado. El presente estudio se extiende a varias condiciones de L_S y se puede observar que la influencia funcional es muy similar para todo el rango de frecuencias espaciales consideradas. Para una luminancia del test de 200 cd/m^2 , la sensibilidad al contraste de letras siempre aumenta con el incremento de la luminancia del entorno desde 1 a 100 cd/m^2 (0.5-50% de la luminancia del test) y disminuye para luminancia del entorno de 1000 cd/m^2 .

La miosis pupilar puede justificar los incrementos de la medida en el $\Delta \log (CS)$ cuando la luminancia del entorno pasa desde 1 a 100 cd/m^2 , pero es difícil considerar esta explicación como válida para explicar el descenso observado en la función de sensibilidad al contraste de letras cuando la luminancia del entorno aumenta desde 100 a 1000 cd/m^2 . Estos resultados están reflejados en la tabla 2.3. Cuando el tamaño de la pupila se reduce desde los 3.0 a 2.5 mm (fuera de los límites donde el efecto de la difracción puede ser considerado), la tendencia de todas las $MTFs$ propuestas es hacia un pequeño aumento en todo el rango de frecuencias espaciales consideradas, con excepción del modelo de Rovamo en el rango de 3.8 c/g el cual se muestra prácticamente igual. Esta variación en el tamaño de la pupila produce una disminución del 20% aproximadamente en la iluminación retiniana. A priori, dicha reducción no parece justificar la disminución tan importante sufrida en el $\Delta \log (CS)$ al pasar de 100 a 1000 cd/m^2 . De hecho, aunque en general las tendencias en todos los modelos siguen un patrón similar observándose una reducción de la CS al aumentar la luminancia del entorno a 1000 cd/m^2 , se pueden observar algunas particularidades; así, en el modelo de MTF Gaussiano, a pesar de haber sido elegido para el cálculo de las predicciones teóricas con los demás trabajos por presentar un buen ajuste con estudios experimentales previos encontrados en la literatura, curiosamente presenta una tendencia diferente a los trabajos con los que ha sido comparados en esta tesis. Se observa una disminución del $\Delta \log (CS)$ con el aumento de la L_S desde 1 a 1000 cd/m^2 para todos los tamaños de letra considerados. Por otro lado, el modelo de Rovamo, muestra una tendencia similar a la observada en nuestros datos pero las variaciones del $\log (CS)$ con los cambios de luminancia del entorno existen, pero son muy pequeños.

Existen efectos como las aberraciones ópticas o el desalineamiento ocular que pudieran influir en los resultados encontrados, pero ni estos ni otros efectos como la miosis pupilar, ya comentada, los justifican completamente. En este trabajo se ha medido la *CS* bajo condiciones de luminancia del entorno diferentes que presentan distintas temperaturas de color, quizás este hecho pudiera explicar parte de la discrepancia encontrada, en cualquier caso, no se ha encontrado información previa al respecto; no obstante, este es un asunto que será tratado en el cuarto capítulo de esta memoria. Otros efectos ópticos, como la luz difundida o el deslumbramiento podrían generar parte de la disminución observada. Tal es así, que el deslumbramiento provoca una luminancia de velo la cual aumenta la luminancia foveal en un factor que depende de los valores de la L_S y que se indica en la columna 5 de la tabla 2.4. Este factor es el mismo por el cual el contraste percibido es reducido en relación al contraste original. Si se aplica este argumento al umbral de contraste percibido, el efecto de la luminancia del entorno debería generar una disminución en los valores de $\log(CS)$. En este sentido, cuando la luminancia del entorno aumenta de 1 a 100 cd/m^2 , (es decir, cuando la luminancia de entorno, L_S , es menor que la luminancia del test, L_T) el $\log(CS)$ debería reducirse en $\log(1.030/1.011) = 0.008$ unidades logarítmicas. Obviamente, esto no es detectable y no es comparable con el beneficio producido por la miosis pupilar (diámetro de la pupila disminuye de 4.7 a 3.0 mm). Mientras que si la luminancia del entorno es superior a la luminancia del test (200 cd/m^2), es decir aumento de 100 a 1000 cd/m^2 , el diámetro de la pupila no cambia demasiado (3.0 a 2.5 mm) pero el contraste percibido disminuye en un factor $(1.2041/1.030) = 1.169$ cuyo valor de logaritmo es 0.068. La disminución promedio observada y su desviación estándar en el $\log(CS)$ (ver figura 2.14) para los cuatro tamaños de letra consideradas en este experimento son 0.063 y 0.015 unidades logarítmicas respectivamente. Esta buena aproximación entre la disminución calculada y observada en el umbral de contraste parece sugerir que el deslumbramiento es responsable de la disminución de la *CS* de letras para alta luminancia de entorno.

Está documentado que un aumento en la luminancia de adaptación produce un incremento en la sensibilidad al contraste (Van Nes and Bouman, 1967). Teniendo en cuenta que la tarea de reconocimiento de letras en este trabajo es foveal, la adaptación local juega un papel importante en el resultado final. Los cambios en la luminancia del entorno no sólo van a generar cambios en la adaptación general del sistema visual, sino también un incremento en la luz que llega a la fovea debido a la luminancia de velo. Cuando la L_S va desde 1 a 100 cd/m^2 , el aumento en la luminancia foveal debido a la luminancia de velo es menor del 3%, cantidad despreciable y demasiado pequeña para justificar el incremento observado en la sensibilidad al contraste. Este incremento puede ser razonablemente explicado por la mejora en la calidad óptica de la imagen retiniana producida por la miosis pupilar. Cuando la L_S va desde 100 a 1000 cd/m^2 , el incremento de la luz que llega a la fovea debido a la luminancia de velo es $> 20\%$. Sin embargo, nuestros resultados muestran en este caso una disminución sistemática de *CS* para todos los tamaños de letra considerados. A pesar de que la adaptación a la luminancia puede generar algo de mejoría en sensibilidad al contraste, es evidente, al observar nuestros resultados, que hay que tener en consideración la L_V para poder explicar los hallazgos encontrados, puesto que dicha L_V va a producir una reducción de contraste en la imagen retiniana que conduce a una menor sensibilidad al contraste en altas

luminancias. La luminancia de velo, por tanto, es necesaria para explicar este efecto.

Los resultados de este estudio entran en aparente contradicción con los obtenidos por Cox et al., (1999) con tarjetas de letras. Como ya se ha comentado, ellos encontraron un incremento continuo de los valores de CS con el aumento de las luminancias del entorno desde 5.6 a 900 cd/m^2 con una luminancia del test de 160 cd/m^2 . Para una frecuencia de 3.49 c/g el test y el entorno subtienden en su experimento unos 11 y 24 grados respectivamente. Como se observa en la figura 2.14, el mayor cambio observado en $\Delta \log (CS)$ para la letra de mayor tamaño 40.32', (3.8 c/g) en este experimento es sólo de 0.07 unidades logarítmicas (cuando L_S cambia de 1 a 100 cd/m^2), siendo el campo visual subtendido por el entorno de 34°. Con estos campos visuales tan similares el efecto del cambio de luminancia de entorno en la pupila debería ser, de acuerdo con Stanley and Davies (1995), muy similar en ambos experimentos. Se espera que la pérdida de $\log (CS)$ debido a la luminancia de velo en el experimento de Cox et al. cuando la luminancia del entorno aumenta de 100 a 900 cd/m^2 sea de 0.025 unidades logarítmicas (Adrian and Topalova, 1991). Aunque no hay significación estadística, este efecto mas o menos se puede intuir en sus resultados cuando se usa una pupila artificial. Así pues, se puede concluir que la miosis pupilar en su experimento debería ser dominante sobre los efectos de un posible deslumbramiento discapacitante en el rango de 100 a 900 cd/m^2 .

2.5. Conclusión

En conclusión, este trabajo proporciona información sobre la influencia cuantitativa de los cambios de luminancia del entorno en la función de sensibilidad al contraste de letras, también como su dependencia funcional con ellos para una luminancia de test típica. El aumento de la MTF explica que estos cambios son mayoritariamente debidos a la miosis pupilar producida cuando la luminancia del entorno aumenta, al menos mientras esta luminancia está por debajo de la luminancia del test. Para luminancias de entorno más elevadas, aparecen otros fenómenos que merece la pena considerar como es el efecto de la luminancia de velo que explica de forma adecuada la disminución observada en la sensibilidad al contraste. Desde un punto de vista clínico, es interesante remarcar que este estudio se llevo a cabo en individuos jóvenes, es decir, para sujetos mayores, se espera que la disminución de la CS debido a la alta luminancia sea más significativa. Estas observaciones refuerzan la necesidad de una normativa de estandarización para la iluminación en gabinetes de evaluación de la función visual.

Capítulo 3

Relación de la luminancia del entorno y del test en el reconocimiento de letras de contraste umbral

Este capítulo comienza con la justificación que ha llevado al grupo de Investigación de Óptica de la Visión a completar el trabajo realizado sobre la influencia de la luminancia del entorno en el reconocimiento de letras de contraste umbral, incluyendo en esta ocasión la luminancia del test como variable a considerar.

Se continúa con el desarrollo del experimento donde se obviarán algunos aspectos referentes al dispositivo experimental, diseño de las letras o procedimiento experimental por haber sido ampliamente desarrollados en el capítulo anterior y mantener, en este experimento, su estructura básica. Por este motivo y para no repetir información se incluirán únicamente los aspectos que difieren del primer trabajo explicado en esta tesis.

Posteriormente, se realizará el análisis y discusión de los resultados encontrados en el trabajo, finalizando con un modelo psicofísico que contempla los parámetros que intervienen en la sensibilidad al contraste. El capítulo 3 termina con las conclusiones que del trabajo pueden extraerse.

Algunos de los resultados de este capítulo han sido parcialmente publicado por Gutiérrez, M. J. et al., en el 2008 en *Óptica Pura y Aplicada* 41 (1): 1-8, bajo el título “Invarianza de la sensibilidad al contraste frente a cambios en la luminancia del entorno”. Una parte del estudio fue presentado en la Octava Reunión Nacional de Óptica en el 2006, en el Congreso Internacional Luxamerica 2008 y en la edición número 21 del Congreso Internacional de Optometría, Contactología y Óptica Oftálmica correspondiente al año 2010. La contribución de Isabel Arranz al estudio, en colaboración con otros coautores, fue la búsqueda bibliográfica, diseño del experimento, realización de las medidas e interpretación y análisis de los resultados.

3.1. Motivación

Mientras que para la medida de la AV las condiciones de luminancia están bien establecidas tanto por instituciones americanas como europeas, en este sentido la CS muestra una carencia importante. Un aspecto interesante en relación a la AV , es que la International Organization for Standardization (ISO), 1996, propone condiciones de luminancia no sólo para el test (entre 80 y 320 cd/m^2), sino también su relación con el entorno. Indica que el valor de la luminancia de los 10° centrales debe ser entre un 10 y un 25% de la luminancia del test y más allá de esos 10° centrales, la

luminancia debe ser menor. Es decir, aunque el margen de luminancia del test es amplio, tiene que existir una relación de luminancias entre el test y el entorno para obtener una medida adecuada de la *AV*.

No se ha encontrado bibliografía concerniente a la relación entre luminancias del test y del entorno en el caso de la sensibilidad al contraste de letras. Aunque no son muchos los trabajos encontrados en la literatura, se ha estudiado, de forma independiente, la *CS* con la variación de la L_T manteniendo constante L_S (Blackwell, 1946; de Valois et al., 1974; Kelly, 1977; Banks et al., 1987; Sucs and Uvijls, 1992; Puell et al., 2004), y viceversa. En este último sentido la literatura nos ofrece trabajos en los que la luminancia del test se mantiene constante y siempre dentro de los márgenes establecidos para la agudeza visual (80-320 cd/m^2). Así, Blommaert and Timmer en 1987 y Khanani et al., en el 2004, emplearon una luminancia del test fija de 90 y 95 cd/m^2 respectivamente. Mientras que Cox et al., 1999 y Vizmanos et al., en el 2004 utilizaron luminancias de test mayores que los anteriores autores, 160 cd/m^2 en el primer trabajo y 200 cd/m^2 para el segundo. En todo caso, la interacción entre las dos variables, L_T y L_S y su repercusión sobre la sensibilidad al contraste se encuentra aún sin analizar en profundidad.

Por otro lado, y a nivel clínico, en la mayor parte de las pruebas de sensibilidad al contraste comerciales, los fabricantes no ofrecen habitualmente instrucciones precisas sobre los niveles de luminancia bajo los cuales se deben desarrollar las medidas (Woodhouse, 1987). Así, por ejemplo, el test de sensibilidad al contraste VISTECH (Ginsburg, 1987) está diseñado para lo que el fabricante considera “condiciones normales de iluminación en la habitación”, sin embargo, no se precisan cuantitativamente dichas condiciones. El Pelli-Robson es otro ejemplo, donde se recomienda una luminancia de 85 cd/m^2 en el test y la única indicación para la luminancia del entorno es que “tiene que estar iluminado exteriormente”.

Si se tiene en cuenta que el simple hecho de encender la iluminación ambiental del gabinete donde se realizan las pruebas visuales puede suponer que el entorno próximo al test varíe desde niveles mesópicos (1-10 cd/m^2) a fotópicos ($\approx 100 \text{cd/m}^2$), dicho cambio conlleva variaciones de la sensibilidad al contraste que, dependiendo de la frecuencia espacial, pueden ser de hasta 0.15 unidades logarítmicas, como se concluye de los resultados obtenidos en el capítulo 2. Se hace difícil, por tanto, poder comparar resultados quizás no tanto en la detección, pero sí en la evolución, por ejemplo, de una patología ocular.

Los resultados encontrados en el capítulo anterior muestran que el reconocimiento de la letra de contraste umbral parece estar condicionado, para una luminancia del test de 200 cd/m^2 , por dos aspectos opuestos, ambos generados por la luminancia del entorno. Por un lado, la luminancia de velo produce un aumento de la iluminación retiniana provocando una reducción del contraste de la imagen y por otro, la miosis pupilar genera un aumento de la *MTF* y una reducción de las aberraciones ópticas aumentando la calidad de la imagen retiniana. El balance entre ambos efectos parece ser uno de los principales condicionantes en los resultados de la *CS* de letras. Uno de los objetivos de este trabajo es, precisamente, determinar si existe alguna condición de iluminación para el test en las que la sensibilidad al contraste permanezca invariante frente a muy diferentes condiciones de iluminación del entorno.

En este trabajo se diseñó una prueba de *CS* tipo Pelli-Robson, pero con un paso de contraste de 0.024 unidades logarítmicas, paso suficientemente pequeño como para detectar cambios mínimos cuando el reconocimiento de la letra se encuentra próximo al umbral. No se ha encontrado en la literatura ningún trabajo en el que se haya utilizado un test de letras con un paso de contraste tan fino. Se escogieron letras de un único tamaño angular $\varphi = 4.03'$ para los optotipos de las tarjetas porque, según el trabajo anterior, para estas letras pequeñas las variaciones de la sensibilidad al contraste debidas a cambios en la luminancia del entorno se hacen más notables. Además, este tipo de pruebas de sensibilidad al contraste basados en letras pequeñas, aunque no son habituales en la práctica clínica, sí han demostrado ser herramientas poderosas y más útiles que las pruebas de agudeza visual convencionales a la hora de detectar muy pequeñas ametropías residuales (Rabin, 1994, Rabin, and Wicks, 1996). Las medidas se llevaron a cabo bajo 16 condiciones de iluminación diferentes, con luminancias del test que variaban entre las 10 y las 600 cd/m^2 y entre 1 y 600 cd/m^2 del entorno, manteniendo en todo momento una iluminación homogénea y uniforme. En el estudio se emplearon 35 ojos de 18 jóvenes de edades comprendidas entre los 19 y los 25 años.

Mientras que en el trabajo anterior se obtuvieron las condiciones de luminancia en las que el log (*CS*) es máximo cuando existe un balance adecuado entre la luminancia de velo y la miosis, que para nuestro caso concreto aparece cuando las luminancias del test y del entorno están próximas, en este trabajo lo que se pretende es analizar la influencia simultánea de ambas luminancias en el reconocimiento de letras de contraste umbral. La finalidad que se persigue, por un lado, es la de buscar condiciones ambientales bajo las cuales la sensibilidad al contraste de letras presente máxima invariancia respecto a cambios de la luminancia del entorno. De esta manera, quizás no se obtenga la máxima sensibilidad al contraste, pero en cambio tendremos condiciones estables de medida que ayudan a obtener resultados más confiables, aspecto fundamental para la práctica clínica. Por otro lado, también se pretende entender los mecanismos ópticos y fisiológicos que intervienen globalmente en la *CS*; dichos mecanismos serán los parámetros considerados en el ajuste de un modelo psicofísicos de sensibilidad al contraste de letras.

Para ello se plantean los siguientes objetivos de trabajo:

- 1.- Considerando que la máxima sensibilidad al contraste se ha obtenido, para las condiciones experimentales en las que se realizó el trabajo anterior, en condiciones de proximidad entre las luminancias del test y del entorno; en este trabajo se plantea corroborar dichos resultados incorporando como variable la luminancia del test, parámetro constante en el experimento del capítulo 2.
- 2.- Teniendo en cuenta la inclusión de la luminancia del test como nueva variable, se analizará si los resultados obtenidos permiten ser justificados por el compromiso existente entre la luminancia de velo y el tamaño pupilar, como de hecho ocurría en el trabajo anterior, o si existe algún otro factor no contemplado que deba ser incorporado en base a la justificación de los resultados encontrados.
- 3.- Se buscará la condición de luminancia del test tal que modificando la L_S se obtengan los resultados de sensibilidad al contraste más repetitivos para garantizar fiabilidad en dicha prueba visual. Se plantea la implementación de una normativa

que regule el conjunto de condiciones de iluminación bajo las que se realicen este tipo de pruebas en la *CS*, como de hecho ocurre en la *AV*.

4.- Se analizará la naturaleza óptica y fisiológica de las variables que influyen en la sensibilidad al contraste.

5.- Tomando como parámetros los mecanismos ópticos y fisiológicos que, de forma general, intervienen en los resultados de la *CS*, se diseñará un modelo matemático, de naturaleza psicofísica, que de cuenta de la sensibilidad al contraste de letras.

3.2. Desarrollo del experimento

A continuación se procederá a explicar los aspectos relacionados con los participantes de este experimento, así como el dispositivo experimental y la calibración fotométrica llevada a cabo en el trabajo. Posteriormente se detallará el diseño de los optotipos para finalmente explicar el procedimiento experimental empleado con los sujetos en la medida de la sensibilidad al contraste.

3.2.1. Sujetos

En base a la investigación llevada a cabo en el trabajo anterior y presentada en el capítulo 2 de esta memoria, las características generales en cuanto a la información del candidato se refiere, fueron básicamente las mismas; criterio de inclusión de los sujetos, firma del consentimiento informado y evaluación de los parámetros oculares de los participantes en el estudio. Por este motivo, únicamente se contemplarán aquellos aspectos que difieren de los previamente comentados en la sección 2.2.1. No obstante, el anexo 1, que se incluye al final de la memoria, recoge estos últimos datos.

En el estudio participaron dieciocho sujetos (35 ojos), 11 mujeres y 7 varones, todos ellos con edades comprendidas entre los 19 y los 25 años, con un promedio de edad de 22.8 años y una desviación estándar de 2.5.

Para las medidas optométricas, se empleó la misma sala y el mismo instrumental que en el primer trabajo. La diferencia más significativa respecto al estudio anterior fue que en esta ocasión la *AV* se consideró en condiciones monoculares, tal y como posteriormente se iban a llevar a cabo las pruebas de reconocimiento de letras de contraste umbral. En cuanto a la *AV* se refiere, aquellos sujetos con una agudeza visual monocular menor que $-0.09 \log MAR$ (1.2 Decimal) con su mejor compensación óptica, fueron rechazados en este estudio. El rango de la *AV* monocular de los participantes fue de -0.09 a $-0.29 \log MAR$ (1.2 a 2.0 Decimal), aunque el 80% de estos valores se encontraban en un rango de -0.16 a $-0.29 \log MAR$ (1.5 a 2.0 Decimal).

El error refractivo de los sujetos fue compensado en todas las ocasiones con una lente mineral 1.523 blanco Signet Armorlite Ibérica, montada sobre unas gafas que fueron utilizadas exclusivamente durante las pruebas de sensibilidad al contraste.

3.2.2. Dispositivo experimental

El acondicionamiento del laboratorio de Iluminación y Visión de la Facultad de Ciencias llevado a cabo para la puesta en marcha del primer experimento, sobre el reconocimiento de letras de contraste umbral contemplado en esta memoria, fue adecuado para este trabajo, por lo que no hubo que realizar modificación alguna (ver figura 2.1). Se mantuvo tanto el tipo como la disposición de las luminarias del interior (4 lámparas incandescentes halógenas estabilizadas) y del exterior de la caja (8 lámparas incandescentes de 300 W cada una) que servían de luminancia del test y del entorno respectivamente, así como los ángulos de visión que subtendían ambas luminancias (3.8° y 34°). Las variaciones introducidas en este trabajo se refieren a la cantidad de luminancia empleada para medir la CS de los sujetos. La L_S fue variada desde 1 hasta 600 cd/m^2 y la L_T desde 10 a 600 cd/m^2 para un tamaño de letra constante, que subtendía $4.03'$ de ángulo visual.

En este trabajo las pruebas experimentales también se realizaron siempre con pupila natural, cuyo diámetro fue medido con el pupilómetro diseñado por nuestro grupo de trabajo y que ya ha sido comentado en el capítulo 2.

3.2.3. Calibración fotométrica de los dispositivos

Dado que se utilizó, como ya se ha comentado, el mismo tipo de lámparas y el mismo luminancímetro Spectra Pritchard 1980A (Photo Research, Burbank, CA, USA) que los empleados en el capítulo 2, no fue necesario repetir el análisis de las derivas de las lámparas y luminancímetro previamente realizado. Para conseguir una mínima fluctuación, la realización de las medidas comenzó en todos los casos 1 hora después del encendido del sistema luminancímetro - lámparas.

Para determinar la posición de los autotransformadores que permitiera generar la luminancia del entorno que fue seleccionada para la realización de este trabajo, éstos fueron conectados a dos polímetros que indicaban la tensión de salida. Con el luminancímetro dirigido siempre hacia la misma zona del entorno se obtuvieron 600, 200, 10 y 1 cd/m^2 de luminancia del entorno con una tensión de salida de 189, 139, 71 y 46 V respectivamente.

3.2.4. Diseño de los optotipos

Calibración de contrastes

En vista de los resultados obtenidos en el primer trabajo de esta tesis, donde se observa cómo las mayores diferencias en el log (CS) al variar la luminancia del entorno se encuentran en letras de menor tamaño, en este experimento se optó por un tamaño de optotipos que permitiera detectar muy pequeñas variaciones en el logaritmo de la CS , tomando como variables la luminancia del test y del entorno. Por este motivo, se eligió un tamaño angular de letra pequeño, correspondiente a $\phi = 4.03'$, con el que previamente se había trabajado y proporcionaba los resultados más evidentes.

Se calibraron los 256 tonos de gris que pueden ser impresos, en forma de manchas rectangulares como las de la figura 2.7, con la impresora Hewlett-Packard HP9800

deskjet. La calibración fotométrica de los tonos de gris fue llevada a cabo con el luminancímetro Spectra Pritchard 1980 A y el procedimiento empleado para dicha calibración fue igual al explicado en el capítulo anterior. Tomando como referencia un entorno oscuro y con las cuatro lámparas halógenas conectadas a las fuentes de alimentación bajo una intensidad de corriente de 4.1 A, próximo al máximo para este tipo de luminarias, se iluminaba el test que contenía los tonos de gris en forma de mancha rectangular. En todos los casos se registraron 8 valores fotométricos de cada mancha, 4 internos y 4 externos y su valor promedio fue empleado para calcular el contraste de la mancha. Se realizaron, por tanto, 2048 medidas fotométricas. La calibración de las manchas de gris obtenidas no presenta diferencias estadísticamente significativas a las representadas en la figura 2.9, por lo que dichos datos han sido omitidos. Esta repetibilidad de resultados garantiza precisión en las medidas realizadas.

Diseño de las letras de bajo contraste

Para el diseño de la prueba se empleó la misma disposición de los optotipos dentro de las tarjetas y el mismo tipo de letra que en el trabajo anterior, manteniendo en todo caso las recomendaciones sugeridas por la National Academy of Science. National Research Council (NAS-NRC), 1980).

En función de pruebas previas de CS de letras, con las diferentes condiciones de luminancia seleccionadas en el trabajo, realizadas a los propios miembros de equipo de investigación, se seleccionaron los tonos de gris que serían empleados para el diseño de las letras de $\varphi = 4.03'$ de tamaño angular, dejando una horquilla suficiente para garantizar la visibilidad de los optotipos por todos los participantes.

La selección de los tonos de gris para el diseño de las letras fue realizado según las recomendaciones de la Academia Americana de Oftalmología (Rubin et al., 1990) manteniendo una progresión logarítmica uniforme entre el contraste de los tripletes y, en nuestro caso particular, seleccionando un paso de contraste entre los tonos de gris que fuera suficientemente pequeño para proporcionar precisión en las medidas. La tabla 3.1 recoge los logaritmos de sensibilidad al contraste calculados según la expresión de Weber dispuestos en tres cartas o tarjetas que fueron empleados en el diseño de los optotipos y, entre paréntesis, la progresión elegida en los 48 tonos de gris. De manera que, como se muestra en la tabla 3.1, los 16 primeros tripletes variaban su tono de gris en pasos de 10 abarcando desde el 0 hasta el 150. Los siguientes tripletes, del 17 al 29, corresponden a los tonos de gris que van desde el 154 hasta el 202 en pasos de 4. Los siguientes tonos de gris que van desde el 204 hasta el 236 fueron tomados en pasos de 2 y corresponden a 17 tripletes, y por último, fueron calibrados fotométricamente otros dos tripletes más, cuyo paso entre uno y otro fue de tan solo un tono de gris de diferencia.

En conclusión, para la medida de la sensibilidad al contraste de los sujetos fueron necesarios 48 tripletes que abarcaban un rango de $\log(CS)$ desde 0.047 hasta 1.184, obteniéndose en este caso un paso de contraste entre cada grupo de letras de tan sólo 0.024, como se muestra en la figura 3.1. Dicha figura representa el $\log(CS)$ en función del índice de grupo (i), es decir, del número de tripletes (1 a 48) necesarios para la realización de la prueba de reconocimiento de letras de contraste umbral. En la figura se ha incluido el ajuste de regresión lineal, con su coeficiente de

correlación $R^2 = 0.997$, cuya pendiente (b) indica el paso de contraste obtenido para las letras de $\phi = 4.03'$.

log CS (Tonos de gris de las letras de CS)

1ª tarjeta		2ª tarjeta	
0.047 (0)	0.058 (10)	0.374 (154)	0.392 (158)
0.061 (20)	0.067 (30)	0.412 (162)	0.433 (166)
0.079 (40)	0.097 (50)	0.459 (170)	0.483 (174)
0.122 (60)	0.150 (70)	0.505 (178)	0.526 (182)
0.178 (80)	0.206 (90)	0.547 (186)	0.569 (190)
0.231 (100)	0.253 (110)	0.592 (194)	0.617 (198)
0.275 (120)	0.298 (130)	0.643 (202)	0.663 (204)
0.325 (140)	0.358 (150)	0.684 (206)	0.706 (208)

3ª tarjeta	
0.729 (210)	0.753 (212)
0.777 (214)	0.802 (216)
0.827 (218)	0.852 (220)
0.877 (222)	0.903 (224)
0.931 (226)	0.960 (228)
0.992 (230)	1.028 (232)
1.071 (234)	1.122 (236)
1.151 (237)	1.184 (238)

Tabla 3.1 Los log (CS) empleados en el diseño de los triplete de los optotipos dentro de la tarjeta, entre paréntesis, el tono de gris correspondiente.

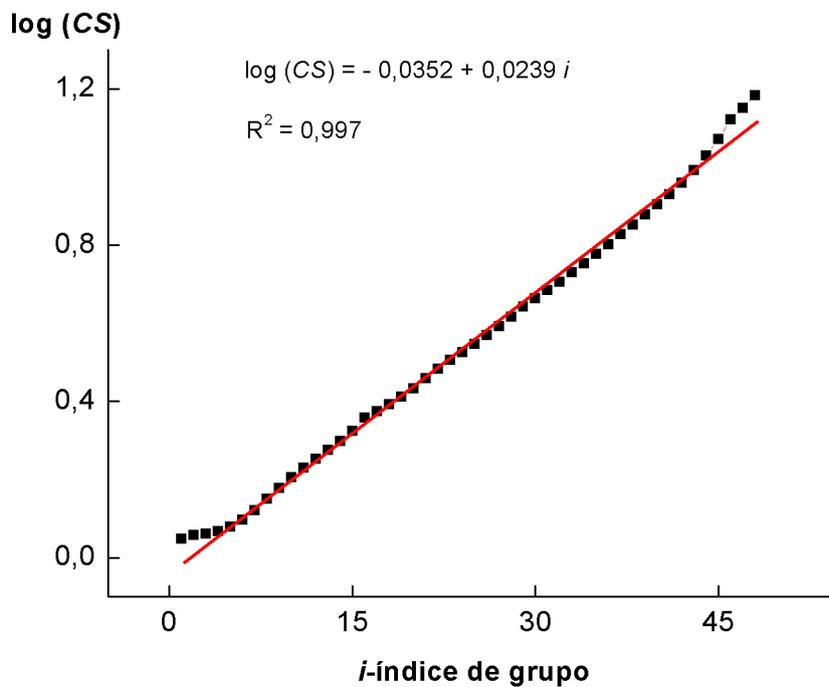


Figura 3.1 log (CS) en función del índice de grupo (i), para una letra $\phi = 4.03'$

Al observar el ajuste del log (CS) en función del índice de grupo, se puede apreciar la calidad del test diseñado en cuanto al paso de contraste se refiere, sobre todo en la zona que representa los tonos de gris que mayoritariamente corresponden a los umbrales de contraste de los participantes. Las zonas de los extremos, la que tiene el menor y el mayor log (CS), no presentan un ajuste tan preciso como el resto, pero corresponde a las prestaciones que la impresora Hewlett-Packard HP9800 deskjet nos pudo ofrecer en su máxima calidad de impresión.

3.2.5. Procedimiento experimental

La participación en el estudio de los 18 sujetos fue totalmente voluntaria y sin ningún tipo de contraprestación. Previamente se les informó de forma verbal y por escrito de la naturaleza y objetivo del trabajo y todos ellos, tras firmar un consentimiento informado, fueron sometidos a una revisión visual donde se valoraba la posibilidad de ser incluido en el trabajo.

El procedimiento experimental llevado a cabo en este trabajo, difiere poco del expuesto en la sección 2.2.5, por lo que nos ceñiremos a comentar aquellos aspectos diferentes de los ya explicados.

En relación al nivel de iluminación del test, después de analizar diversas recomendaciones encontradas en la literatura, se eligió el valor de 200 cd/m^2 ya que es el valor promedio propuesto por las normativas existentes para la medida de la agudeza visual (UNE-EN ISO:8596, NAS-NRC 1983, ANSI Z80.21, 2004). Se eligió también el valor de 80 cd/m^2 por ser el valor inferior propuesto por dichas normativas. Los otros dos valores seleccionados fueron 10 cd/m^2 al ser el límite típicamente considerado entre la visión fotópica y mesópica, y 600 cd/m^2 , luminancia muy superior a la habitual en la clínica. Las luminancias del entorno fueron básicamente las mismas 1 cd/m^2 , 10 cd/m^2 , 200 cd/m^2 y 600 cd/m^2 contemplándose, de esta manera, un amplio rango habitual de luminancias, que va desde un entorno oscuro hasta un entorno con una iluminación muy superior a la habitual en un interior. Durante unas 3 horas aproximadamente, se realizaron las 16 medidas de sensibilidad al contraste para cada individuo, las correspondientes a las combinaciones de las cuatro condiciones de luminancia del entorno ($L_S = 1, 10, 200$ y 600 cd/m^2), y del test ($L_T = 10, 80, 200$ y 600 cd/m^2).

Con el fin de evitar la memorización de los optotipos de las tarjetas que debían reconocer en las 16 condiciones de iluminación, se diseñaron 8 juegos diferentes con letras dispuestas de forma aleatoria pero con los mismos contrastes, que se iban cambiando de una condición de prueba a la siguiente.

El método psicofísico empleado y el procedimiento de contabilización y de finalización de la prueba de reconocimiento de letras de contraste umbral fue el mismo que el utilizado en el primer experimento. Debido a la duración tan prolongada del tiempo que se tardaba en realizar las medidas de sensibilidad al contraste, y con el fin de evitar cansancio sobre los sujetos, más aún teniendo en cuenta que todos los participantes excepto uno, realizaron las medidas dos veces, una para el ojo derecho y otra para el izquierdo, el tamaño de la pupila fue medido tan sólo en uno de los participantes en el estudio. La medida del diámetro pupilar se realizó bajo las dieciséis condiciones de iluminación utilizadas en el trabajo después

de 10 minutos de adaptación a cada una de ellas, que fue el tiempo empleado en la adaptación para las medidas de reconocimiento de letras de contraste umbral. Se tomaron cinco imágenes de la pupila del sujeto y se calculó el diámetro promedio y su desviación estándar. El orden en que se realizaron las medidas del diámetro pupilar fue aleatorio, al igual que el orden en que se realizaron las medidas del reconocimiento de letras de contraste umbral bajo las dieciséis condiciones de luminancia empleadas.

3.3. Análisis de los resultados y discusión

Para analizar los valores experimentales obtenidos y en base a los resultados encontrados en el capítulo anterior donde, el efecto del tamaño pupilar parece tener cierta influencia en las medidas del logaritmo de la CS , lo primero que se va a analizar es el diámetro de la pupila en función de las dos variables consideradas en este trabajo, la luminancia del entorno (L_S) y la luminancia del test (L_T).

Por otro lado, para facilitar la lectura y dado que las condiciones fisiológicas involucradas con la visión, y en concreto con la sensibilidad al contraste se toman en unidades logarítmicas, vamos a definir dos variables que condicionan la CS y que serán empleadas en el análisis de los resultados. Denominaremos, como en el capítulo anterior, $s = \log(L_S)$ e incluiremos $t = \log(L_T)$.

3.3.1. Análisis del diámetro pupilar versus el logaritmo de las luminancias del entorno y del test

En la figura 3.2 se representa el tamaño de la pupila (d), en mm, en función del $\log(L_S)$ y del $\log(L_T)$.

Hay que tener en cuenta que esta figura representa los promedios del diámetro pupilar (d) de un único sujeto, al que se le realizaron 5 medidas para cada una de las 16 condiciones de luminancia empleadas en el trabajo. Sería necesario un número mayor de observadores para poder correlacionar los resultados obtenidos y extraer conclusiones estadísticas; pero no por ello podemos obviar la información que de la gráfica se puede extraer, más aún teniendo en cuenta que los resultados obtenidos son medidos de forma objetiva y que no están influenciados bajo la respuesta subjetiva del propio individuo. Es razonable pensar que los valores absolutos pueden no ser representativos del promedio de los ojos de los sujetos, pero en cambio sí que pueden proporcionar información relativa de las tendencias de cómo varía el diámetro pupilar con la luminancia del test y del entorno. De hecho, los resultados encontrados parecen consistentes con las variaciones que sufre la pupila al variar dichas luminancias.

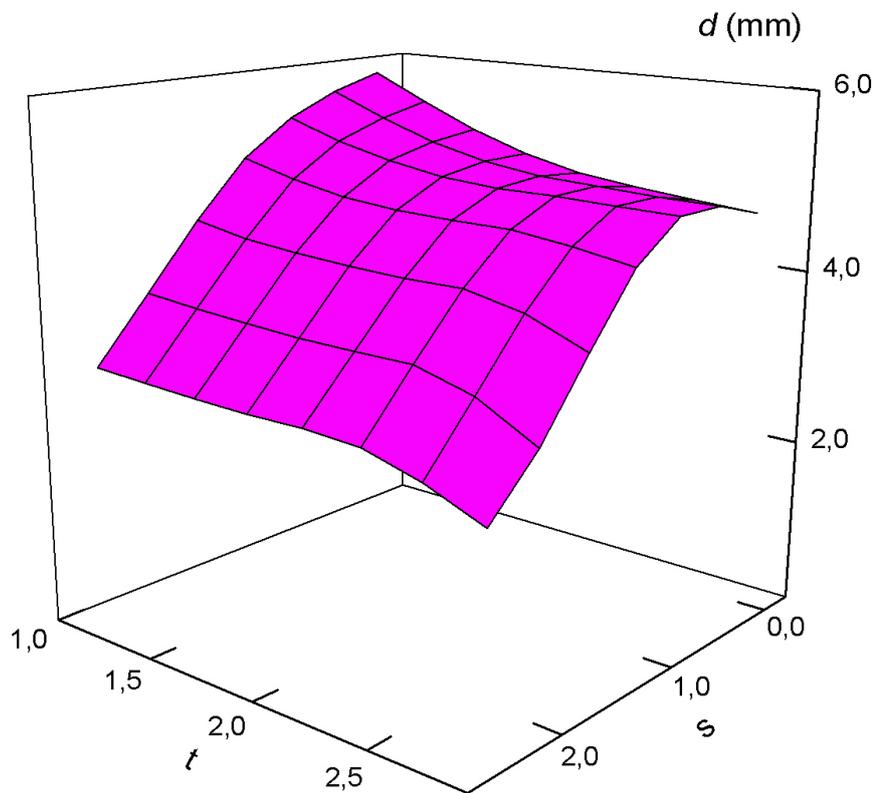


Figura. 3.2 Diámetro pupilar del sujeto, para el logaritmo de las cuatro luminancias del test y para las cuatro luminancias del entorno.

La observación más llamativa que puede extraerse de la figura 3.2, lo representa la variación tan acusada que sufre el tamaño pupilar al variar las condiciones de iluminación, pasando desde unos 2 mm a prácticamente 6 mm en bajas luminancias.

Otro punto de interés es la información que muestra dicha figura sobre el comportamiento funcional de un observador, cuyo diámetro pupilar está más condicionado por la luminancia del entorno que por la del test.

Para poder analizar con más detalle la figura anterior y obtener información cuantitativa de dichos valores, se van a mostrar dos figuras que representan perspectivas diferentes de la figura tridimensional. La primera (figura 3.3) representa el tamaño pupilar en función del logaritmo de la luminancia del entorno para las cuatro condiciones de luminancia del test. La segunda (figura 3.4) muestra el diámetro pupilar, en mm, en función del $\log(L_T)$ para las cuatro condiciones de luminancia del entorno.

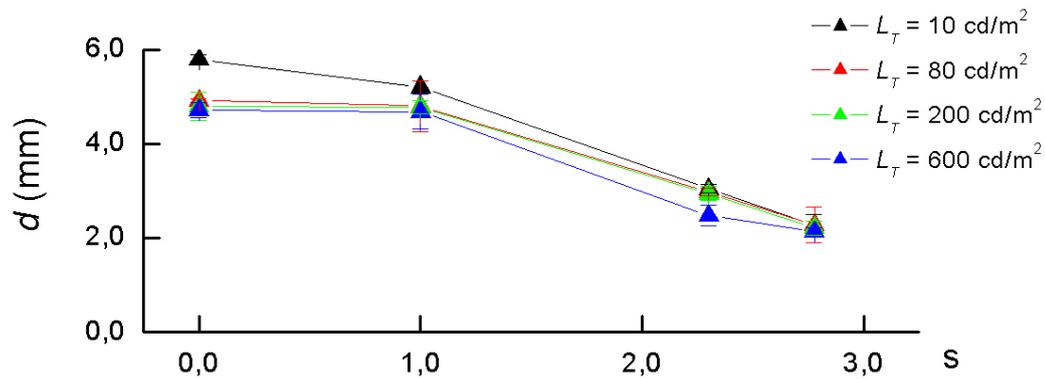


Figura 3.3 Diámetro pupilar del sujeto en función del $\log(L_s)$ para todas las condiciones de luminancias del test.

Se puede observar cómo en la figura 3.3, el diámetro de la pupila no sufre variaciones al pasar de un entorno oscuro a 10 cd/m^2 ($s = 1.0$) independientemente de la luminancia del test, excepto cuando ésta adquiere un valor de 10 cd/m^2 , donde se muestra un ligero descenso. A partir de dicha luminancia del entorno se obtiene un tamaño de pupila diferente que, como cabe esperar, se irá reduciendo a medida que aumenta s alcanzándose en todos los casos un diámetro pupilar próximo a 2.0 mm para 600 cd/m^2 de luminancia del entorno. De hecho, a partir de $L_s = 10 \text{ cd/m}^2$, el valor de la pupila parece no depender de L_T .

En la figura 3.4, se aprecia de forma más evidente que en la figura 3.2 que al aumentar t se generan cambios menores y muy sutiles, casi despreciables en el diámetro pupilar al mantener constante la luminancia del entorno. Es decir, parece que la luminancia del test prácticamente no influye en el diámetro pupilar del sujeto analizado.

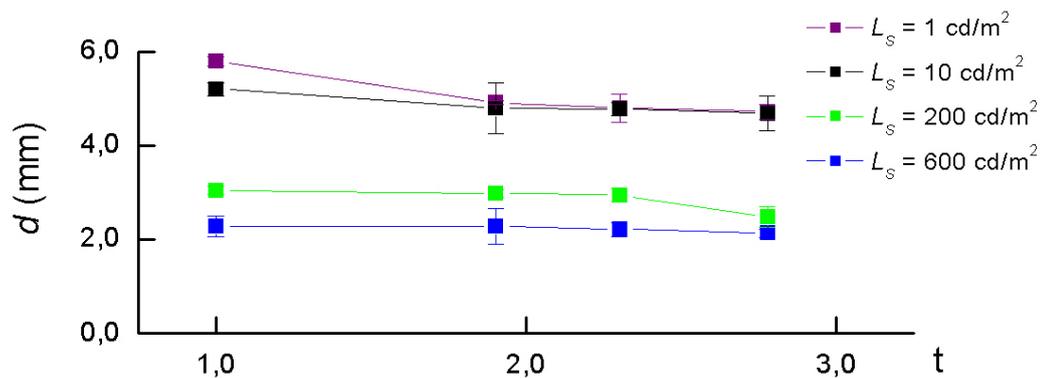


Figura 3.4 Diámetro pupilar del sujeto en función del $\log(L_t)$ para las cuatro condiciones de luminancias del entorno.

Después de haber estudiado el diámetro pupilar en función de las dos variables consideradas se puede concluir que el parámetro más influyente en el tamaño de la pupila es la luminancia del entorno.

3.3.2. Análisis de la influencia de la luminancia del entorno y del test en el log (CS)

En la figura 3.5 se han representado, los valores del logaritmo de las sensibilidades al contraste de letras de los ojos analizados, para cada luminancia del entorno (L_S) y para cada una de las cuatro condiciones en las que fue iluminado el test (L_T) en este experimento. Los datos mostrados son el resultado obtenido sin ningún tipo de tratamiento, es decir, resultados originales. La figura se ha simplificado con el fin de facilitar la interpretación de la misma. En vez de incorporar los 35 ojos analizados se han incluido únicamente los cinco que presentan la mayor y menor sensibilidad al contraste en promedio, así como los tres cuartiles.

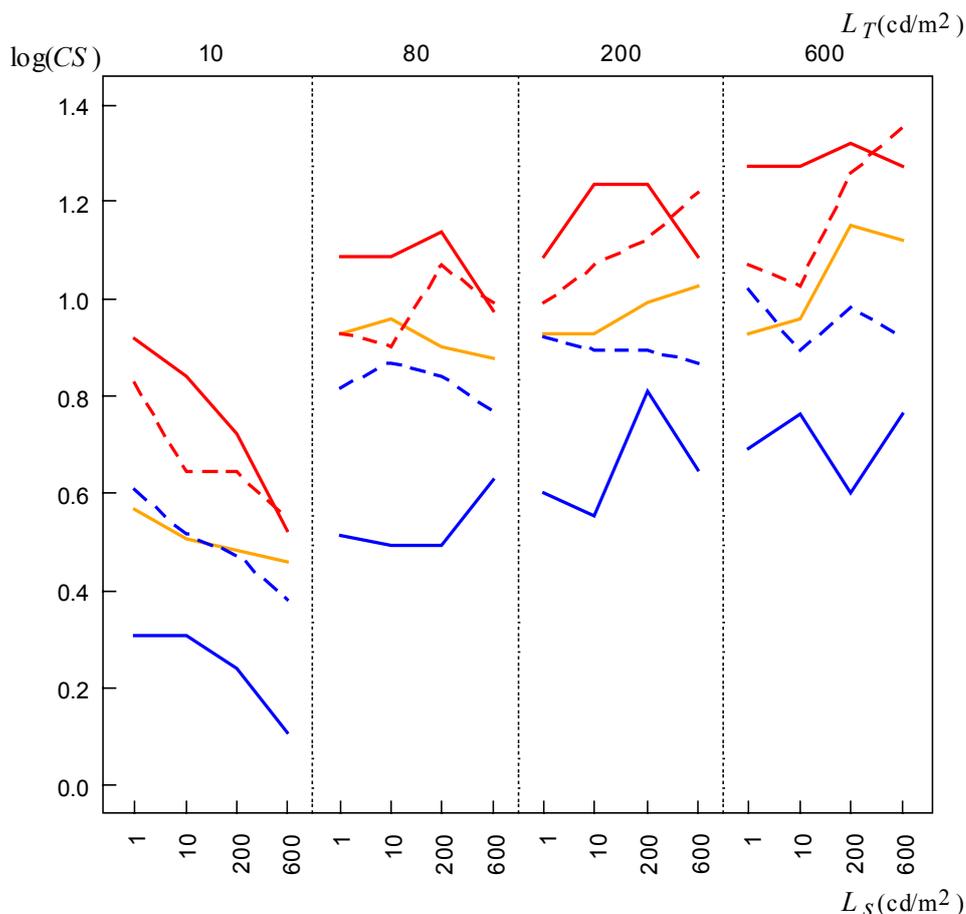


Figura 3.5 Resultados individuales de la influencia de la luminancia del entorno, L_S , sobre la función de sensibilidad al contraste para los distintos valores de luminancia del test, L_T . Con línea roja y azul se representan los ojos de mayor y menor sensibilidad al contraste en promedio, y con líneas discontinuas y amarilla los tres cuartiles.

Lo primero que se observa en la figura es un aumento del logaritmo de la sensibilidad al contraste a medida que aumenta L_T . Por otro lado, para cada individuo y para cada luminancia del test, el log (CS) es diferente para distintas luminancias del entorno. Dicho comportamiento no denota una tendencia determinada al observar la CS de los ojos de los sujetos de forma individual, pero en cambio sí que se puede apreciar una influencia de la L_S en la sensibilidad al contraste, influencia que posteriormente se analizará con más detalle.

Se observa que el ojo del sujeto con menor CS , mostrado con una línea de color azul, para una luminancia del test seleccionada, sigue siendo el que presenta la menor sensibilidad al contraste para todas las demás luminancias del test. Mientras que el que presenta mayor CS , representado en una línea de color rojo, lo manifiesta para cada una de las luminancias del test consideradas en el trabajo. Esto indica que los resultados de sensibilidad al contraste medidos en condiciones diferentes en cada ojo no se pueden considerar sucesos independientes. En conclusión, el modelo que se ajuste a estos datos tendrá que contemplar esta peculiaridad a la que habrá que añadir, la influencia que ejerce tanto la L_T , como la L_S así como la interacción entre ambas ($L_T \leftrightarrow L_S$).

Desde un punto de vista estadístico y para poder valorar la influencia de los factores que intervienen se ha ajustado un modelo lineal mixto que tiene la siguiente expresión:

$$\log(CS)_{oL_T L_S} = \alpha + \beta_{L_T} + \gamma_{L_S} + \delta_{L_T \leftrightarrow L_S} + b_o + \varepsilon_{oL_T L_S} \quad (3.1)$$

que recoge como *parámetros fijos* β_{L_T} , γ_{L_S} y la interacción $\delta_{L_T \leftrightarrow L_S}$ y como *efecto aleatorio* se ha considerado el ojo del individuo (b_o), que añade una ordenada en el origen, es decir, cada uno de los individuos sigue, en general, la misma tendencia que la ajustada por el modelo pero elevando o disminuyendo el valor promedio estimado, en función de sus características visuales intrínsecas. El último parámetro $\varepsilon_{oL_T L_S}$ es el término de error propio de cualquier modelo estadístico.

A continuación se muestran los valores de los factores considerados *fijos* en el modelo y la distribución y varianza asociada a cada uno de los *efectos aleatorios*:

L_T = luminancia del test, en cd/m^2 (10, 80, 200 y 600)

L_S = luminancia del entorno, en cd/m^2 (1, 10, 200 y 600)

o = ojos de los individuos (1,..., 35)

b_o = efecto aleatorio introducido por los ojos del individuo ($b_o \rightarrow N(0, \sigma_o^2)$)

$\varepsilon_{oL_T L_S}$ = término de error del modelo estadístico ajustado ($\varepsilon_{oL_T L_S} \rightarrow N(0, \sigma_{oL_T L_S}^2)$)

La varianza de los valores observados de $\log(CS)$ en las 16 condiciones de iluminación la podríamos descomponer en la varianza debida al efecto del ojo del individuo más la varianza residual, las cuales son 0.118 y 0.0038 respectivamente. También se ha analizado la interacción ($\delta_{L_T \leftrightarrow L_S}$) comprobando que es estadísticamente significativa ($p < 0.0001$). Es decir, efectivamente el efecto de la luminancia del entorno es distinto para cada luminancia del test.

Para poder tener una valoración cualitativa y general del comportamiento promedio de la sensibilidad al contraste de los ojos de los sujetos, se ha representado la figura 3.6 donde se muestra el valor promedio del $\log(CS)$ de los 35 ojos estudiados en función del \log de la luminancia del test y del entorno.

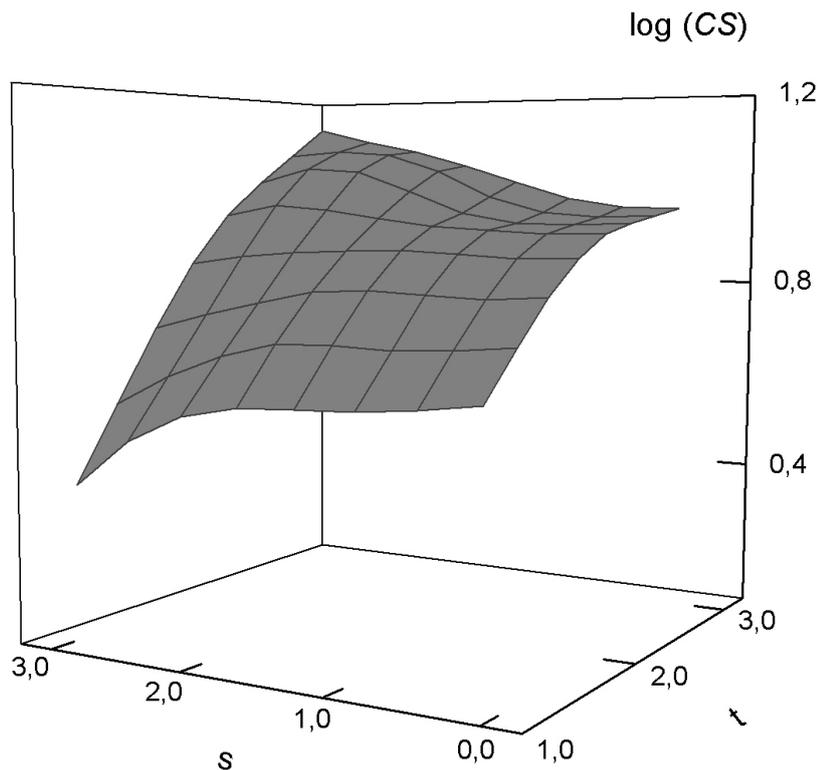


Figura 3.6 Influencia simultánea de s y de t sobre el logaritmo de la sensibilidad al contraste para un tamaño angular de letra de $\phi = 4.03'$

En la figura 3.6 se puede observar que para un único tamaño angular de letra ($\phi = 4.03'$), el resultado en la medida de la sensibilidad al contraste no es un valor fijo y único, sino que depende tanto de la luminancia empleada en el test como de la luminancia del entorno circundante al mismo. Dicha medida puede variar prácticamente en un factor 3 dependiendo sólo de las condiciones ambientales de iluminación.

También se puede observar cómo, en general, la luminancia del test parece tener más influencia en el $\log(CS)$ que la luminancia del entorno, donde las variaciones son menos notables. En todo caso, la figura 3.6 muestra que la CS , para un mismo único tamaño de letra está sujeta no sólo a la influencia de la luminancia del entorno y a la del test, sino también a la interacción entre ambas, aspecto ya revelado por la fuerte significación estadística. Es decir, la dependencia funcional del $\log(CS)$ con t es distinta para cada s .

Para poder valorar de forma cuantitativa dicha influencia se han realizado dos secciones de la figura tridimensional anterior proporcionando información desde dos puntos de vista. Primero se muestra la gráfica 3.7 dónde se representa los valores medios obtenidos para el logaritmo de la sensibilidad al contraste en función del logaritmo de la luminancia del entorno, para las cuatro luminancias del test considerado.

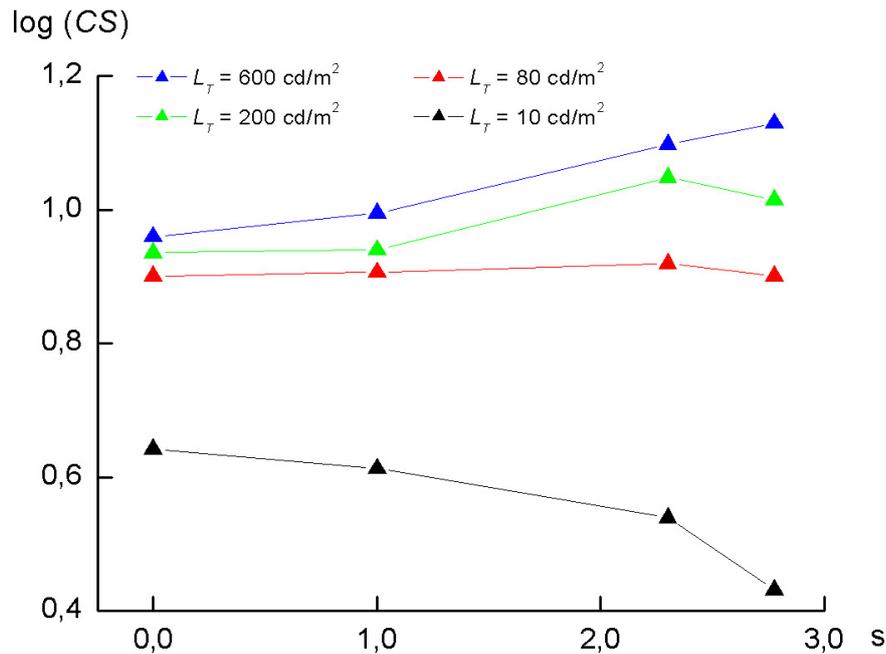


Figura 3.7 Logaritmo de la sensibilidad al contraste en función del logaritmo de la luminancia del entorno (s) para las cuatro luminancias del test consideradas.

La información proporcionada por la figura 3.7 sobre la influencia de la luminancia del entorno sobre el log de la sensibilidad al contraste, indica que dicha influencia es diferente para cada luminancia del test, observándose un comportamiento que podría considerarse opuesto para la máxima y la mínima luminancia del test. Mientras que para $L_T = 600 \text{ cd/m}^2$ el $\log(CS)$ aumenta con el incremento de la L_S , para $L_T = 10 \text{ cd/m}^2$ el efecto que ejerce la luminancia del entorno sobre el $\log(CS)$ es el contrario, observándose en este caso una reducción. Un aspecto que llama la atención es cómo para 10 cd/m^2 de luminancia del test, el $\log(CS)$ siempre se encuentra por debajo del resto, en todas las luminancias del entorno.

Otra observación a destacar es que si consideramos cada una de las cuatro curvas mostradas en la figura 3.7 se observa que el máximo para cada una de ellas parece alcanzarse cuando la diferencia entre la luminancia del entorno y del test es mínima.

Pero quizás el aspecto más relevante de todos los mostrados en la gráfica 3.7, es que frente a un test cuya luminancia es de 80 cd/m^2 , luminancia recomendada para los test de AV según la normativa americana, la variación en la luminancia del entorno parece no ejercer efecto alguno sobre la medida del $\log(CS)$.

La figura 3.8 nos aporta la misma información que la figura anterior pero desde una perspectiva diferente. En ella se hace más evidente la información que se intuía en las figuras anteriores y que, aunque ya se ha mencionado, es de gran relevancia en la medida de la sensibilidad al contraste. En dicha figura se ha representado el $\log(CS)$ en función de t para las cuatro luminancias del entorno con las que se ha trabajado en el estudio y se observa cómo para una luminancia del test de 80 cd/m^2 los resultados de la sensibilidad al contraste son los mismos independientemente de la luminancia del entorno.

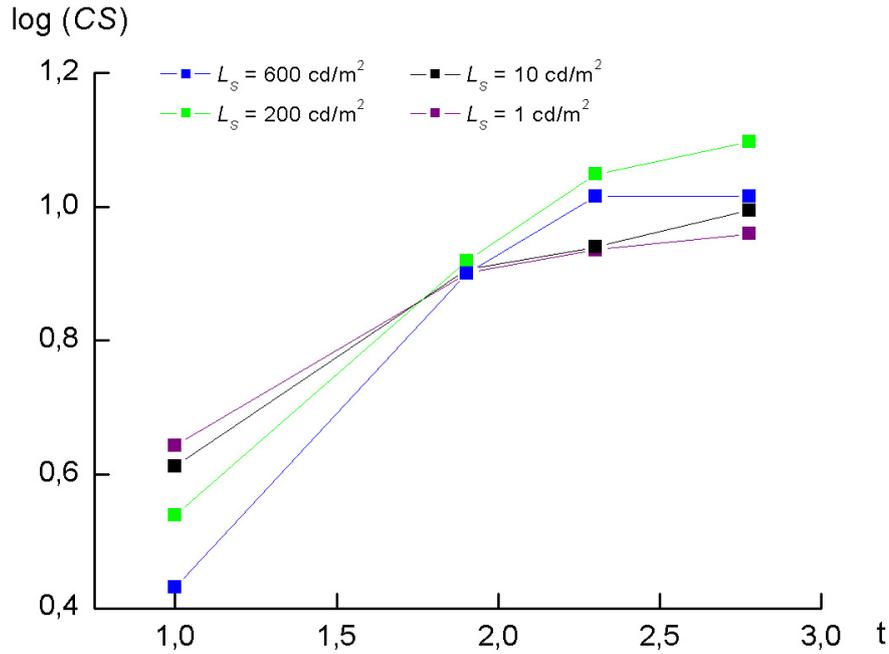


Figura 3.8 Logaritmo de la sensibilidad al contraste en función del logaritmo de L_T para las cuatro luminancias del entorno consideradas.

También se puede observar que para cualquiera de las condiciones de luminancia del entorno, el $\log(CS)$ aumenta a medida que lo hace la L_T , aspecto que ya ha sido descrito en la literatura (Blackwell, 1946; de Valois et al., 1974; Kelly, 1977; Banks et al., 1987; Sucs and Uvijls, 1992; Puell et al., 2004). Dicho $\log(CS)$ puede adquirir valores que van desde unos 0.40, para una $L_S = 600 \text{ cd/m}^2$ y una $L_T = 10 \text{ cd/m}^2$, hasta aproximadamente 1.10 cuando la luminancia del test y del entorno coinciden en 600 cd/m^2 . Estos resultados pueden relacionarse con los encontrados en la literatura en el trabajo de Blackwell en 1946, donde se valoraba la sensibilidad al contraste en una gran variedad de condiciones experimentales. Blackwell muestra resultados similares a los encontrados en nuestro experimento para baja luminancia del test, resultados que se atribuyen (Van Nes and Bouman, 1967) a aspectos neuronales por los que el sistema visual se adapta a los cambios de luminancia foveal.

Con el fin de analizar en más profundidad este resultado, se ha calculado cuánto varía, para cada luminancia del test y siempre respecto a la situación de entorno oscuro, el logaritmo de la sensibilidad al contraste a medida que se incrementa la luminancia del entorno. Dichas variaciones, $\Delta \log(CS)$, se han representado en función del logaritmo de la luminancia del entorno en la figura 3.9

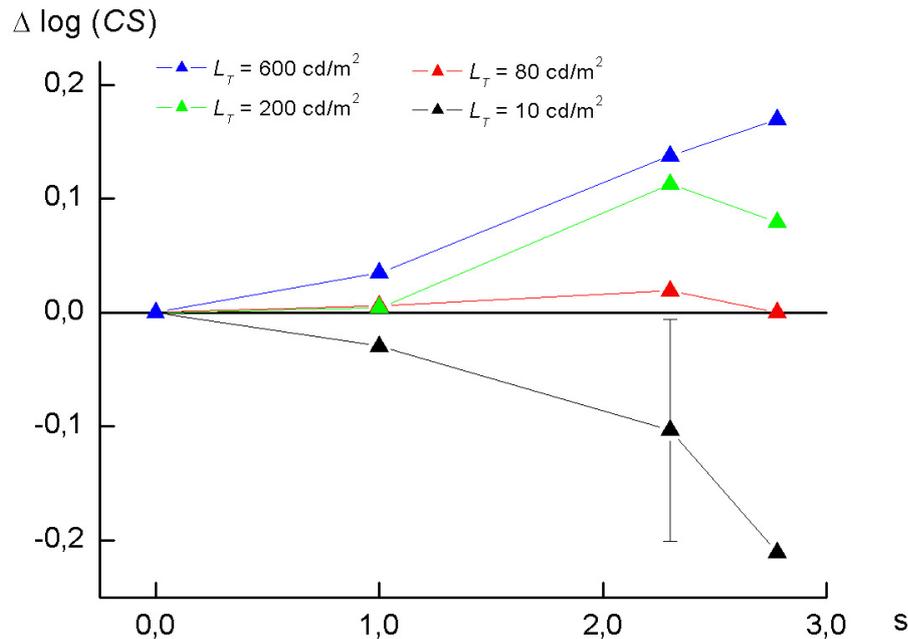


Figura 3.9 Variación del logaritmo de la sensibilidad al contraste respecto a su valor con entorno oscuro en función del logaritmo de la luminancia del entorno. Se muestran las curvas para las cuatro luminancias del test. consideradas.

Esta figura representa el efecto global de un incremento de la luminancia del entorno en la sensibilidad al contraste de letras de tamaño angular $4.03'$, respecto a su valor medido para $s = 0$ (condiciones de oscuridad en el entorno), para distintas luminancias del test. Basado en el modelo ajustado 3.1, para una confianza del 95%, el intervalo de confianza con corrección de Bonferroni para $n = 12$, para el $\Delta \log (CS)$ es de ± 0.0487 . Estos intervalos de confianza vienen indicados en la figura 3.9 por la correspondiente barra vertical que se ha representado en el valor de $\Delta \log (CS)$ correspondiente a una $L_T = 10 \text{ cd/m}^2$ y $L_S = 200 \text{ cd/m}^2$. Hay que tener en cuenta que las barras de error son las mismas para todos los valores, aunque para evitar solapamientos y confusión en la gráfica se ha representado en una única situación.

La observación de la figura permite destacar varios aspectos relevantes, el primero de todos es que la tendencia observada en el $\Delta \log (CS)$ para las cuatro condiciones del test es diferente. Es decir, el efecto de la luminancia del entorno sobre el $\Delta \log (CS)$ es distinto para las distintas condiciones de luminancia del test. Mientras que para 80, 200 y 600 cd/m^2 , los valores de $\Delta \log (CS)$ adquieren siempre un valor positivo, para una $L_T = 10 \text{ cd/m}^2$ es negativo.

Al analizar de forma independiente cada una de las cuatro curvas mostradas en la gráfica, se puede observar cómo con una iluminación del test de 10 cd/m^2 , límite entre la visión fotópica y mesópica, el incremento de la luminancia del entorno produce un descenso en la sensibilidad al contraste. A medida que aumenta dicha luminancia, el empeoramiento es más acusado. Este hecho puede ser debido, en parte, a que la pupila se contrae generando dos efectos contrapuestos. Por un lado mejora la calidad de la imagen retiniana debido a la disminución de las aberraciones

ópticas. Hay por tanto una mejora en la *MTF*. En contraposición, el efecto producido por la luminancia de velo al aumentar la luminancia del entorno es más acusado, lo que provoca que la función visual disminuya. Parece por tanto, que el efecto más determinante, en esta situación, es la luminancia de velo generada por el deslumbramiento. Se puede observar también, que es en esta situación donde se encuentra la mayor diferencia en el log (*CS*) respecto de la condición de oscuridad, que adquiere un valor de 0.20 unidades logarítmicas, es decir 8 grupos de letras en el test que ha sido diseñado para el experimento y algo más de 1 grupo si se hubiera empleado el test de sensibilidad al contraste de Pelli-Robson.

Respecto a la otra situación más extrema de las elegidas para el experimento, esto es, una luminancia del test de 600 cd/m^2 , se observa un comportamiento opuesto, en cierto modo, al que se produjo con el test a una luminancia de 10 cd/m^2 . Se aprecia una sensibilidad al contraste creciente con la luminancia del entorno. La causa de este buen comportamiento puede ser la reducción del tamaño pupilar. Se minimizan las aberraciones ópticas y por tanto mejora la calidad de imagen retiniana. Por otro lado, el efecto del velo es menor para $L_T = 600 \text{ cd/m}^2$ porque la reducción del contraste que se produce en la letra viene determinado por el factor $1 + L_V / L_T$, de manera que aunque L_V sea alto, dicho factor de reducción de contraste será menor por el efecto de un alto valor de L_T . El balance entre la miosis pupilar y la luminancia de velo, en este caso, resulta un constante crecimiento de la sensibilidad al contraste.

En cuanto a la situación intermedia en la que el test se encuentra a 200 cd/m^2 , se observa un primer tramo en que la sensibilidad al contraste asciende cuando la luminancia del entorno crece de 1 cd/m^2 a 200 cd/m^2 . A partir de este punto hay una ligera tendencia a la pérdida de sensibilidad al contraste a medida que aumenta la iluminación ambiental, reproduciendo el comportamiento observado en el capítulo 2 de esta memoria.

Finalmente tenemos la situación del test iluminado a 80 cd/m^2 . Bajo estas condiciones de iluminación del test de letras se observan variaciones muy pequeñas de la sensibilidad al contraste; se puede decir que esta permanece invariante frente a cambios en la iluminación del entorno entre 1 y 600 cd/m^2 , y que dicha invarianza es estadísticamente significativa. De la figura 3.9 hay que destacar las dos situaciones en las que el log (*CS*) con respecto al entorno de oscuridad presenta diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-valor} < 0.005$), que son aquellas que muestran 10 y 600 cd/m^2 de L_T , siempre que el entorno adquiera valores superiores a 10 cd/m^2 .

Teniendo en cuenta que, además, con el test a 80 cd/m^2 la sensibilidad al contraste se mantiene en valores elevados, éstas son las condiciones que, a priori, serían recomendables en la medida de la sensibilidad al contraste en la práctica clínica. Esta independencia del log (*CS*) respecto de la luminancia del entorno cuando el test está a 80 cd/m^2 , permitiría comparar las pruebas de sensibilidad al contraste realizadas durante el seguimiento de una patología o simplemente en revisiones periódicas, aunque es cierto que no son las condiciones en las que se obtiene un log (*CS*) máximo.

3.3.3. Interpretación de los resultados

Una vez analizada la influencia de las variaciones de la L_S y L_T sobre el diámetro pupilar en la primera parte de esta sección, y de la influencia de las dos variables consideradas en el trabajo, L_S y L_T sobre el log (CS) en la segunda parte, se va a proceder a interpretar los resultados obtenidos.

Como complemento final se va a diseñar un modelo matemático de sensibilidad al contraste, de naturaleza psicofísica, en el que se van a encontrar involucrados tres parámetros: diámetro de la pupila, luminancia de velo y adaptación neuronal. Para el desarrollo de dicho modelo, se irá analizando, paso a paso, cada uno de los componentes que lo integran. Por otro lado y para poder apreciar de forma más evidente la influencia de cada uno de ellos en la medida de la sensibilidad al contraste, siempre tomaremos como referencia las condiciones de mínima luminancia con la que hemos trabajado, bien en el entorno, $s = 0$, bien en el test, $t = 1$, ó bien en ambos casos.

Aspectos ópticos que influyen en el $\Delta \log (CS)$

a.- Luminancia de velo

Con el fin de sopesar qué parte de los resultados de la medida de la sensibilidad al contraste puedan estar justificados por el velo generado por el deslumbramiento, según la expresión de Adrián y Topalova, se ha representado la figura 3.10.

Dicha figura, muestra el $\Delta \log (CS)$ en función de la luminancia del entorno respecto del entorno de oscuridad. Se han representado los resultados experimentales obtenidos por nuestro grupo de trabajo y los cálculos teóricos al considerar la luminancia de velo, según la expresión de Adrian y Topalova. Por último, en la figura 3.10, se ha incluido la diferencia entre nuestros resultados y los calculados según la expresión ya comentada. Todo ello para las cuatro luminancias del test con las que se ha trabajado en el experimento.

La primera consideración a tener en cuenta al observar estas gráficas es cómo, para todas las luminancias del test consideradas, a medida que la luminancia del entorno se incrementa, la diferencia entre nuestros resultados y los calculados según la expresión de Adrian y Topalova es siempre positiva y tiende a aumentar. Dichas diferencias son más acusadas para bajas luminancias del test ($L_T = 10 \text{ cd/m}^2$).

Otro aspecto a tener en cuenta es que las menores diferencias entre nuestros resultados y los calculados se producen para una luminancia del test de 80 cd/m^2 , situación en la que se ha constatado una invarianza del log (CS) con la luminancia del entorno.

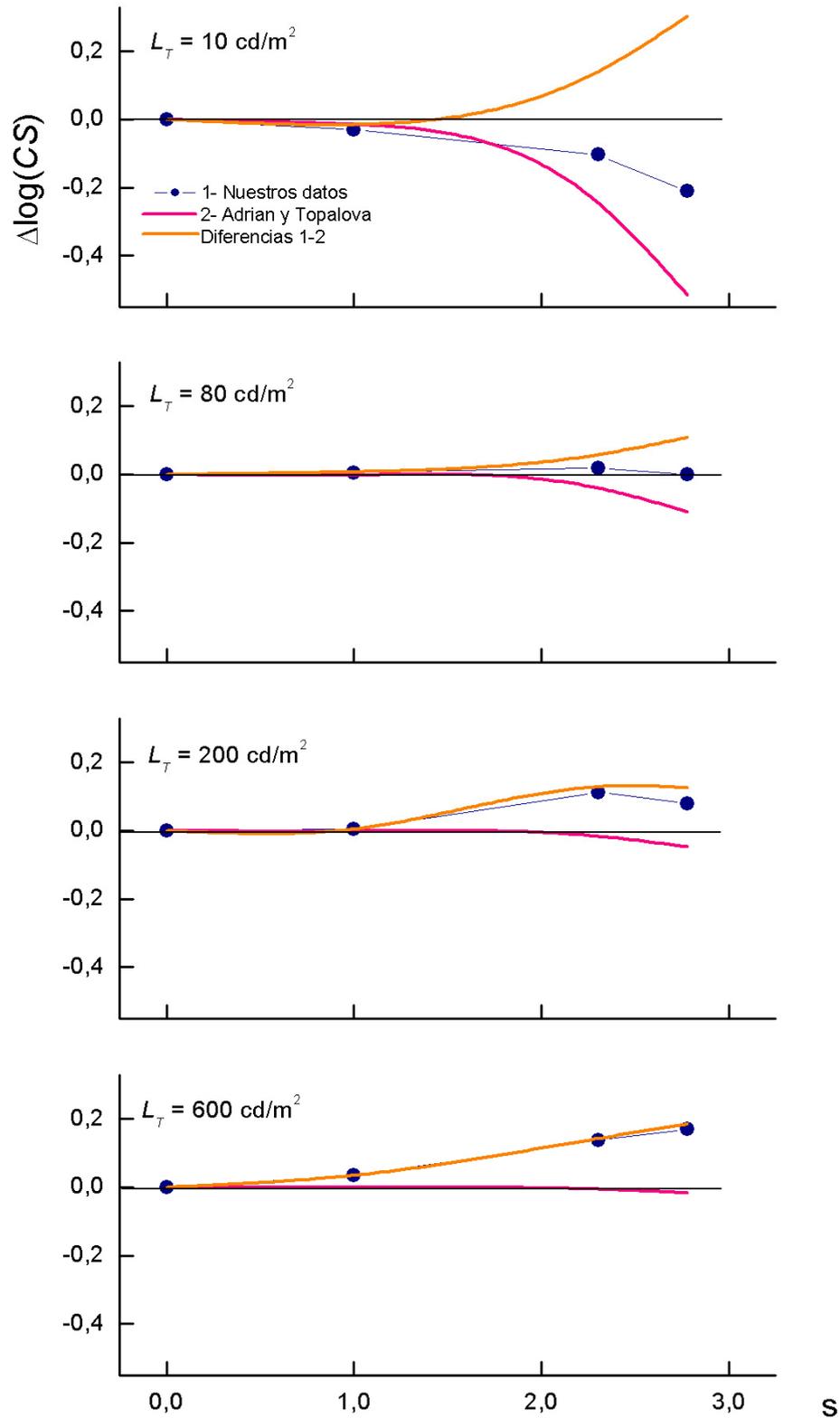


Figura 3.10 Variación del $\log(CS)$ respecto al entorno oscuro en función de s . Se muestran nuestros datos experimentales, las predicciones teóricas considerando L_T , según la expresión de Adrian y Topalova y las diferencias entre ambos resultados. Todo ello para las cuatro luminancias de test.

Si únicamente se tuviera en cuenta la luminancia de velo, los resultados de $\Delta \log (CS)$ serían menores, pero entra en juego otro elemento que contrarresta el efecto producido por dicha L_V , que aparece con el aumento de la luminancia, que ejerce un efecto positivo sobre la sensibilidad al contraste y que, en base al experimento explicado en el capítulo anterior, podría ser debido a la miosis de la pupila.

Finalmente, de la interpretación de la figura 3.10, se podría concluir que el efecto provocado por la luminancia de velo sobre el $\Delta \log (CS)$, no puede justificar, por sí sólo, los resultados experimentales obtenidos. Dicha carencia es más acusada en luminancias del test bajas ($L_T = 10 \text{ cd/m}^2$) y a medida que la luminancia del entorno (L_S) aumenta.

b.- Asociación de la luminancia de velo y el diámetro pupilar

No obstante, existe un parámetro físico que puede intervenir contrarrestando el efecto de la luminancia de velo, el diámetro de la pupila, d . A continuación se va a comprobar el papel que juegan las variaciones de d , (Δd), sufridas con los cambios de luminancia respecto de sus valores para $s = 0.0$. También se comprobará si dichas variaciones son capaces de justificar las diferencias encontradas entre los datos experimentales del $\Delta \log (CS)$ y los calculados considerando la luminancia de velo debida al deslumbramiento respecto del entorno de oscuridad, observados en la figura 3.10.

A priori, puede parecer un tanto presuntuoso el intentar asociar las diferencias de los resultados de $\Delta \log (CS)$ no explicados por la luminancia de velo con la Δd de un único sujeto. Incluso teniendo en cuenta que dichos tamaños pupilares sean los promedios de cinco medidas bajo cada una de las 16 condiciones de luminancia empleadas en el experimento. No obstante hay que considerar varios aspectos:

a.- En primer lugar, la sincinesia acomodación convergencia y tamaño pupilar están bien establecidos, nosotros hemos eliminado estos efectos compensando la ametropía de los sujetos y realizando las medidas bajo condiciones monoculares siempre a la distancia de 5.2 m.

b.- En segundo lugar, hay características como el género o error refractivo, que no parecen afectar al tamaño pupilar al variar la luminancia (Win et al., 2005), pero sí la edad de los sujetos, aspecto que en nuestro trabajo ha de ser descartado por ser todos jóvenes de entre 19 y 25 años de edad. Por otro lado, el criterio de inclusión de los participantes en el estudio, excluyó aquellos que presentaban enfermedades oculares y/o sistémicas identificadas que pudieran generar variaciones en los valores observados.

c.- En último lugar, el tamaño pupilar medido en un único sujeto, está en la línea de los resultados previos encontrados en la literatura (de Groot and Gebhard, 1952; Stanley and Davies, 1995; Vizmanos et al., 2004), lo cual garantiza que aunque no se puedan considerar como valores absolutos del promedio de los sujetos, puede informar sobre la tendencia marcada.

La figura 3.11 representa las variaciones no explicadas del $\Delta \log (CS)$ por el deslumbramiento (línea naranja en la figura 3.10) respecto a las variaciones del diámetro pupilar $\Delta d (s, t)$ definido como $d (s, t) - d (0, t)$.

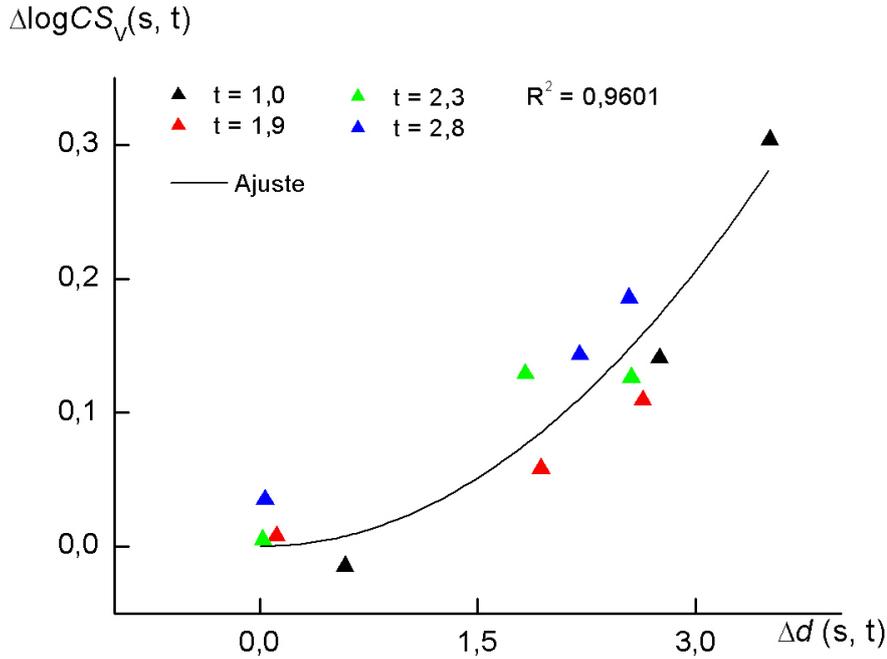


Figura 3.11 $\Delta \log (CS)$ no justificado por la luminancia de velo en función del $\Delta d (s, t)$, todo ello respecto del entorno oscuridad. Ajuste parabólico de los datos obtenidos para todas las condiciones de luminancia del test.

La figura 3.11 muestra que a medida que la diferencia de tamaño pupilar respecto del entorno de oscuridad aumenta, la diferencia entre el $\Delta \log (CS)$ de nuestros resultados y de los obtenidos por la luminancia de velo, debida al deslumbramiento, también se incrementa. Se obtiene una asociación entre ambos parámetros de tipo parabólica. Es decir, parece plausible que la variación del $\Delta \log (CS)$ no explicada por la luminancia de velo, según la expresión de Adrian y Topalova, que se observaba en la figura 3.10, sea debido a la miosis pupilar. Dicha miosis mejora la *MTF* del ojo, reduciendo las aberraciones y aumentando la calidad visual y por tanto la sensibilidad al contraste.

Aspectos neuronales

Volviendo a la figura 3.4, donde se ha representado el diámetro pupilar del sujeto en función de t para las cuatro condiciones de luminancias del entorno, parece deducirse que para una L_S dada, los cambios en el tamaño de la pupila con t deben ser despreciados. Y sin embargo, si recordamos la figura 3.6, en la que se ha representado la influencia simultánea de los logaritmos de L_S y de L_T sobre el $\log (CS)$, se observan variaciones en la sensibilidad al contraste al modificar t para cualquier entorno considerado. Merece la pena destacar que al realizar un cálculo sencillo a partir de la gráfica anterior, tomando como referencia un entorno de oscuridad, este revelará que la parte del $\Delta \log (CS)_{s=0}$ debido a las variaciones de la pupila (Δd) al pasar de 10 a 600 cd/m^2 de luminancia del test, son de un 8.5%. Para un entorno constante de oscuridad, al aumentar la luminancia del test desde 10 a 600 cd/m^2 , también la luminancia de velo debido a la contribución del primer anillo, según el cálculo de Adrian y Topalova, revela una variación del $\Delta \log (CS)_{s=0}$,

siendo en el mayor de los casos, de tan solo del 0.5%. Es decir, más del 90% del $\Delta \log (CS)$ debido al incremento de la luminancia del test para un entorno oscuro no se debe a los aspectos ópticos comentados con anterioridad. Partiendo de esta situación, si se representa el logaritmo de la sensibilidad al contraste en función del logaritmo de la luminancia del test para un entorno de oscuridad (en la figura 3.8 corresponde al cuadrado con línea de color morado), y a partir de ella se calcula el $\Delta \log (CS)_{s=0}$, tomando como referencia su valor a $L_T = 1.0$ se obtiene la siguiente figura:

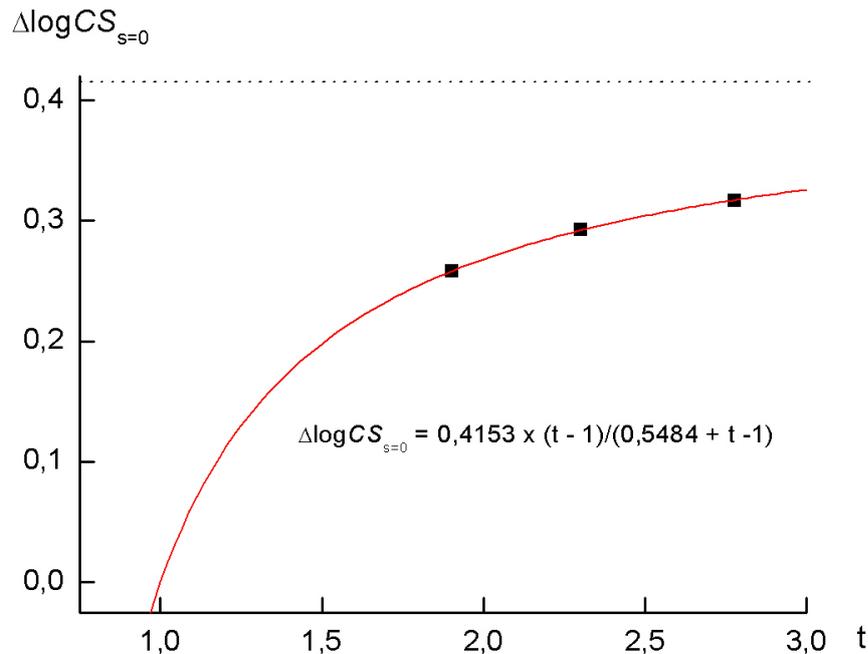


Figura 3.12 Variación de la sensibilidad al contraste, para un entorno oscuro en función del logaritmo de la luminancia del test tomando como referencia $L_T = 10 \text{ cd/m}^2$.

En esta figura se observa cómo para un entorno de oscuridad, al aumentar la luminancia del test, aumenta la variación de la sensibilidad al contraste, alcanzando un valor de 0.32 unidades logarítmicas, para un $t = 2.8$. En la gráfica se ha incluido el ajuste de los datos experimentales a la función de Michaelis-Menten.

Blackwell, en 1946, llevó a cabo un trabajo en el que estudió la sensibilidad al contraste en unas condiciones experimentales muy amplias. Determinó los umbrales de contraste a nueve sujetos, en un rango de luminancias del test que iban desde 3 hasta 3426 cd/m^2 , se realizaron un total de 450000 observaciones, todas ellas con pupila natural y con distintos tamaños del test, desde $121'$ hasta $3.60'$. Blackwell para un tamaño de test de $3.60'$, similar al empleado en nuestro experimento, determinó que los $\Delta \log (CS)$ para variación en la luminancia del test desde $s = 1$ hasta $s = 2.7$ eran de 0.30 unidades logarítmicas, valor aproximado al observado en nuestra gráfica. La explicación aportada por Blackwell y confirmada por otros trabajos posteriores es que un incremento de la luminancia que rodea al optotipo induce un cambio en el estado de adaptación del sujeto siendo esta la razón del incremento en la sensibilidad al contraste, es decir, los cambios apreciados en la figura se deben a la adaptación de origen neuronal.

Expresión del modelo psicofísico ajustado

Como se ha visto en las secciones precedentes, las variaciones del logaritmo de la sensibilidad al contraste en función de las luminancias del entorno y del test son muy significativas dentro del amplio rango de valores de ambas variables que han sido consideradas en este trabajo. Una vez analizadas las causas físicas y fisiológicas que condicionan dichas variables, resulta relativamente sencillo modelizar matemáticamente la función log (CS) en función de L_S y L_T (o de sus logaritmos) para un tamaño de letra de 4.03'. A partir de la condición de referencia comentada al comienzo de la sección 3.3.3, de mínima luminancia del entorno y del test, el log (CS) estará condicionado, por las variaciones ocasionadas por factores neurológicos a las que se añaden las variaciones debidas a factores ópticos, diámetro pupilar y luminancia de velo. Entonces, podemos escribir:

$$\log CS(s, t) = \log CS(0,1) + \Delta \log CS_{s=0}(t) + \Delta \log CS(s, t) \quad (3.2)$$

donde el primer término de la expresión, $\log CS(0, 1)$, corresponde al log (CS) para un entorno oscuro y un test que presenta una luminancia de 10 cd/m². El segundo término, $\Delta \log CS_{s=0}(t)$ representa la variación del logaritmo de la sensibilidad al contraste con el logaritmo de la luminancia del test para una luminancia de entorno de 1 cd/m². Como vimos en la sección *aspectos neuronales*, el $\Delta \log CS_{s=0}(t)$ refleja fundamentalmente los aspectos neuronales vinculados a la capacidad de adaptación del sistema visual humano a cambios en la luminancia foveal. Dicha función podía ajustarse, para el rango de valores $1.0 < t < 2.78$, y en las condiciones experimentales utilizadas en este trabajo, por el ajuste de la función de Michaelis-Menten:

$$\Delta \log CS_{s=0}(t) = 0.4153 \times (t - 1) / (0.5484 + t - 1) \quad (3.3)$$

ajuste que, como vimos anteriormente, en la figura 3.12, presenta para $b = 1.0$, un valor de 0.001, muy inferior a las variaciones medidas de $\Delta \log CS_{s=0}(t)$ con t .

En la expresión (3.2), $\Delta \log CS(s, t)$ da cuenta de las variaciones en el logaritmo de la sensibilidad al contraste en función del logaritmo de la luminancia del entorno para cada valor del logaritmo de la luminancia del test. Dicha función, como se razonó en las secciones anteriores, se puede suponer, con el fin de una modelización matemática psicofísica, el resultado aditivo de la contribución de los siguientes términos:

$$\Delta \log CS(s, t) = \Delta \log CS(\Delta d) + \Delta \log CS_V(s, t) \quad (3.4)$$

donde $\Delta \log CS(\Delta d)$ da cuenta de los incrementos observados en el logaritmo de la sensibilidad al contraste relacionados con la reducción del tamaño pupilar $\Delta d(s, t)$.

$$\Delta d(s, t) = d(0, t) - d(s, t) \quad (3.5)$$

con $d(0, t) = 5.80, 4.92, 4.78$ y 4.68 mm para $t = 1.00, 1.92, 2.30$ y 2.78 respectivamente. Como se ha visto anteriormente, la asociación existente entre $\Delta \log$

$CS(\Delta d)$ y $\Delta d(s, t)$ se puede reproducir por una función parabólica, la cual, forzada a tomar valor nulo para $\Delta d = 0$, toma la siguiente expresión matemática:

$$\Delta \log CS(\Delta d) = -0.00057\Delta d + 0.02308(\Delta d)^2 \quad (3.6)$$

válida en el rango $0.0 < \Delta d < 3.51$ mm. En cuanto al término $\Delta \log CS_V(s, t)$ de la expresión (3.4), dicho término da cuenta de las variaciones del logaritmo de la sensibilidad al contraste debidos al efecto de la luminancia de velo. Es decir, lo que en la figura 3.10, está definido por una línea de color rosa. Dicha contribución se puede poner en términos de la expresión de Adrian and Topalova, de la siguiente forma:

$$\Delta \log_t CS_V(s, t) = \log(1 + L_V(0, t)/10^t) - \log(1 + L_V(s, t)/10^t) \quad (3.7)$$

donde la luminancia de velo, expresada en cd/m^2 y calculada para nuestra configuración experimental a partir de la expresión de Adrian y Topalova en términos de s y t , toma la forma:

$$L_V(s, t) = 0.017608 (2.1855 \times 10^t + 0.6419 \times 10^t) \quad (3.8)$$

Para poder visualizar el ajuste del modelo psicofísico se muestra a continuación la figura 3.13, que no es más que la figura 3.7 en la que se han incluido los datos ajustados de nuestro modelo. Dicha gráfica representa el $\log(CS)$ en función del $\log(L_S)$ para todas las luminancias del test. Se ha utilizado el mismo código de colores que en las representaciones anteriores, diferenciando entre los datos experimentales identificados por triángulos cerrados frente a los datos obtenidos del ajuste del modelo psicofísico caracterizados por líneas continuas.

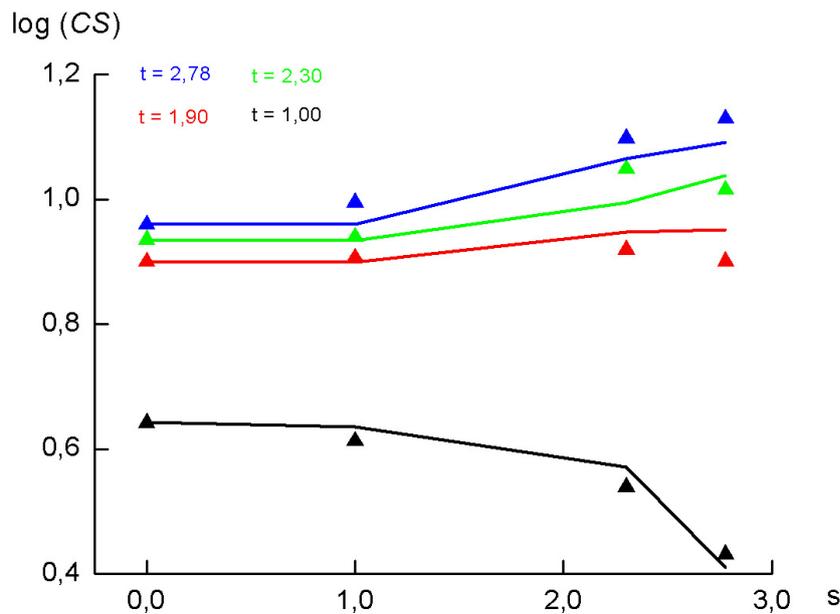


Figura 3.13 Logaritmo de la sensibilidad al contraste en función de s para las cuatro luminancias del test identificadas por códigos de colores. La línea continua corresponde a los datos del modelo psicofísico, los triángulos cerrados a los datos experimentales promedio de los sujetos.

Como se puede observar, el modelo psicofísico ajustado para un tamaño de optotipo de 4.03' y las condiciones de luminancia consideradas en este trabajo, se aproxima muy bien a los valores promedio obtenidos por los sujetos. Dicho modelo contempla los elementos que intervienen en la medida de la sensibilidad al contraste, por un lado elementos ópticos como luminancia de velo y diámetro pupilar y por otro, aspectos de tipo neuronal, que aparecen cuando la luminancia del test interviene en las medidas. El análisis estadístico revela que la desviación típica de los datos predicha por el modelo respecto de los datos experimentales es menor del 3%.

A lo largo del capítulo, se ha constatado una invarianza en el log (*CS*) para una luminancia del test de 80 cd/m², con la luminancia de entorno. En la figura 3.13 se observa cómo para dicha luminancia del test, los promedios de los datos experimentales y los ajustados por el modelo psicofísico, se cruzan al variar *s*.

3.4. Conclusiones

En este trabajo hemos obtenido medidas experimentales de sensibilidad al contraste para un tamaño angular de test de 3.8° con optotipos que subtienden 4.03', bajo cuatro condiciones de luminancias del test, 10, 80, 200 y 600 cd/m², y un entorno de 1, 10, 200 y 600 cd/m².

El segundo punto de interés es que se ha estudiado la naturaleza óptica y neurológica de las variables que influyen en la sensibilidad al contraste. Mientras que los $\Delta \log (CS)$ debidas a los cambios en la luminancia del entorno parecen estar justificadas por la variación que sufre el tamaño pupilar contrarrestado por la luminancia de velo, la variación en la sensibilidad al contraste ocasionada por la luminancia del test parece tener más que ver con procesos de adaptación neuronal.

Otro punto de interés y de gran relevancia clínica es que se ha encontrado la situación idónea para alcanzar la máxima sensibilidad al contraste de un sujeto, obteniéndose ésta en las condiciones en las que el diámetro pupilar contrarresta el efecto de la luminancia de velo. Dicha conclusión es una confirmación del resultado obtenido en el experimento anterior para distintos tamaños angulares de letra y una única condición de luminancia del test ($L_T = 200$ cd/m²). La aportación de este trabajo al anterior radica en la ampliación del rango de luminancia del test empleado, variando desde 10 hasta 600 cd/m², concluyendo que independientemente de las luminancias utilizadas, la *CS* alcanza su máximo valor en situaciones en las que se encuentra una compensación entre los dos parámetros ópticos ya comentados.

El aspecto más relevante de este estudio y sin duda el que ofrece una mejora sustancial en la medida de la sensibilidad al contraste, es que se ha encontrado que con una luminancia del test de 80 cd/m², la sensibilidad al contraste, de una letra de 4.03' situada en un test que subtiende 3.8° desde el observador, permanece invariable frente a cambios generados en la luminancia del entorno circundante al test; siempre y cuando el campo visual del observador no presente ni fuentes puntuales deslumbrantes y reflexiones no deseadas. Esta condición de luminancia sería la recomendada para la realización de las medidas de *CS* en los centros de

evaluación del sistema visual, aportando repetibilidad en los resultados y asegurando por tanto fiabilidad y veracidad en las medidas obtenidas.

Capítulo 4

Influencia de la temperatura de color en el reconocimiento de letras de contraste umbral

El último capítulo de esta tesis contiene cuatro secciones. La primera de ellas comienza con la justificación que ha motivado la puesta en marcha del trabajo que a continuación se presenta; posteriormente se muestra un acercamiento a la escasa bibliografía que sobre el tema se ha encontrado. Para finalizar esta primera parte, se presentan los objetivos del estudio.

La siguiente sección está dedicada al desarrollo del experimento, donde se dedicará la mayor parte de la explicación al proceso de calibración, por ser ésta una parte nueva dentro del conjunto de los experimentos que componen estos tres trabajos sobre el reconocimiento de letras de contraste umbral. No obstante, las características de los participantes así como el dispositivo experimental también son incluidos en este bloque de la memoria.

Posteriormente se realizará el análisis y discusión de los resultados; para terminar, la última sección incluye las conclusiones que del trabajo se pueden obtener.

Una versión preliminar de este trabajo fue presentada como comunicación oral en la 21ª edición del Congreso Internacional de Optometría, Contactología y Óptica Oftálmica, del 12 al 14 de Marzo en el 2010, Madrid. La contribución de Isabel Arranz al estudio, en colaboración con otros coautores, ha sido la búsqueda bibliográfica, selección de los participantes, realización de las medidas experimentales y análisis de los resultados. La calibración espectrométrica fue realizada en el Laboratorio de Espectroscopía de Plasmas de la Facultad de Ciencias por los dos expertos en el tema y miembros del Grupo de Óptica de la Visión, los doctores Mar y Aparicio.

4.1. Motivación

Los dos trabajos anteriores llevados a cabo por el Grupo de Óptica de la Visión han permitido determinar, por un lado, las condiciones de iluminación que hacen que la sensibilidad al contraste sea máxima (Aparicio et al., 2010) y por otro lado se ha encontrado una condición de luminancia del test tal que la CS sea invariante ante cambios de la iluminación del entorno (Gutiérrez et al., 2008), aspecto que representa la base para la normalización de este tipo de medidas. Las distintas condiciones de luminancia empleadas en ambos estudios, tanto las del entorno como las del test, han sido generadas variando la intensidad de corriente de las

luminarias; es decir, el reconocimiento de letras de contraste umbral ha estado condicionado no sólo por la variación de la luminancia, sino también por las variaciones en la composición espectral sufridas por el cambio inducido en la corriente de alimentación de las lámparas. La influencia de la temperatura de color del iluminante utilizado para el test y para el entorno sobre la sensibilidad al contraste medida a los sujetos, es un aspecto aún no cuantificado y ha sido una duda, razonable, surgida a la luz del análisis de los resultados de los capítulos anteriores.

El objetivo del presente trabajo es comprobar si las variaciones en la composición espectral de la iluminación empleada en un gabinete de análisis visual, tienen influencia sobre la *CS* independientemente del efecto de la luminancia. El estudio se va a circunscribir a las temperaturas de color típicas de los gabinetes optométrico-oftalmológicos, por lo que cabe esperar, que en estas condiciones la composición espectral no varíe significativamente; no obstante, no se han encontrado referencias bibliográficas que lo demuestren.

Si bien es verdad que son muy escasos los trabajos que se han aproximado al problema, la interacción visión al color-sensibilidad al contraste ha sido y sigue siendo objeto de estudio. Desde el punto de vista del color, la función de sensibilidad al contraste es una medida de las propiedades espacio-cromáticas del sistema visual humano (Westland et al., 2006). En este sentido, la literatura ofrece básicamente dos tipos de estudios, aquellos que muestran redes sinusoidales acromáticas iluminadas con luz filtrada con diferente composición espectral y los que presentan patrones de redes sinusoidales rojo-verde y/o azul-amarillo, incluyendo en ocasiones las acromáticas. En cuanto a estos últimos se refiere, aunque la literatura es amplia (Mullen, 1984; Van Nes and Bouman, 1967, Kelly, 1983), están lejos de las pretensiones de nuestro trabajo. En relación al primer tipo de experimentos, Capilla et al., 1993, emplearon luces rojas, verdes, azules y blancas para medir la *CSF* en un test de 3.5° a 5 m de distancia, comparando los resultados al compensar la aberración cromática longitudinal y sin compensarla. Las diferencias encontradas eran pequeñas y siempre los valores de *CS* más elevados para el rojo. También se observaba que si la aberración cromática longitudinal es compensada, la sensibilidad para el verde y azul aumenta levemente a lo largo de todo el dominio de frecuencias espaciales. Los resultados se justifican en base a los efectos compensatorios de adaptación cromática entre los mecanismos de color largo, medio y corto cuando estos no están totalmente aislados. En su caso dependen de la composición espectral de la luz, es decir, del ancho de banda de los filtros utilizados. Un experimento más reciente pero en la misma línea fue llevado a cabo por Ramamurthy et al., 2004. En esta ocasión se emplearon LEDs de distintos colores para iluminar el test de sensibilidad al contraste. Los resultados observados muestran mínimas diferencias en la *CSF* al ser iluminada con LEDs rojos, verdes o azules.

En general, en los dos tipos de trabajos sobre sensibilidad al contraste y color lo que sí se puede observar es un denominador común, y es que en este tipo de valoración la aberración cromática ha de ser evitada (ISO 9241-8). Dicho aspecto no ha sido contemplado en nuestros experimentos al variar la composición espectral de la luz que iluminaba el test y el entorno, bajo la sospecha de que dicho factor, para las

condiciones experimentales de nuestros trabajos, supone variaciones indetectables en los resultados obtenidos.

Por otro lado, a pesar de que los trabajos presentados en esta memoria se realizan con la finalidad de obtener información básica sobre la influencia de la luminancia en la medida de la CS, este último estudio tiene una aplicación más práctica. En cuanto a la temperatura de color se refiere, se ha trabajado dentro de los márgenes habituales de iluminación en clínica. Por otro lado, nos hemos planteado, como continuación de los trabajos anteriores, un estudio comparativo de luminancia en condiciones comunes y habituales en los centros de análisis visual, como es el empleo de luminarias de tipo fluorescentes colgadas del techo de los gabinetes, con luces halógenas como aquellas en las que el Grupo de Óptica de la Visión trabaja y sobre las que podemos tener un control más preciso.

En este trabajo se diseñó una prueba de reconocimiento de letras de contraste umbral del mismo tipo que la empleada en el experimento anterior, con un tamaño angular de letra de $\varphi = 4.03'$ y un paso de contraste de 0.025 unidades logarítmicas. Las medidas se llevaron a cabo bajo 18 condiciones de iluminación diferentes. Dieciséis de ellas se obtuvieron por la combinación de luminancias de 10 y 200 cd/m^2 tanto en el test como en el entorno. Dichas luminancias fueron conseguidas por dos procedimientos diferentes, variando, por un lado, la intensidad de corriente de las lámparas, y por otro, mediante filtros neutros colocados delante de las luminarias que mantenían la temperatura de color. Además se han incluido otras dos medidas de sensibilidad al contraste de letras con un test iluminado con 200 cd/m^2 sin filtro y con él y con una luminancia del entorno conseguida a través de los fluorescentes colgados sobre el techo del Laboratorio de Iluminación y Visión donde se llevaron a cabo las medidas. Veinticinco ojos de 21 sujetos de edades comprendidas entre los 20 y los 25 años fueron sometidos a las pruebas.

En el presente trabajo se plantean dos objetivos principales y uno secundario:

- 1.- Estudiar si la composición espectral de las luminarias empleadas en la iluminación del test y del entorno influye en la medida de la sensibilidad al contraste de letras.
- 2.- Comparar los resultados de sensibilidad al contraste en condiciones habituales de iluminación de un gabinete de evaluación de las funciones visuales donde es frecuente el empleo de fluorescentes, con las medidas realizadas por nuestro grupo de trabajo, con fuentes halógenas, donde las condiciones de luminancia están perfectamente controladas.
- 3.- Como objetivo colateral, dado que en este estudio se va a trabajar con dos condiciones de luminancia previamente empleadas en el experimento del capítulo 3, se pretende corroborar los resultados obtenidos en dicho trabajo.

Antes de introducirnos en el capítulo merece la pena destacar, que las variaciones en la composición espectral en este experimento son mínimas comparándolo con luces monocromáticas, donde se estimula, principalmente, un tipo de cono. El trabajo que se muestra a continuación tiene un enfoque más aplicado y cierra el conjunto de los tres trabajos que componen esta tesis incluyendo la temperatura de

color como parámetro previamente no valorado, garantizando que el procedimiento experimental empleado en los trabajos anteriores es adecuado.

4.2. Desarrollo del experimento

A continuación se describirán las características relacionadas con el desarrollo del experimento. Como ya se comentó en la introducción del capítulo se hará hincapié en aquellos aspectos no contemplados en los dos experimentos anteriores.

4.2.1. Sujetos

La información proporcionada a los candidatos sobre el trabajo que se iba a llevar a cabo, el criterio de inclusión de los participantes y la firma del consentimiento informado, no difieren sustancialmente de la realizada en los dos trabajos anteriores, por lo que dicha información ha sido obviada. No obstante, en el anexo 1 se incluye la valoración visual de los sujetos que participaron en el estudio.

Tras verificar la AV de los sujetos, se excluyeron aquellos con una agudeza visual monocular menor que $-0.08 \log MAR$ (1.2 Decimal) con su mejor compensación óptica. El rango de la AV monocular de los participantes fue de -0.08 a $-0.28 \log MAR$ (1.2 a 1.9 Decimal). Las medidas se llevaron a cabo en 25 ojos de 21 sujetos, con edades comprendidas entre los 20 y los 25 años de edad, con una media de 21.2 ± 1.4 .

Como en los trabajos anteriores, se dispuso de lentes oftálmicas montadas en gafas que compensaran el error refractivo de los sujetos en la realización de las medidas de sensibilidad al contraste.

4.2.2. Dispositivo experimental

El laboratorio de Iluminación y Visión de la Facultad de Ciencias usado en las pruebas de sensibilidad al contraste en experimentos previos fue el mismo que el utilizado para este trabajo. Las luminarias y la disposición de las mismas se mantuvieron como en los experimentos anteriores; en este caso se incorporaron filtros de densidad neutra colocados sobre cada luminaria para reducir la luminancia cuando la condición experimental lo requería. Las condiciones de luminancia del test y del entorno fueron de 10 y de 200 cd/m^2 en ambos casos, incluyendo la iluminación que proporcionan los fluorescentes del techo como luminancia del entorno para una $L_T = 200 \text{ cd/m}^2$. El tamaño angular del optotipo, y los ángulos de visión del test y del entorno fueron los mismos que en el experimento anterior, $4.03'$, 3.8° y 34° respectivamente.

4.2.3. Proceso de calibración

Como ya se ha comentado, la variación de la intensidad de corriente de las lámparas conectadas a las fuentes de alimentación fue la que proporcionó las distintas luminancias con las que trabajamos en los experimentos anteriores. Los trabajos se llevaron a cabo con diferentes luminancias tanto en el entorno, como en el test. Este

modo de generar dichas condiciones añade como variable, no contemplada en los experimentos anteriores, la modificación de la composición espectral de la luz, aspecto que puede influir en el resultado final de las medidas de sensibilidad al contraste. La pretensión de este trabajo es independizar esas dos variables, luminancia y temperatura de color y comprobar si esta última influye, en sí misma, para altas y bajas luminancias. Es decir, la idea que se persigue en este trabajo es la de medir el reconocimiento de letras de contraste umbral con una luminancia constante y diferentes temperaturas de color. Para ello, se ha de calcular la temperatura de color de las luminancias con las que vamos a trabajar, obtenidas por dos procedimientos diferentes, modificando la intensidad de corriente de las luminarias y con filtros de densidad neutra que modifiquen la luminancia sin variar la composición espectral.

Las derivas del luminancímetro y de las lámparas, así como los análisis de la homogeneidad espacial de la luminancia del test y del entorno no fueron determinados por haber sido analizados exhaustivamente en el trabajo presentado en el capítulo 2. Se tomó la precaución de encender los sistemas utilizados con una antelación de 1 hora para evitar fluctuaciones en las medidas realizadas.

Calibración de las lámparas incandescentes

El objetivo de esta parte del trabajo experimental es conocer cómo varía la temperatura de color correspondiente a la emisión espectral, tanto de las lámparas que iluminan el test como de aquellas que iluminan el entorno, en función de la corriente de alimentación. Para ello se utilizó el espectrómetro disponible en el Laboratorio de Espectroscopía de Plasmas del Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica de esta Universidad. Dicho espectrómetro está formado básicamente por un monocromador Jobin-Yvon HR1500, (dotado de una red holográfica de 2400 líneas/mm y un espejo colector de 1500 mm de focal), y una cámara ICCD Stanford Computer Optics 4-Quick-E. Para la calibración relativa de dicho espectrómetro en intensidad y la determinación de su transmitancia espectral, se utilizó una lámpara Laes 50 W, de la cual el Centro de Tecnologías Físicas Leonardo Torres Quevedo nos ha proporcionado su emisión radiométrica en forma de densidad espectral de irradiancia a 50 cm de la fuente cuando dicha lámpara se alimenta a 4 A de corriente. Esta lámpara, para todos los efectos una lámpara patrón, es idéntica a las empleadas en la iluminación del test en nuestro experimento de psicofísica.

Previamente a las medidas realizadas y para garantizar la estabilidad de la lámpara patrón, ésta fue encendida y conectada a la fuente de alimentación (a 4 A) con una hora de antelación, al igual que la cámara del espectrómetro. Colocada la lámpara patrón delante del espectrómetro, se recogió su emisión espectral por unidad de longitud de onda, en el intervalo de 400 a 700 nm, prestando especial atención a la determinación precisa del ruido eléctrico que habría de ser sustraído de las medidas radiométricas. El cociente entre la señal recogida por el espectrómetro para cada intervalo de longitud de onda y la conocida densidad espectral de irradiancia emitida por la lámpara patrón, permite determinar la transmitancia espectral del espectrómetro (en unidades relativas y salvo constantes geométricas), aspecto clave en las medidas posteriores de radiancia espectral de las lámparas que iluminan el test y el entorno en nuestro experimento.

Lámparas incandescentes halógenas de 50 W.

Posteriormente, ya sin la lámpara patrón sino con la utilizada en el experimento para iluminar el test y conectada a la fuente de alimentación, se procedió a recoger el número de cuentas por unidad de longitud de onda, adquiridas por el espectrómetro en el intervalo 400-700 nm, para corrientes de alimentación entre 2.0 y 4.2 A en paso de 0.2 A. A partir de cada una de las curvas de emisión recogidas, se determinó su correspondiente densidad espectral de radiancia. En la figura 4.1 se ha representado la densidad espectral de radiancia ($dL_e/d\lambda$), tanto de la lámpara patrón como de las utilizadas para iluminar el test, en función de la longitud de onda, para las distintas intensidades de corriente de la lámpara de 50 W. Las corrientes de alimentación escogidas para visualizar dichas curvas son las de 4.0, 3.4, 3.0 y 2.4 A.

Una vez obtenida la densidad espectral de radiancia (en unidades relativas) para cada corriente de alimentación, se ajustaron dichos datos a la función de cuerpo negro (estrictamente hablando deberíamos decir que es la emisión de un cuerpo gris), que en la figura 4.1 están representados con línea continua, mientras que los datos experimentales quedan definidos con un triángulo completo.

Como se observa en dicha figura a medida que disminuye la intensidad de corriente de la lámpara, la emisión de la misma es menor. Por otro lado, también se observa un buen ajuste entre los datos experimentales y los calculados según la expresión de Planck y se intuye un desplazamiento del máximo de emisión espectral hacia longitudes de onda mayores (como prevé la ley de Wien).

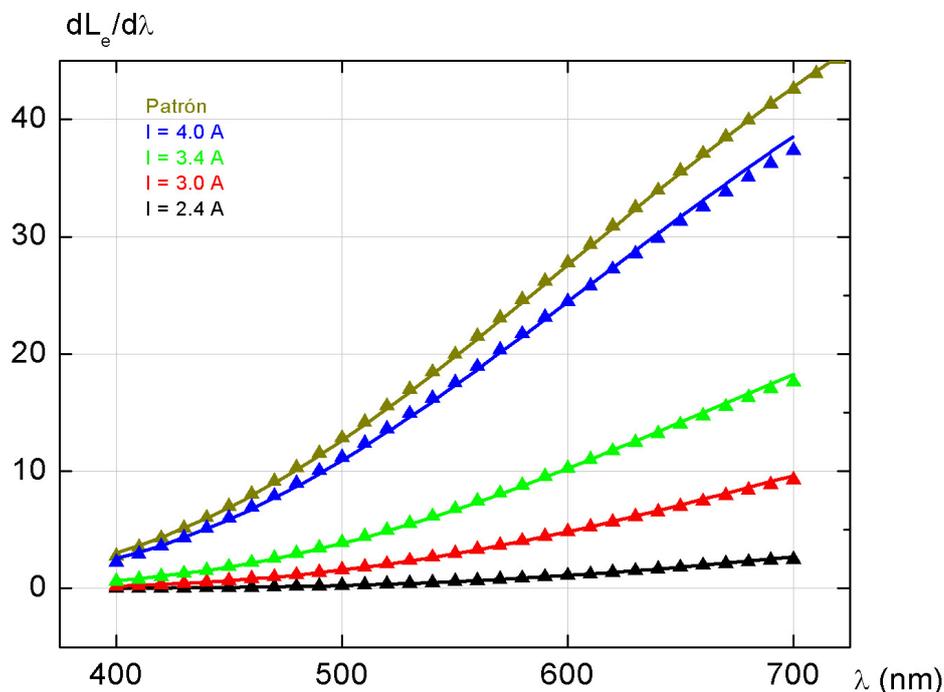


Figura 4.1 Curvas de densidad espectral de radiancia de una lámpara incandescente halógena de 50 W a distintas intensidades de corriente (triángulos completos) y sus ajustes a la función de cuerpo negro (línea continua).

A partir de los resultados obtenidos en el ajuste a función de cuerpo negro, se ha calculado la T_C en función de la intensidad de corriente de la lámpara (figura 4.2).

La figura 4.2 muestra cómo a medida que aumenta la intensidad de corriente de la lámpara, la temperatura se incrementa siguiendo una dependencia monótona creciente. A partir de dicha figura y por interpolación de datos se ha determinado la temperatura de color para las corrientes de alimentación que, en nuestro montaje psicofísico, proporcionan luminancias del test de 10 y 200 cd/m^2 , siendo dichas temperaturas de color de 1940 K y 2540 K respectivamente.

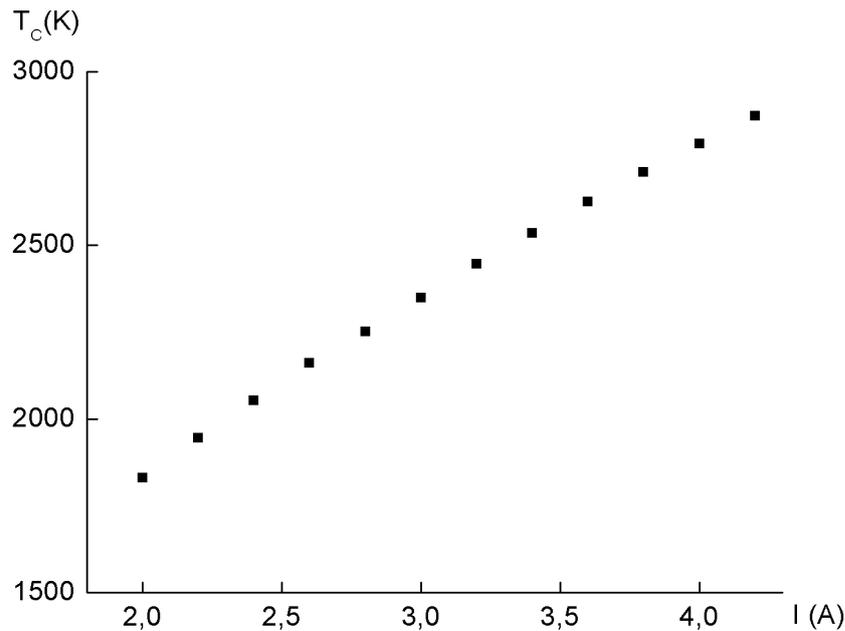


Figura 4.2 Temperatura de color en función de la intensidad de corriente de las lámparas de 50 W.

Lámparas halógenas de 300 W.

El procedimiento utilizado para la calibración espectrométrica de las luminarias de 300 W empleadas en la iluminación del entorno fue igual al utilizado para las lámparas de 50 W. En este caso se han representado las densidades espectrales de radiancia de la lámpara patrón, y de una de las ocho lámparas utilizadas en el experimento, a las intensidades de corriente de 1.23, 0.94 y 0.87 A. Dichas corrientes de alimentación han sido seleccionadas para su representación por generar unas 1000, 200 y 100 cd/m^2 de luminancia de entorno. La figura 4.3 representa la densidad espectral de radiancia en función de la longitud de onda para la lámpara de 300 W.

Para este caso se ha seguido un patrón de representación similar al de la figura 4.1, considerando los datos experimentales en forma de cuadrados y el ajuste a la función de Planck en línea continua. Las observaciones comentadas para dicha figura pueden servir para la 4.3.

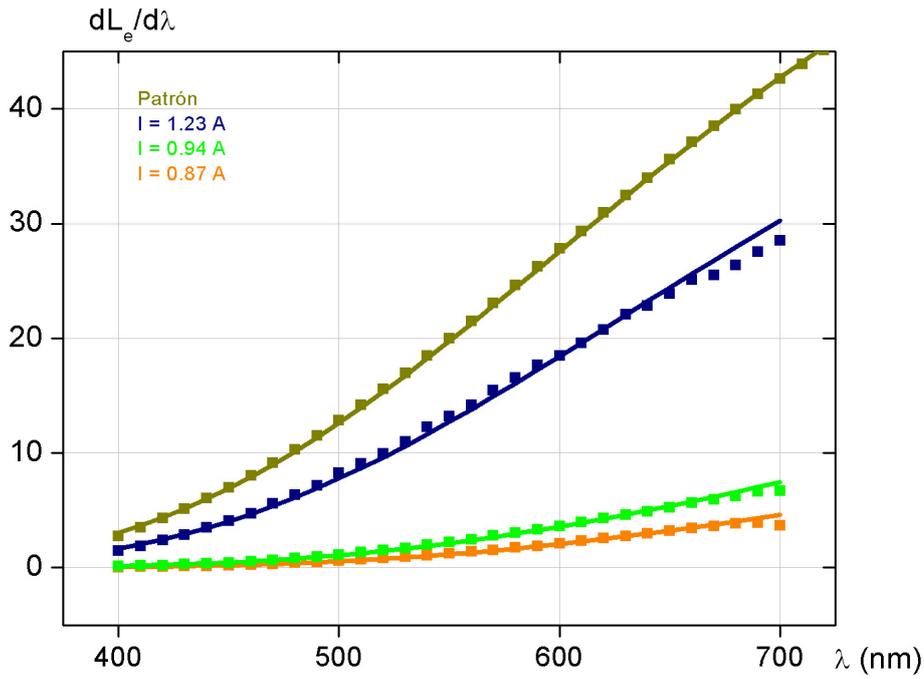


Figura 4.3 Curvas de densidade espectral de radiancia de una lámpara incandescente halógena de 300 W a distintas intensidades de corriente (cuadrados completos) y sus ajustes a la curva de cuerpo negro (línea continua).

A partir de los datos obtenidos se ha representado en la figura 4.4 la temperatura de color para las lámparas de 300 W en función de las distintas intensidades de corriente.

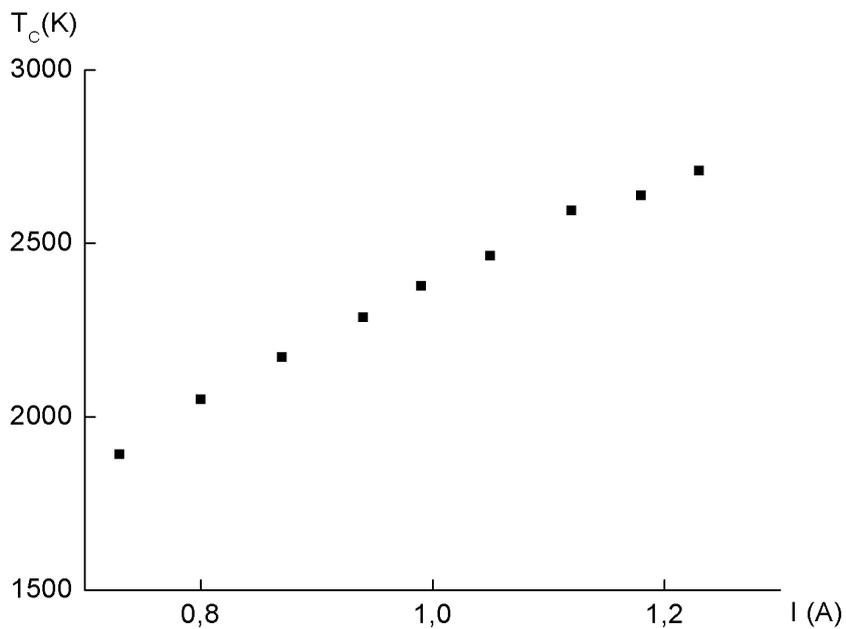


Figura 4.4 Temperatura de color en función de la intensidad de corriente de las lámparas de 300 W.

En la figura 4.4 se observa, de nuevo, un incremento monótono creciente de la T_C con la intensidad de corriente de las lámparas. Una interpolación entre puntos permite obtener, a partir de las corrientes de alimentación que proporcionan las luminancias del entorno de 10 y 200 cd/m^2 , las correspondientes temperaturas de color, obteniéndose 1890 y 2380° K respectivamente.

Espectrofotometría de los filtros de densidad neutra

Tomando como referencia una cierta corriente de alimentación de una lámpara, hay dos formas de reducir la luminancia que produce: por un lado, podemos reducir dicha corriente hasta conseguir la luminancia deseada; por otro, podemos colocar un filtro neutro de la transmitancia adecuada delante de la fuente. Evidentemente, en el primer procedimiento al reducir la temperatura de color de la luz percibida por el sujeto también se modifica su distribución espectral; el segundo aunque no lo hace, es más complicado de manejar.

Para implementar el segundo procedimiento en nuestro laboratorio, se seleccionaron filtros neutros de poliéster tintado. Dicho material tiene un punto de fusión próximo a los 250 °C, lo que le permite ser situado muy próximo a las luminarias halógenas sin deteriorarse por el calor emitido por ellas. Los filtros seleccionados fueron los etiquetados con código 1514, 1516, 1517 y 1555 de la serie CineFilters del fabricante GAMPRODUCTS Inc. Tomando como referencia la luminancia generada a partir de 4.15 A ($T_c = 2800$ K) y 1.23 A ($T_c = 3000$ K) de corriente de alimentación en las lámparas del test y del entorno respectivamente, dichos filtros, en diferentes combinaciones, eran capaces de proporcionar tanto al test como al entorno las 200 y 10 cd/m^2 deseadas para la realización del presente experimento.

De los cuatro filtros citados, los tres primeros son filtros de densidad neutra que, según las especificaciones de fabricación, reducían la transmitancia, pero tenían un pequeño efecto sobre la composición espectral, elevando la temperatura de color un 2, 8 y 12% respectivamente. Para compensar dicho efecto, se utilizó el último de los filtros mencionados, etiquetado como 1555, cuya combinación con alguno de los anteriores proporcionaba una variación en la temperatura de color próxima a cero.

La transmitancia espectral de los filtros seleccionados se midió en nuestro laboratorio con un espectrofotómetro SAFAS EasySpec II, obteniéndose las curvas que se muestran en la figura 4.5.

Transmitancias

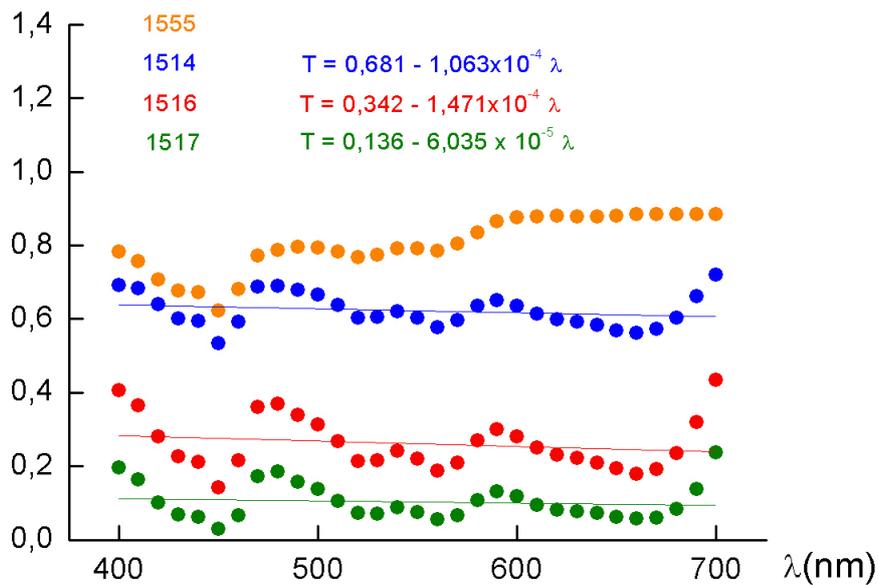


Figura 4.5 Transmitancias de los filtros GamColor en función de la longitud de onda del espectro visible.

Aunque, como se observa en dicha figura la distribución espectral de transmitancias no es estrictamente la de filtros neutros, si realizamos un ajuste lineal de los datos experimentales de transmitancia para los filtros 1514, 1516 y 1517 obtenemos una pendiente de dicho ajuste muy próxima a cero, de lo que concluimos que las variaciones en el comportamiento de cada uno de esos tres tipos de filtros, que van en un sentido se compensa con las que están en sentido contrario. Asimismo, obtenemos unas transmitancias medias en el intervalo espectral considerado, para dichos filtros, de 0.68, 0.34 y 0.14 respectivamente.

Posteriormente y tomando como referencia de corriente de alimentación para las lámparas del test y entorno los valores citados con anterioridad, se eligieron las combinaciones de estos filtros que permitían conseguir en el test y el entorno las luminancias deseadas de 10 y 200 cd/m^2 . Dado que dichos filtros podían modificar ligeramente la temperatura de color de las fuentes a esas corrientes de 4.15 y 1.23 A, se recalculó dicha temperatura de color, ajustando de nuevo a una función de cuerpo negro la curva resultante de multiplicar la radiancia espectral a dichas corrientes por la transmitancia de cada una de las combinaciones de filtros seleccionados.

Las temperaturas de color obtenidas en dichos ajustes para conseguir 10 y 200 cd/m^2 fueron, de 2870 K y 2850 K en el caso del test, y de 2780 y 2760 K en el del entorno respectivamente.

Luminarias de tipo fluorescente

Como ya se ha comentado en la sección 4.1 de la memoria, para obtener información sobre la sensibilidad al contraste en condiciones de luminancia habituales en la práctica clínica diaria, entre las medidas realizadas en este trabajo,

también se llevaron a cabo algunas en las que el entorno era iluminado con los propios fluorescentes del laboratorio, por representar una situación de iluminación muy habitual en cualquier gabinete donde se realizan pruebas visuales.

El Laboratorio de Iluminación y Visión dispone de dos lámparas fluorescentes (SILVANIA F48T12/CW/HO) colgadas en el techo. A pesar de la diferencia funcional que existe entre la emisión de un cuerpo negro y la de una lámpara fluorescente, el fabricante proporciona una T_C de 4200 K para dichos fluorescentes.

Ha de tenerse en cuenta que este tipo de luminarias están dispuestas en el techo de la habitación y que por tanto, la iluminación que generan en el entorno no es homogénea, como sí lo es la obtenida con las lámparas incandescentes de nuestro sistema experimental, sino que es ligeramente superior en la parte más alta de la pared de corcho que actúa de entorno en nuestro montaje y menor en la más baja. No obstante, para el objetivo que se perseguía en este trabajo, desestimamos la posibilidad de homogeneizar la luminancia obtenida en la escena visual del observador con fluorescentes que pudieran estar situados en otras posiciones, pues se perdería la posibilidad de comparar los resultados con las condiciones habituales de trabajo.

Con el luminancímetro situado a 2 m de la pared de corcho y con un campo de medición de 6' se realizaron 16 medidas obteniéndose un promedio de 40 cd/m^2 de L_S con los fluorescentes encendidos.

A continuación se muestra una tabla resumen con las luminancias y temperaturas de color que fueron utilizadas para llevar a cabo las medidas de reconocimiento de letras de contraste umbral de 4.03' de tamaño angular.

		$L = 10 \text{ cd/m}^2$	$L = 200 \text{ cd/m}^2$
Test	Sin filtro	1940 K	2540 K
	Con filtro	2870 K	2850 K
Entorno	Sin filtro	1890 K	2380 K
	Con filtro	2780 K	2760 K
	Fluorescente		4200 K

Tabla 4.1 Tabla resumen de las temperaturas de color empleadas en las diferentes condiciones de medida de la sensibilidad al contraste de letras.

En la tabla 4.1 se puede observar que cuando se colocan filtros neutros delante de las luminarias que iluminan el test o el entorno, la temperatura de color prácticamente no varía independientemente de si se trabaja con 10 o con 200 cd/m^2 .

4.2.4. Diseño de los optotipos y procedimiento experimental

Diseño de los optotipos

Con el luminancímetro Spectra Pritchard 1980 A se realizó una nueva calibración de los distintos tonos de gris que podían ser generados con la impresora Hewlett-Packard HP9800 deskjet. El procedimiento seguido para la calibración fotométrica fue el mismo que el empleado en capítulos anteriores y los resultados obtenidos

tampoco difieren de los previamente recogidos, con lo que la repetibilidad de las medidas, de nuevo, queda demostrada.

El tamaño angular de la letra de la tarjeta de optotipos fue de 4.03', tamaño que ya había sido utilizado en experimentos previos, sobre los que teníamos experiencia y proporcionaba las mayores diferencias en los resultados.

Se procedió a imprimir nuevas tarjetas de sensibilidad al contraste de letras, siguiendo las recomendaciones de distintas instituciones para el diseño de los optotipos (National Academy of Science. National Research Council (NAS-NRC), 1980) y para el paso de contraste entre los mismos (Academia Americana de Oftalmología, Rubin et al., 1990).

A pesar de mantener en este experimento, los mismos tonos de gris que en el capítulo 3, se realizaron hojas nuevas con 16 tripletes cada una, que sustituyeron a las anteriores, lo cuál parece razonable si tenemos en cuenta el deterioro que pueden sufrir las tarjetas de optotipos con el uso de las mismas y con el tiempo. En esta ocasión el paso de contraste entre tripletes era de 0.025 unidades logarítmicas.

Procedimiento experimental

Las condiciones visuales del sujeto para la ejecución de las pruebas de sensibilidad al contraste se llevaron a cabo siguiendo el mismo criterio que en el experimento del capítulo 3, tanto en la compensación de la ametropía sobre la gafa como en la realización de la medida en condiciones monoculares. También se mantuvo la distancia empleada para las pruebas y los ángulos subtendidos por el test, el entorno y el optotipo.

En este trabajo se ha medido la sensibilidad al contraste de letras de un único tamaño angular bajo 18 combinaciones de luminancia diferentes, que corresponden a 10 y 200 cd/m² para el test cuya luminancia se ha obtenido por dos procedimientos diferentes, variando la intensidad de corriente de las lámparas conectadas a fuentes estabilizadas y mediante filtros de densidad neutra. La luminancia del entorno empleada en el experimento ha sido la misma que la del test y se ha obtenido de idéntica manera. En este último caso se ha añadido la iluminación que genera un fluorescente. Para visualizar de forma rápida dichas condiciones y facilitar la interpretación de las figuras que van a ser presentadas en la siguiente sección, se ha representado la tabla 4.2 que contiene las combinaciones de luminancias utilizadas. Se han sombreado las casillas correspondientes a aquella situación en la que fue empleado un filtro para la realización de las medidas. La última fila incluye una división de condiciones de luminancia por grupos, donde L_T y L_S no varían dentro del mismo grupo, pero sí lo hace la manera de obtener dichas situaciones. La condición 17 y 18 está representada por una luminancia del entorno, C, que corresponde con la iluminación generada por los fluorescentes del techo.

Luminancia (cd/m ²)								
Condiciones	1	2	3	4	5	6	7	8
Entorno	200		200		10		10	
Test	200	200	200	200	200	200	200	200
Grupo	1				2			

Luminancia (cd/m ²)										
Condiciones	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Entorno	10		10		200		200		C	
Test	10	10	10	10	10	10	10	10	200	200
Grupo	3				4				5	

Tabla 4.2 Combinaciones de luminancia entre el test y el entorno empleadas en el trabajo, con presencia de filtro (casillas sombreadas) o ausencia del mismo. La clasificación por grupos, hace referencia a los conjuntos de condiciones en los que L_T y L_S permanecen constantes.

En trece de las ocasiones en las que se valoró la sensibilidad al contraste era necesario el uso de un filtro. Dichos filtros debían de tener una separación a las luminarias suficiente para que no se calentaran por el infrarrojo que emiten las lámparas alterando sus propiedades, pero debían estar próximos a las mismas para que la emisión de luz fuera similar a las obtenidas sin filtros, manteniendo la homogeneidad espacial. Por este motivo se diseñaron unos marcos sobre los que se dispusieron dichos filtros, que serían colocados cuando las condiciones de medida así lo precisaran. Los marcos fabricados para los filtros del entorno eran ligeramente mayores en tamaño que las luminarias utilizadas en el Laboratorio de Iluminación y Visión para el entorno. Los diseñados para las luminarias del interior de la caja, tenían 68 cm alto por 28 cm ancho, y se situaban delante de las lámparas de 50 W tal que toda la luz que salía de las mismas, antes de iluminar el test, debía pasar por el filtro.

Al igual que en los experimentos anteriores se tuvo un cuidado especial en apantallar las reflexiones no deseada hacia el observador.

En total cada individuo realizó 18 pruebas, por las distintas combinaciones de luminancia del test y del entorno, con y sin filtro y con el fluorescente, como las que se muestran en la tabla 4.2. En todos los casos el orden de las pruebas (combinación luminancias entorno/test) y el grupo de letras utilizado para cada prueba se realizó de forma aleatoria para cada observador y para cada ojo analizado. El tiempo de realización de las 18 pruebas fue de 3 horas aproximadamente, dejando un periodo de 2 minutos de adaptación a la nueva condición de iluminación.

Se diseñaron 8 juegos de tarjetas diferentes con los mismos contrastes que se iban cambiando de una condición a la siguiente para evitar la memorización de los optotipos.

El método psicofísico empleado y el procedimiento de contabilización y de finalización de la prueba de reconocimiento de letras de contraste umbral fue el mismo que el utilizado en el primer y segundo experimento de esta memoria.

4.3. Análisis y discusión de los resultados

La figura 4.6 representa el resultado original del log (CS) para cinco ojos bajo las 18 combinaciones de luminancia empleadas en el experimento. Se ha introducido una nueva nomenclatura que definirá cada condición, que será utilizada a partir de ahora, y que puede observarse en la parte inferior de dicha figura. Esta nomenclatura, se ha tomado de la primera letra, en inglés, por la que empieza cada situación. Denominamos T al test, S al entorno, F al filtro, N al no filtro y C al fluorescente; al incluir el 1 ó el 2 se hace referencia a 10 cd/m² ó a 200 cd/m² respectivamente. Como ejemplo podemos tomar la condición 1, que representa un test (T) con una luminancia de 200 cd/m² (2) obtenida sin filtro (N) combinado con un entorno (S) iluminado con 200 cd/m² (2) cuya luminancia ha sido obtenida sin el empleo de filtro (N). Dicha condición aparecerá como T2N-S2N, y puede observarse de forma rápida cómo coincide con la condición 1 de la tabla 4.2.

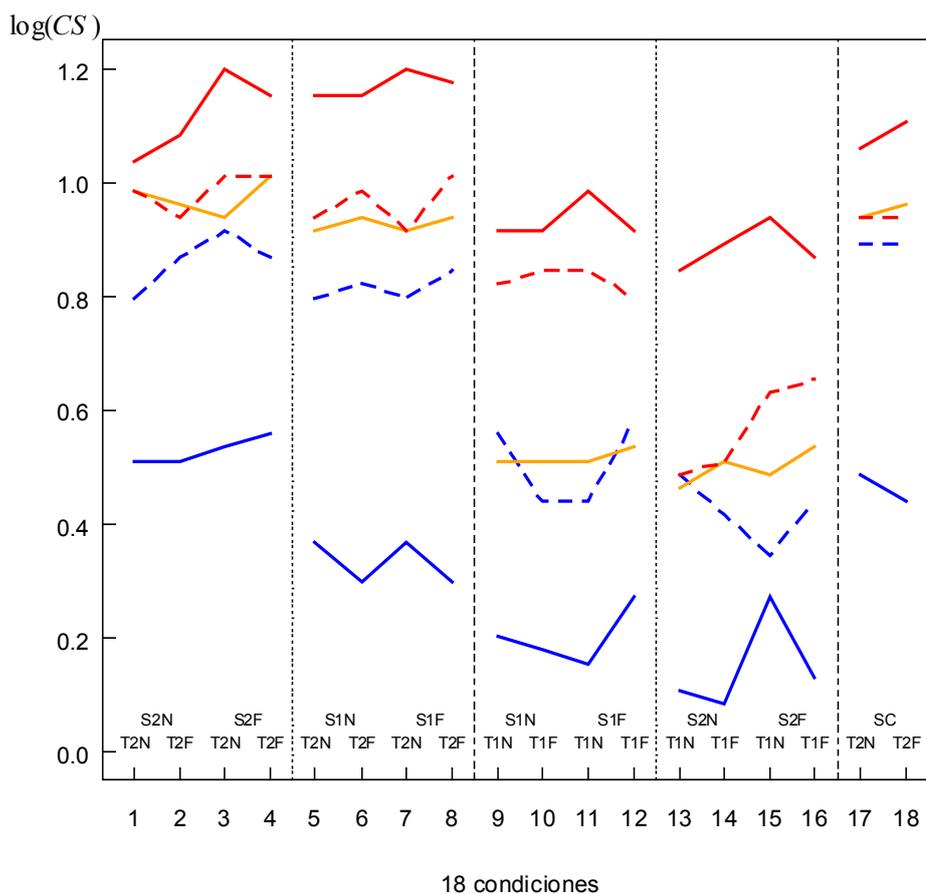


Figura 4.6 log (CS) para 5 individuos y las 18 condiciones de luminancia del experimento. Representan la combinación de luminancias de 10 y 200 cd/m² para el test y el entorno, incluyendo en este último caso el empleo de fluorescentes, con presencia o no de filtro. Se denomina T al test, S al entorno, F al filtro, N al no filtro y C al fluorescente; el número 1 y el 2 hacen referencia a 10 cd/m² v a 200 cd/m² respectivamente.

Se ha utilizado el mismo código de colores que en las figuras 2.12 y 3.5. La línea roja corresponde al resultado del ojo que tiene el mayor valor medio global de log (CS), siendo el que presenta los valores más elevados en todas las condiciones. En color azul se ha representado el ojo que presenta el menor log (CS). También se han incluido los ojos más próximos a los cuartiles 25 y 75 en trazo discontinuo y la mediana del valor medio global en trazo continuo y color amarillo.

El aspecto más notable de la figura 4.6, es la variabilidad interindividual en la medida de la sensibilidad al contraste, donde aparecen diferencias de hasta 0.65 unidades logarítmicas para distintos ojos en una misma condición, lo que supone unos 24 grupos de letras en las tarjetas de optotipos diseñados por nuestro grupo de trabajo.

Parece existir a primera vista, una tendencia a obtener valores del log (CS) superiores cuando el test presenta mayor luminancia, es decir, a 200 cd/m², aspecto coherente con los resultados obtenidos en el capítulo 3. En cambio, no se observa una tendencia en el comportamiento particular de los ojos al utilizar las diferentes combinaciones de luminancia empleadas en el trabajo. Es decir, para cualquiera de los 5 grupos de luminancia los cinco ojos representados no siguen una tendencia común, sino que cada uno de ellos manifiesta un comportamiento diferente ante la presencia o no de filtro, tanto en el test como en el entorno.

A continuación y con el fin de corroborar los resultados encontrados en el capítulo 3 sobre la influencia de la luminancia del entorno y del test en la medida de la sensibilidad al contraste, se ha realizado la figura 4.7. Dicha figura representa los promedios de los logaritmos de la CS de los 25 ojos analizados, con los intervalos de confianza del 95% para las correspondientes medias, en función de las luminancias del entorno empleadas en el experimento, diferenciando si han sido obtenidas con el empleo de filtro o sin él. Todo ello para 10 y 200 cd/m² de luminancia del test.

Para analizar esta figura, a pesar de que haya sido incluido, se va a obviar el efecto del filtro tanto en el entorno como en el test. Dicho aspecto será valorado en figuras posteriores, cuyas representaciones facilitan la interpretación del efecto de la temperatura de color en la sensibilidad al contraste.

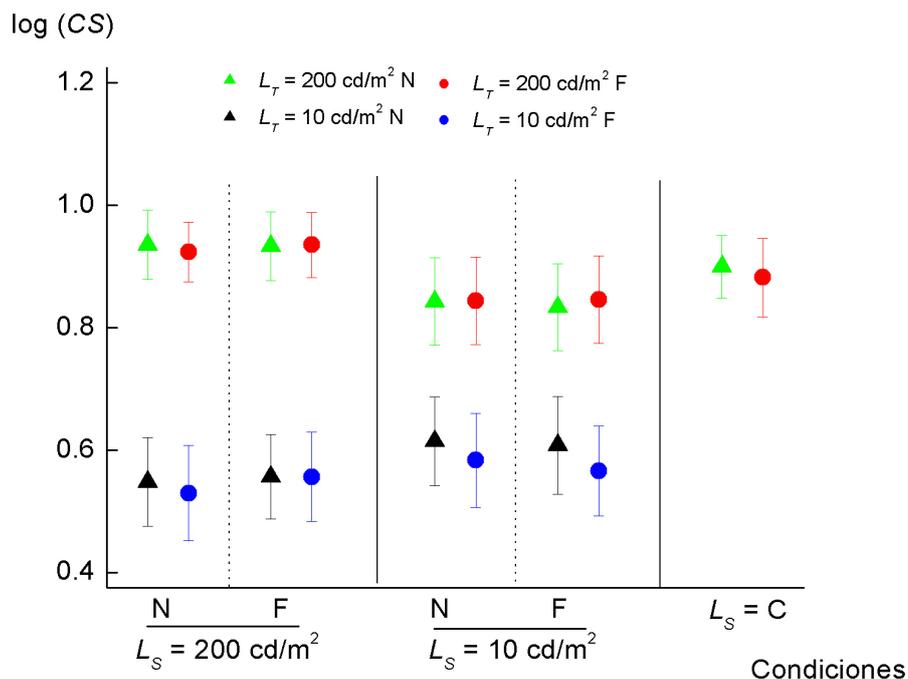


Figura 4.7 Promedio de los valores del log (CS) para las 18 combinaciones de luminancia del test y del entorno. Se incluye el uso o no del filtro en cada condición.

En la figura 4.7 parece obvio cómo la sensibilidad al contraste obtenida con una luminancia del test de 200 cd/m^2 (triángulos verdes y círculos rojos), siempre se encuentra por encima de los valores de la sensibilidad al contraste obtenidos con 10 cd/m^2 (triángulos negros y círculos azules) de luminancia del test, independientemente de la luminancia del entorno. Dicho aspecto, como ya ha sido explicado en el capítulo 3 de esta memoria, se debe a factores neuronales.

En cuanto a la influencia de la luminancia del entorno se refiere, se observa cómo es diferente para cada luminancia del test, encontrándose resultados opuestos. Para una $L_T = 200 \text{ cd/m}^2$, el log (CS) disminuye con la luminancia del entorno. En este caso, aunque el efecto de la luminancia del velo se reduce con L_S , dicho efecto es contrarrestado por la midriasis pupilar que incrementa las aberraciones ópticas empeorando la *MTF*. El efecto global se traduce en una reducción de la sensibilidad al contraste. Mientras que para una L_T de 10 cd/m^2 , al pasar de un entorno de 200 cd/m^2 a otro de 10 cd/m^2 , se observa un incremento del log (CS). Este hecho puede ser debido, a la disminución de la luminancia de velo que prevalece sobre la midriasis y el aumento de las aberraciones ópticas, generando en su conjunto final una mejoría de la sensibilidad al contraste. Los resultados encontrados no sólo son coherentes con los del capítulo 3, sino que un análisis estadístico (t-student) ha confirmado la existencia de diferencias significativas en el log (CS) al variar la luminancia del entorno, para ambos casos, cuando L_T adquiere un valor de 200 cd/m^2 (p-valor = 0.001), así como para una $L_T = 10 \text{ cd/m}^2$ (p-valor = 0.04).

El aspecto más novedoso que ofrece la figura 4.7, lo constituye el empleo de los fluorescentes como iluminación del entorno. Con el objetivo de buscar un ambiente que reflejara condiciones habituales de trabajo en la práctica clínica, se ha utilizado exclusivamente la luminancia del test recomendada por la International

Organization for Standardization (ISO), 1996, para agudeza visual (200 cd/m^2), desestimándose 10 cd/m^2 de luminancia del test.

Se puede observar que para todas las condiciones en las que el test ha sido iluminado con 200 cd/m^2 , los valores del log (CS) se encuentran próximos. Si consideramos que la luminancia obtenida a través del fluorescente es de 40 cd/m^2 , valor intermedio entre 10 y 200 cd/m^2 del entorno, resulta razonable que los resultados en el log (CS) para dicha luminancia adquieran también un valor intermedio. Se ha alcanzado dicho valor a pesar de la falta de homogeneidad espacial que el fluorescente genera en la luminancia del entorno. Con el fin de comprobar si existen diferencias en la sensibilidad al contraste al iluminar el entorno con fluorescentes o con las lámparas halógenas empleadas en el trabajo, se ha realizado un análisis estadístico. Los resultados indican que existen diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-valor} < 0.005$) entre el promedio del log (CS) obtenido con los fluorescentes y los promedios obtenidos para cualquiera de los otros 4 grupos (grupos 1 al 4 en la tabla 4.2). Sin embargo no se puede afirmar el motivo de dicha diferencia pues la comparación realizada no responde únicamente a diferentes temperaturas de color, también está sujeta a diferentes luminancias y diferente distribución espacial de dichas luminancias.

Por consiguiente, del análisis de la figura 4.7, podríamos concluir que se han corroborado los resultados de relación de luminancia del test y del entorno obtenidos en los experimentos de los capítulos 2 y 3. Otra de las conclusiones que se pueden obtener y que resulta más práctica en el entorno clínico, es que hay diferencias en el logaritmo de la sensibilidad al contraste al utilizar, con una $L_T = 200 \text{ cd/m}^2$, luminarias de tipo fluorescente o luminarias de tipo halógeno, generando diferencias de alrededor de 0.045 unidades logarítmicas, lo que supone dos grupos de letras en las tarjetas de sensibilidad al contraste diseñadas por nuestro grupo de trabajo, aunque dicha diferencia no existiría si hubiéramos trabajado con un test comercial como el de Pelli-Robson.

Para analizar de forma específica el efecto de la temperatura de color sobre el test en la sensibilidad al contraste, se ha representado la figura 4.8. La coordenada “x” de cada punto representa el log (CS) obtenida para unas determinadas condiciones de luminancia del entorno, con filtro (círculos azules) o sin él (cuadrados rojos), y una cierta luminancia del test con filtro ($T = F$). La coordenada “y” representa el log (CS) obtenido para iguales condiciones de luminancia pero sin filtro neutro delante de las luminarias del test ($T = N$). Se ha incluido la recta de pendiente unidad y a cada coordenada (x,y) se le ha asignado sus correspondientes intervalos de confianza. El triángulo verde representa los resultados del log (CS) para un entorno iluminado con fluorescente.

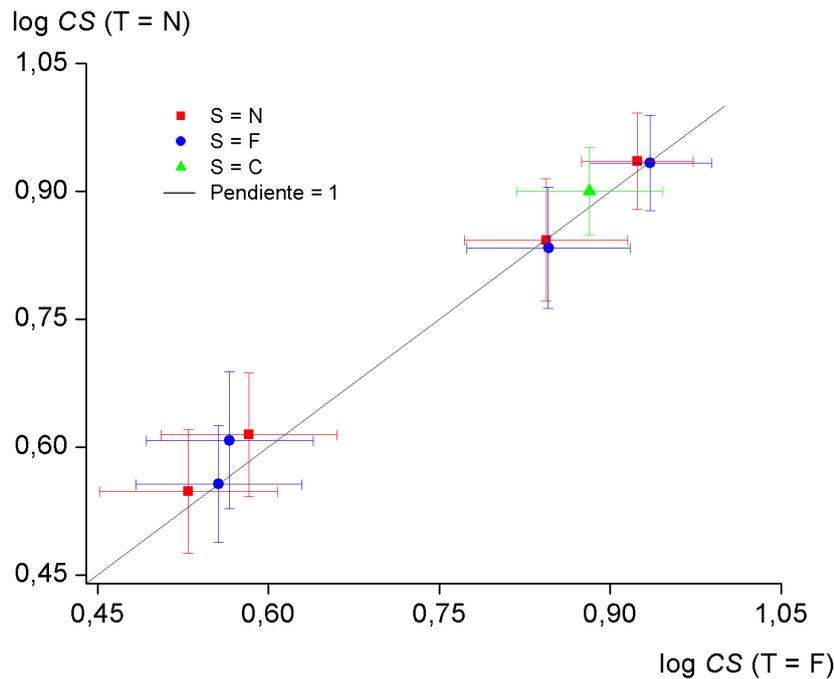


Figura 4.8 Análisis del efecto del filtro en las luminarias del test sobre el log (CS).

Llama la atención que todos los puntos se encuentran muy próximos a la línea de pendiente unidad y, al analizar los intervalos de confianza en forma de barras horizontales y verticales, todas cruzan dicha línea. Es decir, el efecto que ejerce el filtro colocado sobre las luminarias del test no parece tener una influencia estadísticamente significativa en la medida de la sensibilidad al contraste.

Para evaluar el efecto de la temperatura de color del entorno sobre la sensibilidad al contraste se ha representado la figura 4.9. La coordenada “x” representa los promedios del log (CS) para una cierta condición de L_T con filtro (círculos azules) o sin él (cuadrados rojos), y una cierta L_S con filtro (S = F). La coordenada “y” representa el log (CS) para las mismas condiciones de luminancia pero sin filtro delante de las luminarias del entorno (S = N). La figura incorpora la recta de pendiente unidad y a cada valor obtenido se le ha añadido sus correspondientes intervalos de confianza.

De nuevo, todos los puntos se encuentran muy próximos a la línea de pendiente unidad y, al analizar los intervalos de confianza todos cruzan dicha línea. Es decir, el efecto que ejerce el filtro colocado sobre las luminarias del entorno no parece tener una influencia estadísticamente significativa en la medida de la sensibilidad al contraste.

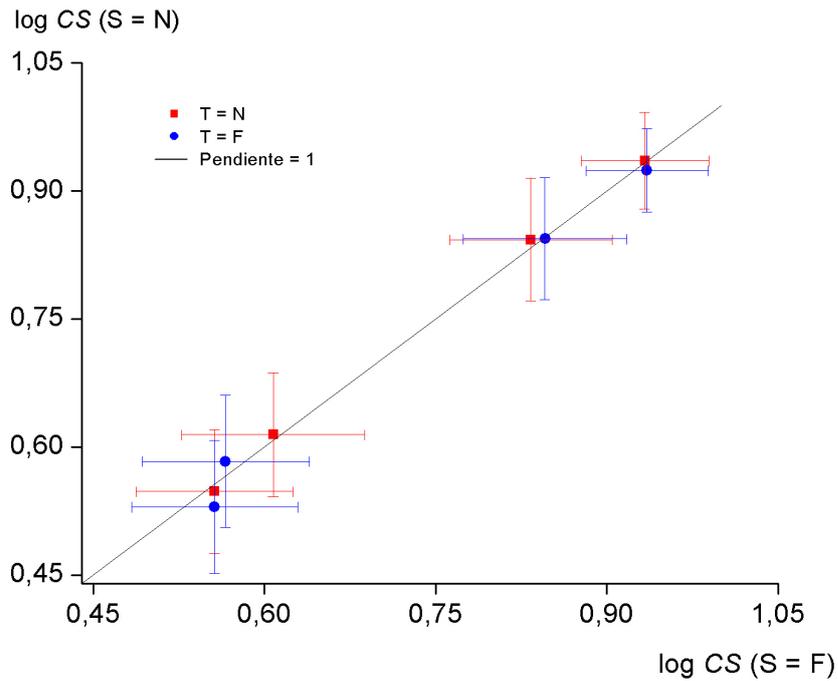


Figura 4.9 Análisis del efecto del filtro en las luminarias del entorno sobre el log (CS).

Para finalizar el análisis de los resultados y con el fin de satisfacer, estadísticamente el objetivo planteado al comienzo del trabajo sobre las diferencias en el log (CS) al variar únicamente la composición espectral de la luminancia, se han realizado las figuras 4.10 y 4.11. La primera de ellas, representa las diferencias de los promedios del log (CS) al emplear un test sin filtro o con él ($T = N/T = F$), para cada condición de luminancia determinada y para las distintas formas de iluminar el entorno. Por ejemplo, el primer punto rojo situado a la izquierda en dicha figura, representa la diferencia en el logaritmo de la sensibilidad al contraste obtenido entre las condiciones 1 y 2 de la tabla 4.2. Es decir, con el entorno iluminado a 200 cd/m^2 sin filtro sobre las luminarias y el test iluminado también a 200 cd/m^2 sin y con filtro.

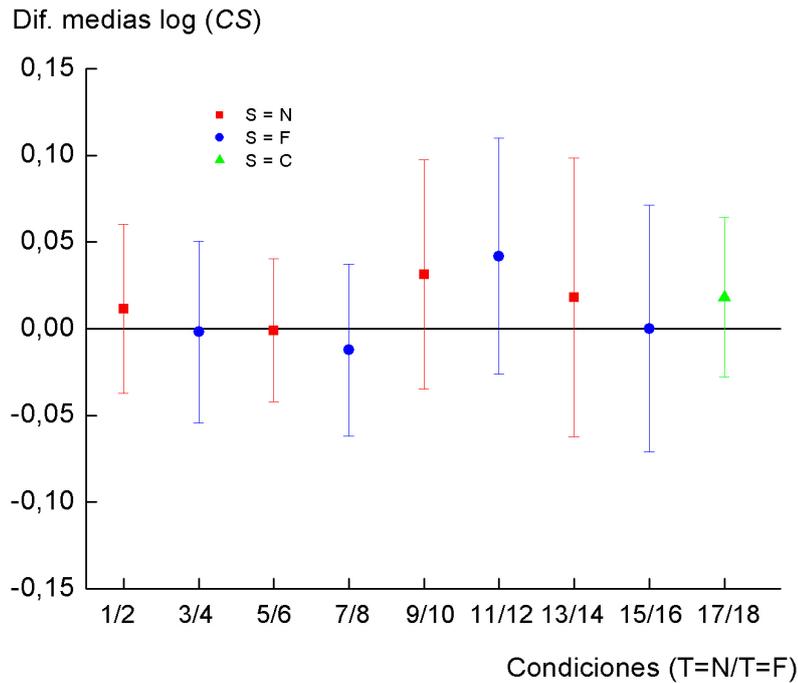


Figura 4.10 Diferencias entre los promedios del log (CS) obtenidos para cada condición de iluminación de entorno y de test, estando las luminarias de este último cubiertas o no por el filtro.

Se observa cómo las diferencias en el log (CS), con diferentes temperaturas de color del test, para cada condición de iluminación, son muy pequeñas. De hecho, ninguna de ellas presenta significación estadística (t-student y test de Wilcoxon). El aspecto más destacable del análisis estadístico es que aunque la comparación múltiple no revela significación estadística, la comparación simple sí lo hace para las condiciones 11 y 12, es decir, con 10 cd/m^2 tanto en el entorno como en el test, generado este último sin filtro y con él. Estos resultados podrían ir en la línea de los encontrados por Capilla et al., 1994, donde la sensibilidad al contraste para redes sinusoidales en condiciones de baja luminancia y con un filtro rojo arrojan resultados ligeramente superiores a los encontrados con filtros verde o azul.

Por lo tanto, queda demostrado que para una letra de $4.03'$ de tamaño angular y el rango de luminancias empleadas en el trabajo, la sensibilidad al contraste no presenta diferencias estadísticamente significativas cuando el test es iluminado con la misma luminancia pero diferente temperatura de color, en el rango de 1800 a 2800 K.

Si nos remitimos a la tabla 4.1, podremos comprobar que para la luminancia del test, la máxima variación en la temperatura de color con la que se ha trabajado es de 930 K, obtenida por los dos procedimientos ya comentados. Dicha variación es superior a la utilizada en el experimento del capítulo anterior. Podríamos concluir que incluso con la máxima variación en la temperatura de color sobre la luminancia del test, la diferencia en el logaritmo de la sensibilidad al contraste no presenta valores estadísticamente significativos. Lo cuál garantiza que el procedimiento experimental llevado a cabo en el trabajo del capítulo 3, en lo referente a la luminancia del test es adecuado y no está influenciado por los cambios en la composición espectral.

La figura 4.11, representa las diferencias de los promedios del log (CS) al emplear un entorno sin filtro o con él ($S = N/S = F$), para cada condición de luminancia determinada y para los distintos procedimientos de iluminación del test. Como ejemplo, el primer punto rojo situado a la izquierda en dicha figura, representa la diferencia en el logaritmo de la sensibilidad al contraste obtenido entre las condiciones 1 y 3 de la tabla 4.2. Es decir, con el test iluminado a 200 cd/m^2 sin filtro sobre las luminarias y el entorno iluminado también a 200 cd/m^2 sin y con filtro.

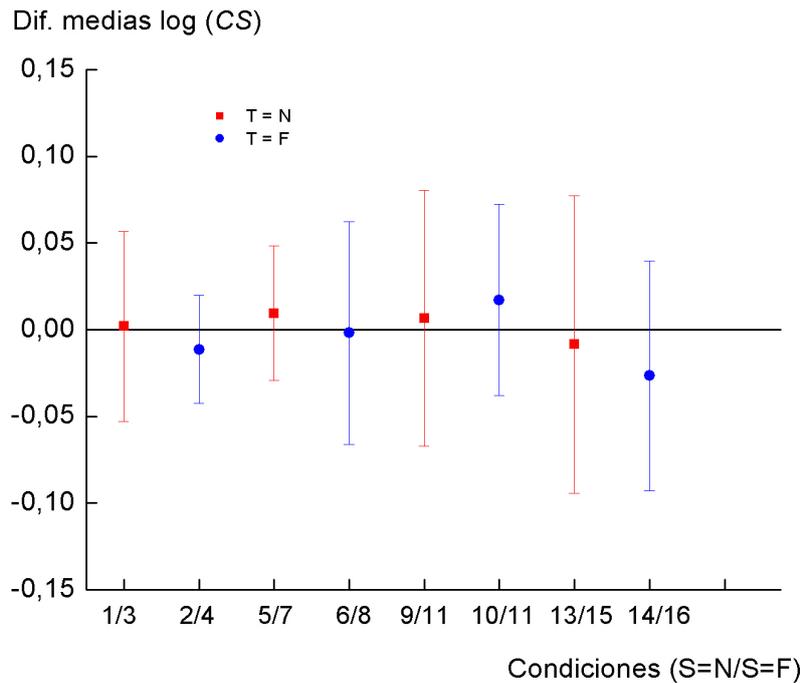


Figura 4.11 Diferencias entre los promedios del log (CS) obtenidas para cada condición de iluminación del test y del entorno, estando las luminarias de este último cubiertas o no por el filtro.

Se puede observar cómo las diferencias en el log (CS), entre los dos procedimientos empleados para obtener la luminancia del entorno son muy pequeñas ($p > 0.05$, test de Wilcoxon y t de Student). Es decir, variaciones en la temperatura de color desde 1890 hasta 2780 K, que son las que se encuentran en bajas luminancias, y que abarca el rango empleado en los experimentos previos de esta tesis, no generan diferencias significativas en las medidas de la sensibilidad al contraste. Este hecho, valida el procedimiento experimental empleado en dichos trabajos y refuerza los resultados obtenidos en el capítulo 2 y 3.

4.4. Conclusiones

En las condiciones experimentales en las que se ha desarrollado este trabajo, una luminancia del test de 200 cd/m^2 genera una sensibilidad al contraste mayor que otra de 10 cd/m^2 . Además, el comportamiento de dicha medida con la luminancia del entorno, va a depender de la relación entre ambas luminancias. Se observa un incremento del log (*CS*) al pasar de 10 a 200 cd/m^2 de luminancia del entorno cuando el test se encuentra a 200 cd/m^2 , pero una disminución de la misma con 10 cd/m^2 de luminancia del test. Estas diferencias responden al compromiso entre la luminancia de velo y el diámetro pupilar, factores que ya han sido analizados en el experimento del capítulo anterior.

Para T_C entre 1800-2800 K la sensibilidad al contraste no depende de las distribuciones espectrales originadas por la luz emitida a través de las lámparas que iluminan el test y/o el entorno. Esto significa que siempre que se observan variaciones en el log (*CS*) en experimentos con luces halógenas, dichas variaciones se deben exclusivamente a variaciones en la luminancia, lo cual valida el procedimiento experimental llevado a cabo en los capítulos 2 y 3 de esta memoria.

No obstante, es evidente que estos resultados no son extrapolables a otras temperaturas de color, ni mucho menos a distribuciones espectrales cuasi-monocromáticas en las que el papel de un tipo de conos es dominante frente a los demás en el proceso de detección o reconocimiento, y donde cabría considerar la compensación de la aberración cromática longitudinal.

La importancia fundamental de los resultados estriba en la aplicación en la práctica clínica, entorno en el que se pueden encontrar variaciones en la distribución espectral de la luz como las empleadas en este experimento. En este sentido, el trabajo realizado aporta información relevante de cara a la creación de normativas de estandarización de las condiciones en la iluminación de los gabinetes donde se realizan medidas de sensibilidad al contraste, aspecto imprescindible de cara a la consecución de medidas repetibles.

Conclusiones

1.- Tal y como se ha demostrado a lo largo de esta memoria, en las condiciones experimentales de nuestro trabajo, la sensibilidad al contraste de letras está fuertemente influenciado por las condiciones de luminancia ambiental, es decir, luminancia del entorno y del test.

2.- La luminancia del entorno influye en el reconocimiento de letras de contraste umbral, y lo hace de manera diferente para los distintos tamaños angulares de letra, aunque en todos los casos analizados, con la misma tendencia. Para una luminancia del test determinada, la sensibilidad al contraste aumenta con la luminancia del entorno debido a la miosis pupilar que prevalece sobre la luminancia de velo, hasta alcanzar un máximo, donde ambos factores ópticos se compensan, reduciéndose cuando la luminancia del entorno es mayor que la del test, situación en la que predomina la luminancia de velo.

3.- Se ha corroborado que la luminancia del test influye en el reconocimiento de letras de contraste umbral, y que las variaciones encontradas responden a procesos de adaptación neuronal.

4.- Se ha propuesto un modelo psicofísico capaz de predecir el logaritmo de la sensibilidad al contraste contemplando como parámetros los factores ópticos y neuronales determinados por la luminancia del entorno y del test respectivamente, para las condiciones experimentales en las que se ha realizado este trabajo.

5.- La composición espectral de luces halógenas como las que podemos encontrarnos en un gabinete optométrico-oftalmológico no influyen en los resultados de la sensibilidad al contraste.

6.- Un aspecto de gran relevancia clínica es que con una luminancia del test de 80 cd/m^2 la sensibilidad al contraste permanece invariante frente a cambios en la luminancia del entorno, cuando el optotipo y el test vistos desde el observador subtenden $4.03'$ y 3.8° respectivamente, siempre y cuando el campo visual del observador no presente ni fuentes puntuales deslumbrantes y reflexiones no deseadas.

7.- Los resultados encontrados crean una necesidad real de estandarización de las condiciones de luminancia de los gabinetes de medida de la sensibilidad al contraste, a la vez que sientan las bases para dicha normalización.

Bibliografía

Abrahamsson, M. and Sjöstrand, J. (1986) Impairment of contrast sensitivity function (CSF) as a measure of disability glare. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 27, 1131-1136.

Adrian, W. and Topalova, R. (1991). Transient adaptation process. A model to predict its effects on vision. In: Proceedings of the CIE 2.

Akutsu, H., Bedell, H. E. and Patel, S. S. (2000) Recognition thresholds for letters with simulated dioptric blur. *Optometry and Vision Science*, 77, 524-530.

Alexander, K. R., Xie, W. and Derlacki, D. J. (1994) Spatial-frequency characteristics of letter identification. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 11, No. 9/ A 2375.

American National Standards Institute (ANSI) (2004). ANSI Z80.21-1992 (R2004). - General Purpose Clinical Visual Acuity Charts. Optical Laboratories Association. ANSI.

Aparicio, J. A., Arranz, I., Matesanz, B., Vizmanos, J. G., Padierna, L., González, V. R., Mar, S., Menéndez, J. A. and Issolio, L. (2010) Quantitative and functional influence of surround luminance on the letter contrast sensitivity function. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 30: 188-199.

Arditi, A. (2005) Improving the design of the letter contrast sensitivity test. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 46, 2225-2229.

Arend, L. E. (1976) Response of the human eye to spatially sinusoidal gratings at various exposure durations, *Vision Research*, 16, 1311-1315.

Artal, P. and Navarro, R. (1994) Monochromatic modulation transfer function of the human eye for different pupil diameters: an analytical expression. *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 246-249.

Artigas, J. M., Capilla, P., Felipe, A. y Pujol, J. (1995) *Optica Fisiológica. Psicofísica de la visión*. Interamericana McGraw-Hill.

Atchison, D. A., Woods, R. L. and Bradley, A. (1998) Predicting the effects of optical defocus on human contrast sensitivity. *Journal of the Optical Society of America A*, 15, 2536-2544.

Bach, M., Wesemann, W., Kolling, G., Bühren, J., Krastel, H., Schiefer, U. (2008) Photopic contrast sensitivity; Local contrast perception (Photopisches Kontrastsehen; Örtliche Kontrastempfindlichkeit) *Der Ophthalmologe*, 105, 46-59.

Banks, M. S., Geisler, W. S. and Bennett, P. J. (1987) The physical limits of grating visibility. *Vision Research*, 27, 1915-1924.

Barten, P. G. J. (1999) Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality. SPIE Optical Engineering Press.

- Blackwell, H. R. (1946) Contrast threshold of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, 36, 624-643.
- Blommaert, F. J. J. and Timmers, H. (1987) Letter recognition at low contrast levels: effects of letter size. *Perception*, 16, 421-432.
- Bootsma, S., Tahzib, N., Eggink, F., Brabander, J. and Nuijts, R. (2007) Comparison of two pupillometers in determining pupil size for refractive surgery. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 85(3):324-330.
- Brown, S. M., Khanani, A. M. and Xu, K. T. (2004) Day to day variability of the dark-adapted pupil diameter. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 30, 639-644.
- Campbell, F. W., y Robson, J. G. (1968) Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 181, 576-593.
- Campbell, F. W. and Gubisch, R. W. (1966) Optical quality of the human eye. *Journal of Physiology*, 186, 558-578.
- Campbell, F. W., Kulikowsky, J. J. and Levinson, J. (1966) The effect of orientation of the visual resolution of grating. *Journal of Physiology*, (London), 187, 427-436.
- Capilla, P., Felipe, A., Pons, A. M., y Artigas, J. M.(1993) Effect of color on contrast sensitivity with two different accommodative stimuli. *Optometry and Vision Science*, 70, 24-29.
- Colombo, E., Issolio, L., Santillán, J., and Aguirre, R. (2009) What characteristics a clinical CSF system has to have?. *Optica Applicata*, 39, 415-428.
- Conrswet, T. N. (1970) Visual perception. Academic Press.
- Cox, M. J., Norman, J. H. and Norman, P. (1999) The effect of surround luminance on measurements of contrast sensitivity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 19, No. 5, 401-414.
- De Groot, S. G. and Gebhard, J. W. (1952) Pupil size as determined by adapting luminance. *Journal of the Optical Society of America*, 42, 492-495.
- De Valois, R. L., Morgan, H. and Snodderly, D. M. (1974) Psychophysical studies of the monkey vision III. Spatial luminance contrast sensitivity tests of macaque and human observers. *Vision Research*, 14, 75-81.
- De Valois, R. and De Valois, K. (1990) Spatial Vision. Oxford University Press.
- Elliott, D. B., Bullimore, M. A. and Bonette, L. (1991) Improving the reliability of the Pelli-Robson contrast sensitivity test. *Clinical Vision Sciences*, 6, 471-475.
- Fisel, D., Blais, C., Arguin, M., Tadros, K., Éthier-Majcher, C., Bub, D., Gosselin, F.(2009) The spatio-temporal dynamics of visual letter recognition. *Cognitive Neuropsychology*, 26, 23-35.
- Ginsburg, A. P. (1978) Visual information processing based on spatial filters constrained by biological data (Vols. I and II). Ph.D. Thesis, Cambridge University, Aerospace Medical Research Laboratory Report AMRL-TR-78_129. USAF, Wright-Patterson AFB, OH.

- Ginsburg, A. P. (1987) The visualization of diagnostic images. *Radiographics*, 7:1251-1260.
- Gutiérrez, M. J., Aparicio, J. A., Menéndez, J. A., Matesanz, B., Arranz, I., Vizmanos, J. G., González, V. R. and Mar, S. (2008) Invariancia de la sensibilidad al contraste frente a cambios en la luminancia de entorno. *Óptica Pura y Aplicada*, 41: 1-7.
- Hall, H. L. Miller, J. M., Greivenkamp, J. E. and Schiwiegerling, J. T. (1996) Prediction of identification difficulty of Sloan letters based on spatial frequency content. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* (Suppl.), 37, S1076.
- Hernández C., Doménech B., Seguí M. M., Illueca C. (1996) The effect of pupil and observation distance on the contrast sensitivity function. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 16(4):336-41.
- Holladay, L. L. (1926) The fundamentals of glare and visibility. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12, 271-319.
- International Organization for Standardization (1994) ISO: 9241-8., Ergonomic requirements for office work with visual display terminals, Part 8: Requirements for displayed colours.
- International Organization for Standardization (1996) ISO:8596. Ophthalmic optics -Visual acuity testing -Standard optotype and its presentation. AENOR, Madrid, pp. 1-11.
- Iwasaki, T., Tawara, A. (2002) Effects of viewing distance on accommodative and pupillary responses following a three-dimensional task. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22, 113-118.
- James, K. H., Atwood, T. P. (2009) The role of sensorimotor learning in the perception of letter-like forms: tracking the causes of neural specialization for letters. *Cognitive Neuropsychology*, 26, 70-90.
- Jansonius, N. M. and Kooijman, A. C. (1997) The effect of defocus on edge contrast sensitivity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 17, 128-132.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H. and Jessell, T. M. (2000) Principios de Neurociencia. 4ª Edición. McGraw-Hill. Interamericana.
- Kelly, D. H. (1974) Spatio-temporal frequency characteristics of color-vision mechanisms. *Journal of the Optical Society of America*, 64; 983-90.
- Kelly, D. H. (1977) Visual contrast sensitivity. *Optica Acta*, 24, 107-129.
- Kelly, D. H., y Van Norren, D. (1977) Two-band model heterochromatic flicker. *Journal of the Optical Society of America*, 67, 1081-1091.
- Kelly, D. H. (1983) Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds. *Journal of the Optical Society of America*, 73: 742-50.
- Khanani, A. M., Brown, S. M. and Xu, K. T. (2004) Normal values for a clinical test of letter-recognition contrast thresholds. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 30, 2377-2382.

- Khanani, A. M., Brown, S. M. and Xu, K. T. (2004). Normal values for a clinical test of letter-recognition contrast thresholds. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 30, 2377-2382.
- Lythgoe, R. J. (1932) The measurement of visual acuity. *Med. Res. Coun. Spec. Res. Ser.*, 173.
- Le Grand: *Optica Fisiológica*. (1991) Tomo I: El ojo como instrumento óptico. Ed. Asociación de amigos de las escuelas universitarias de óptica.
- Legge, G. E., Pelli, D. G., Rubin, G. S. and Schleske, M. M. (1985). Psychophysics of reading-I. Normal Vision. *Vision Research*, 25, 239-252.
- Liou, H-L. and Brennan, N. A. (1998) Letter contrast sensitivity function of the eye. *Acta Ophthalmol. Scand.*, 76, 325-328.
- Liou, S. W. and Chiu, C. J. (2001) Myopia and contrast sensitivity function. *Current Eye Research*, Vol. 22, No. 2, 81-84.
- Majaj, N. J., Pelli, D. G., Kurshan, P. and Palomares, M. (2002) The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Research*, 42, 1165-1184.
- McCluney, R. (1994) *Introduction to Radiometry and Photometry*. Artech House.
- Mullen, K. T. (1984) The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *The Journal of Physiology* 359: 381-400.
- National Academy of Science. National Research Council (NAS-NRC). Committee on Vision. (1983) Recommended standard procedures for the clinical measurement and specification of visual acuity. Report of working group 39. *Adv. Ophthalmol.*, 103-148.
- Nassanen, R., Kukkonen, H. And Rovamo, J. (1993) Spatial integration of band-pass filtered patterns in noise. *Vision Research*, 33, 903-911.
- Noorlander, C., Heuts, M. J. G., Koenderink, J. J. (1980) Influence of the target size on the detection threshold for luminance and chromatic contrast. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 1116-1121.
- Olzak, L. A. and Thomas, J. P. (1986). Seeing spatial patterns, *Handbook of Perception and Human Performance*, Boff, K. R., Kaufman, L., Thomas J. P. Edts., John Wiley and Sons, New York.
- Orban, G. A., Vandenbussche, E. and Vogels, R. (1984) Human orientation discrimination tested with long stimuli. *Vision Research*, 24, 121-128.
- Owsley, C., Sekuler, R. and Siemsen, D. (1983) Contrast sensitivity throughout adulthood. *Vision Research*, 23, 689-699.
- Oyster, C.W. (1999) *The Human Eye. Structure and Function*. Sinauer Associates, Inc.
- Parish, D. H., and Sperling, G. (1991) Object spatial frequencies, retinal. *Vision Research*, 31, 1399-1416.
- Patel, A. S. (1966) Spatial resolution by the human visual system. The effect of mean retinal illuminance. *Journal of the Optical Society of America*, 56, 689-694.

- Pelli, D. G., Majaj, N. J., Raciman, N., Christian, C. J., Kim, E. and Palomares, M. C. (2009). Grouping in object recognition: The role of a Gestalt law in letter identification. *Cognitive Neuropsychology*, 26, 36-49.
- Pelli, D. G., Robson, J. G. and Wilkins, A. J. (1988) The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity. *Clinical Vision Sciences*, 2, 187-199.
- Petkov, N. and Westenberg, M. A. (2003) Suppression of contour perception by band-limited noise and its relation to nonclassical receptive field inhibition. *Biological Cybernetics*, 88, 236–246.
- Plainis, S., Murray, I. J. (2005) Magnocellular channel subserves the human contrast-sensitivity function. *Perception*, 34(8), 933- 940.
- Puell, M. C., Palomo, C., Sánchez-Ramos C. and Villena, C. (2004) Normal values for photopic and mesopic letter contrast sensitivity. *Journal of Refractive Surgery*, 20, 484-488.
- Rabin, J. (1994) Luminance effects on visual acuity and small letter contrast sensitivity. *Optometry and Vision Science*, 71, 685-688.
- Rabin, J. (1994) Optical defocus: differential effects on size and contrast letter recognition thresholds. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 35, 646-648.
- Rabin, J. (1995) Two eyes are better than one: binocular enhancement in the contrast domain. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 15, 45-48.
- Rabin, J. and Wicks, J. (1996). Measuring resolution in the contrast domain: the small letter contrast test. *Optometry and Vision Science*, 73, 398-403.
- Radhakrishnan, H., Pardhan, S., Calver, R. I. and O’Leary, D. J. (2004) Effect of positive and negative defocus on contrast sensitivity in myopes and nonmyopes. *Vision Research*, 44, 1869-1878.
- Ramamurthy, V. N., Naredran, J. P., Freyssonier, R. and Raghavan, R. (2004) Determining contrast sensitivity functions for monochromatic light emitted by high-brightness LEDs. *Third International Conference on Solid State Lighting. Proceedings of the SPIE*, 5187: 294-300.
- Regan, D. and Neima, D. (1983) Low-contrast letter charts as a test of visual function. *Ophthalmology*, 90, 1192-1200.
- Rey, A., Dufau, S., Massol, S. and Grainger, J. (2009) Testing computational models of letter perception with item-level event-related potentials. *Cognitive Neuropsychology*, 26, 7-22.
- Rodieck, R.W. (1998) *The first steps in seeing*. Sinauer Associates, Inc.
- Rovamo, J., Kukkonen, H. and Mustonen, J. (1998) Foveal optical modulation transfer function of the human eye at various pupil sizes. *Journal of the Optical Society of America A*, 15, 2504-2513.
- Rubin, G. S. (1990) American Academy of Ophthalmology report. Contrast sensitivity and glare testing in the evaluation of anterior segment disease. *Ophthalmology* 97:1233-1237.

Sheedy, J. E., Bailey, I. L. and Raasch, T. W. (1984) Visual acuity and chart luminance. *American journal of optometry and physiological optics*, 61, 595-600.

Shlaer, S. (1937) The relation between visual acuity and illumination. *The Journal of General Physiology*, 21, 165-188.

Snowden, R., Thompson, P. y Troscianko, T. (2006) Basic Vision. An Introduction to Visual Perception. Hampsire, Great Britain. Oxford University Press.

Solomon y Pelli, D. G. (1994) The visual filter mediating letter identification, *Nature*, 369, 395-397.

Spadea, L., Giammaria, D., Ferrante, R. And Balestrazzi, E. (2005) Pre-excimer laser and post-excimer laser refractive surgery measurements of scotopic pupil diameter using 2 pupillometers. *Ophthalmology*, 112(6):1003-8.

Stanley, P. A. and Davies, A. K. (1995) The effect of field of view size on steady-state pupil diameter. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 15, 601-603.

Stiles, W. S. (1929) The nature and effects of glare. *The Illuminating Engineer*, 22, 304-312.

Strang, N. C., Atchison, D. A. and Woods, R. L. (1999) Effects of defocus and pupil size on human contrast sensitivity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 19, 415-426.

Strasburger, H. (1997) R_Contrast: Rapid measurement of recognition contrast thresholds. *Spatial Vision*, 10, 495-498.

Strasburger, H. and Rentschler, I. (1996) Contrast-dependent dissociation of visual recognition and detection field. *European Journal of Neuroscience*, 8, 1787-1791.

Strasburger, H., Harvey, L. O. Jr., Rentschler, I. (1991) Contrast thresholds for identification of numeric characters in direct and excentric view. *Perception & Psychophysics*, 49, 495-508.

Strasburger, H., Rentschler, I. and Harvey, L. O, Jr. (1994) Cortical magnification theory fails to predict visual recognition. *European Journal of Neuroscience*, 6, 1583-1588.

Sucs, F. E. and Uvijls, A. (1992) Contrast sensitivity in retinitis pigmentosa at different luminance levels. *Clinical Vision Science*, 7, 147-151.

Tomlinson, A. and Mann, G. (1985) An analysis of visual performance with soft contact lens and spectacle correction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 5 (1):53-7.

UNE-EN ISO:8596. "Ophtalmic optics – Visual acuity testing – Standard optotype and its presentation".

Van Nes, F. L., Bouman, M. A. (1967) Spatial Modulation Transfer in the Human Eye", *Journal of the Optical Society of America*, 57, 401-406.

Vizmanos, J. G., de la Fuente, I, Matesanz, B. M. and Aparicio, J. A. (2004) Influence of surround illumination on pupil size and contrast sensitivity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 24, 464-468.

- Vos, J.J. and Padmos, P. (1983) Stray light, contrast sensitivity and the critical object in relation to tunnel entrance lighting. DIE transactions of the International Commission on Illumination, 20th session.
- Vos, J J. (1984) Disability glare - A state of the art report. CIE Journal. 3 (2), 39-53.
- Wachler, B. S., Philips, C. L., Schanzlin, D. J. and Krueger, R. R. (1999) Comparison of contrast sensitivity in different soft contact lenses and spectacles. *Contact Lens and Anterior Eye*, 25(1): 48-51.
- Watson, A. B. and Ahumada, A. J. Jr. (2005) A standard model for foveal detection of spatial contrast. *Journal of Vision*, 5, 717-740.
- Whitaker, D., Elliott, D. B. and Steen, R. (1994) Confirmation of the validity of the psychophysical light scattering factor. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 35, 317-321.
- Wiessel, T. N. y Hubel, D. H. (1966) Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of rhesus monkey. *Journal Neurophysiology*, 29: 1115-1156.
- Winn, B., Whitaker, D., Elliott, D. B. and Phillips, N. J. (1994) Factors Affecting Light-Adapted Pupil Size in Normal Human Subjects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 35:1132-1137.
- Westland, S., Owens, H., Cheung, V. and Paterson-Stephens, I. (2006) Model of Luminance Contrast-Sensitivity Function for Application to Image Assessment Wiley Periodicals, *Colour Research Application*, 31, 315-319.
- Wong, A. C. N., Jobard, G., James, K. H., James, T. W., Gauthier, I. (2009) Expertise with characters in alphabetic and nonalphabetic writing systems engage overlapping occipito-temporal areas. *Cognitive Neuropsychology*, 26, 111-127.
- Woodhouse, J. M. (1987) Contrast sensitivity measurement, *The Optician*, 193 (5079), 19-26.
- Woods, R. L., Strang, N. C. and Atchison, D. A. (2000) Measuring contrast sensitivity with inappropriate optical correction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 20, 442-451.
- Wyszecky, G. y Stiles, W. S. (1982). Color Science. New York: Wiley. (1982).

ANEXO 1

Capítulo 2

Influencia de la luminancia de entorno en el reconocimiento de letras de contraste umbral para distintos tamaños angulares

1.- Hoja de información al candidato

2.- Consentimiento informado

3.- Cuestionario

4.- Datos de evaluación visual

Capítulo 3

Relación de la luminancia del entorno y del test en el reconocimiento de letras de contraste umbral

1.- Datos de evaluación visual

Capítulo 4:

Influencia de la temperatura de color en sensibilidad al contraste de letras

1.- Datos de evaluación visual

HOJA DE INFORMACIÓN PARA EL CANDIDATO. Capítulo 2

Titulo del trabajo:

“Influencia cuantitativa y funcional de la luminancia de entorno en la CS para distintos tamaños de letras”

En la vida cotidiana el ser humano pasa de unas condiciones de iluminación a otras constantemente, del sol a la sombra, de la iluminación que hay en casa a la de la calle, de la luz de día a la de la noche... El sistema visual se caracteriza por su gran capacidad de adaptación a cambios de luminosidad ambiente.

Pero además, el ojo está sometido a muchos estímulos visuales, y para recibir la información que se encuentra en su entorno y poder actuar consecuentemente, tiene que ser capaz de discriminar los distintos objetos que se encuentran a su alrededor bajo las diferentes condiciones de iluminación a las que se ve sometido de forma continua. Estos objetos tienen formas, tamaños y contraste muy variadas, pero los objetos con mínimo contraste son los que se encuentran en condiciones más extremas.

Con el presente estudio, pretendemos cuantificar la sensibilidad al contraste para distintos tamaños de letras en función de la luminancia. Para realizarlo tendremos que someter al participante a algunas pruebas que no tienen repercusiones visuales, pero la duración de dichas pruebas se realizará en un tiempo aproximado de tres horas.

CONSENTIMIENTO INFORMADO. Capítulo 2.

Título del estudio:

“Influencia cuantitativa y funcional de la luminancia de entorno en la CS para distintos tamaños de letras”

YO, _____
(nombre y apellidos del participante)

He leído la hoja de información que se me ha entregado.
He podido hacer preguntas sobre el estudio
He recibido suficiente información sobre el estudio.

He hablado con _____
(nombre y apellidos del investigador)

Comprendo que mi participación es voluntaria.
Comprendo que puedo retirarme del estudio:
1º Cuando quiera
2º Sin tener que dar explicaciones

Presto libremente mi conformidad para participar en este estudio.

Firma del participante

CUESTIONARIO. Capítulo 2.

El grupo de Óptica de la Visión (GOV) del Departamento de Óptica de la Universidad de Valladolid está realizando un estudio sobre la relación que tiene las distintas condiciones de iluminación sobre las capacidades visuales de sujetos jóvenes. Para llevar a cabo este trabajo necesitamos conocer algunos datos sobre su estado general y ocular, para lo cual, se ha diseñado el siguiente cuestionario. Si quiere, puede colaborar con nosotros contestando la siguientes preguntas que por supuesto **son confidenciales**.

DATOS DE FILIACIÓN _____

Apellidos

Nombre

Fecha de nacimiento

Tfno de contacto

DNI

Fecha

SALUD OCULAR _____

Indique si padece o ha padecido alguna de las siguientes alteraciones oculares:

Retinopatía diabética

Degeneración macular

Otras distrofias retinianas

Cataratas

Glaucoma

Ambliopía

Estrabismo

Otras. Indique cual:

Indique si ha sido sometido a algún tipo de cirugía ocular.

SALUD GENERAL _____

Indique si padece o ha padecido alguna enfermedad relacionada con:

Las capacidades auditivas

El sistema locomotor

El sistema cardiovascular

Trastornos hematológicos

Alteraciones del sistema

nerviosos y muscular

Sistema renal

Sistema respiratorio

Alteraciones metabólicas y
endocrinas

Trastornos mentales

Otras. Indique cual:

Si habitualmente toma algún tipo de medicamento/sustancia/droga indique cual, aunque crea que no tiene repercusiones como anticonceptivos orales o antidepresivos, etc...

DATOS DE EVALUACIÓN VISUAL. Capítulo 2.

Sujetos	Refracción				AV		
	Ojo	Esfera	Cilindro	Eje	Monocular	Binocular	
					LogMAR	LogMAR	Decimal
CH	D	-4.50	-0.75	130	0.00	-0.09	1.2
	I	-5.50			-0.02		
MJG	D	+0.50	-0.25	180	-0.21	-0.21	1.6
	I	+2.00	-0.25	180	-0.18		
SL	D	+1.00	-0.50	125	-0.10	-0.17	1.5
	I	+0.50			-0.16		
MPT	D		-0.75	175	-0.19	-0.19	1.6
	I		-1.00	175	-0.19		
GP	D	0.00			-0.17	-0.19	1.6
	I	+0.50			-0.18		
VR	D	-3.00			-0.19	-0.16	1.5
	I	-3.00			-0.12		
NB	D	-1.50	-0.75	100	-0.09	-0.11	1.3
	I	-1.75	-0.75	70	-0.09		
LL	D	-0.25	-0.25	50	-0.11	-0.17	1.5
	I		-0.50	120	-0.11		
SM	D	-4.50	-0.25	90	-0.19	-0.21	1.6
	I	-4.50	-0.25	125	-0.19		
SP	D				-0.17	-0.19	1.6
	I				-0.17		
JAM	D		-0.25	90	-0.19	-0.22	1.7 ²
	I				-0.12		
JF	D		-0.25	180	-0.21	-0.23	1.7
	I	+0.25	-0.50	180	-0.22		
DV	D	+0.50			-0.27	-0.32	2.1
	I	+0.50			-0.27		
EM	D	-3.50	-0.25	10	-0.27	-0.27	1.9
	I	-3.25	-1.00		-0.20		
ABC	D	-2.00	-0.25	90	-0.23	-0.24	1.7
	I	-1.75	-0.25	85	-0.20		
FN	D				-0.22	-0.27	1.9
	I				-0.22		

Sujetos	Refracción				AV		
	Ojo	Esfera	Cilindro	Eje	Monocular	Binocular	
					LogMAR	LogMAR	Decimal
AC	D	-0.25		120	-0.11	-0.20	1.6
	I	-0.25		70	-0.16		
LCG	D				-0.29	-0.32	2.1
	I				-0.21		
AM	D				-0.20	-0.22	1.7
	I				-0.20		
TL	D	-3.50	-0.25	180	-0.11	-0.20	1.6
	I	-3.50	-0.50	180	-0.12		
LV	D	-1.75			-0.27	-0.27	1.9
	I	-2.00	-0.50	180	-0.24		
VA	D	-2.25	-0.75	90	-0.10	-0.20	1.6
	I	-2.75			-0.11		
JAM	D	+0.50	-0.50	160	-0.28	-0.31	2.1
	I	+0.25			-0.27		
DL	D	-0.50	-1.00	105	-0.17	-0.18	1.5
	I	-0.25	-0.75	85	-0.17		
BT	D	-0.75	-1.00	105	-0.28	-0.32	2.1
	I	-1.00	-1.50	80	-0.23		
AP	D	-6.50	-2.25	180	-0.21	-0.23	1.7
	I	-6.25	-1.75	175	-0.18		
MA	D	-0.25	-0.50	90	-0.19	-0.21	1.6
	I	-0.50			-0.19		
SR	D	-6.75			-0.08	-0.09	1.2
	I	-6.25	-0.50	5	-0.08		
RS	D	-4.00			-0.22	-0.22	1.7
	I	-4.00			-0.17		
IS	D	-3.00			-0.23	-0.31	2.1
	I	-2.25	-0.50	85	-0.21		
CR	I	-0.75			-0.32	-0.32	2.1
	D	-2.25			-0.27		

DATOS DE EVALUACIÓN VISUAL. Capítulo 3

Sujetos	Refracción				AV	
	Ojo	Esfera	Cilindro	Eje	Monocular	
					LogMAR	Decimal
MJG	D	+0.50			-0.27	1.9
	I	+2.00	-0.25	180	-0.19	1.6
BTR	D	-0.75	-1.00	105	-0.27	1.9
	I	-1.00	-1.50	80	-0.22	1.7
LCG	D				-0.29	1.9
	I				-0.21	1.6
CRL	D	-0.75			-0.29	2.0
	I	-2.00			-0.29	1.9
RSE	D	-4.25			-0.21	1.6
	I	-4.50			-0.13	1.4
AC	D		-0.25	120	-0.20	1.6
	I		-0.25	70	-0.20	1.6
AM	D				-0.20	1.6
	I				-0.21	1.6
JAMM	D				-0.19	1.5
	I				-0.15	1.4
MM	D	-3.50	-0.25	180	-0.19	1.5
	I	-2.25	-1.00	160	-0.18	1.5
FRC	D		-0.50	180	-0.10	1.3
	I		-0.50	180	-0.17	1.5
FAM	D				-0.22	1.7
	I				-0.22	1.7
CAE	D	-0.25	-0.50	70	-0.18	1.5
	I	-0.25	-0.50	110	-0.16	1.4
SPN	D	-2.00			-0.12	1.3
	I	-2.25			-0.13	1.3
EPE	I				-0.20	1.6
	D		-0.25	180	-0.16	1.5
CCC	D	-0.25			-0.09	1.2
	I	-0.25			-0.09	1.2
BMM	D	-5.00	-0.75	30	-0.20	1.6
	I	-5.25	-0.75	160	-0.13	1.3
CMV	D	+0.25			-0.27	1.9
	I				-0.27	1.9
JS	I	+0.75			-0.28	1.9

DATOS DE EVALUACIÓN VISUAL. Capítulo 4

Sujetos	Refracción				AV	
	Ojo	Esfera	Cilindro	Eje	Monocular	
					LogMAR	Decimal
S A	I	-2.75	-0.25	25	-0.11	1.3
V A	D				-0.25	1.8
	I				-0.27	1.7
L N	D	-2.50	-2.00	10	-0.20	1.6
	I	-3.75	-2.00	165	-0.19	1.5
E R	I	-4.25	-0.75	105	-0.18	1.5
M C	D	-0.50	-0.25	135	-0.27	1.9
	I	-0.50	-0.25	80	-0.27	1.9
M M	I				-0.09	1.2
J Z	D		-0.50	100	-0.11	1.3
	I	+1.00	-2.50	95	-0.17	1.5
A S	I	-3.00	-2.00	170	-0.21	1.6
A L	D				-0.27	1.6
J P	D		-0.25	180	-0.18	1.5
	I	-0.25	-0.75	170	-0.20	1.6
L L	I	+0.25			-0.20	1.6
C R	D	-1.25			-0.28	1.9
	I	-2.00			-0.28	1.9
L M	D	-1.50			-0.18	1.5
C M	I	-0.25			-0.24	1.7
L H	I	+0.50	-0.25	125	-0.16	1.5
P I	I				-0.16	1.5
J S	I	+1.00			-0.23	1.7
L M	I	-4.00	-2.75	80	-0.06	1.2
S G	I	-1.75			-0.13	1.3
J M	D	-0.50	-0.25	100	-0.18	1.5