



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
TEÓRICA ATÓMICA Y ÓPTICA

TESIS DOCTORAL EN CIENCIAS FÍSICAS

TÍTULO

*Diseño y puesta a punto de una técnica de
medida de sensibilidad retiniana:
Aplicación al estudio del comportamiento
de la adaptación de retina periférica frente
a campos luminosos estacionarios y
transitorios.*

Presentada por Cristina Beatriz Martínez Matesanz
para optar al grado de
Doctora por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Dr. Juan Antonio Aparicio Calzada
Dr. Santiago Mar Sardaña
Dr. Luis A. Issolio

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 "Diseño y puesta a punto de una técnica de medida de sensibilidad retiniana: Aplicación al estudio del comportamiento de la adaptación de retina periférica frente a campos luminosos estacionarios y transitorios." realizada por Cristina Beatriz Martínez Matesanz

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. 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 "Diseño y puesta a punto de una técnica de medida de sensibilidad retiniana: Aplicación al estudio del comportamiento de la adaptación de retina periférica frente a campos luminosos estacionarios y transitorios." realizada por Cristina Beatriz Martínez Matesanz

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. 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 "Diseño y puesta a punto de una técnica de medida de sensibilidad retiniana: Aplicación al estudio del comportamiento de la adaptación de retina periférica frente a campos luminosos estacionarios y transitorios." realizada por Cristina Beatriz Martínez Matesanz

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 mi marido, a mi hijo, y a mi madre

Agradecimientos

Hace 11 años que entré a formar parte del Departamento de Óptica de la Facultad de Ciencias para desarrollar mi labor docente. Durante estos años siempre encontré el apoyo necesario tanto para realizar mi labor docente como para iniciarme en el mundo de la Investigación colaborando con el Laboratorio de Visión e Iluminación, gracias a la inestimable ayuda de Juan Antonio Aparicio, Juan González Vizmanos y Santiago Mar. Quiero hacer una especial mención a Juan González Vizmanos, que siempre ha sido un pilar para los ópticos optometristas desde que comenzamos nuestra andadura, tanto en la docencia como en la investigación, y agradecerle toda la labor que ha realizado durante estos años.

Me gustaría expresar mi agradecimiento a muchas personas que me han ayudado de una o de otra forma a la realización de esta memoria. En primer lugar a los Directores, Dr. Juan Antonio Aparicio, Dr. Santiago Mar y Dr. Luis Issolio, sin los cuales nunca hubiera podido llevar a cabo esta investigación. Todos ellos me han aportado conocimientos científicos de gran valía, y de todos ellos he aprendido grandes valores no sólo en ciencia, sino también en el terreno personal. Ellos me han enseñado a realizar un trabajo minucioso y a hacer más fáciles las situaciones difíciles y complejas. Su inestimable ayuda en todo momento y la dedicación que me han ofrecido es algo difícil de reflejar y, sobre todo, de olvidar.

Quiero hacer un especial agradecimiento mi compañera de despacho, y ahora amiga, Isabel Arranz de la Fuente. Durante estos años Isabel ha sido un gran apoyo para mí no sólo científico sino personal, por escucharme "*siempre*" y por sus consejos. A Cristina de la Rosa, que empezó a colaborar en nuestro grupo de trabajo hace dos años y ahora es una compañera a la que estimo no sólo por su gran ayuda sino por su admirable forma de ser. A Mari Paz, por las horas de su tiempo que nos ha dedicado.

Tampoco quiero olvidarme de mis compañeros de Departamento, Concha e Inma, que siempre se han preocupado por mí y me han ofrecido “*sabios*” consejos; o nuestros vecinos de pasillo “Ángel y sus chicos del grupo GOA” o Luisma, que me han ayudado con mis pequeños problemillas informáticos, a Esteban, siempre dispuesto a solucionar aquellos problemas de burocracia en los que uno se encuentra perdido, y de forma general a todas las personas del pasillo con las que, en definitiva, he crecido en el desarrollo de este trabajo.

Quiero agradecer explícitamente la imprescindible ayuda de Santiago González por la fabricación de las piezas necesarias para el montaje del dispositivo y por su paciencia para cambiar, quitar o poner la misma pieza una y otra vez. Seguramente sin él nunca hubiera podido hacer este trabajo.

Agradecer a José Antonio Menéndez su ayuda y sus consejos en el análisis estadístico, lo que ha sido imprescindible para la interpretación de los resultados, sin olvidar su serenidad cuando, una y otra vez, le pedía que me explicara algún tema.

Por su puesto, no puedo olvidar a mi familia, mi marido y mi hijo, que han sufrido las consecuencias de estar tantas horas ausente de sus vidas. Sin su apoyo y su paciencia nunca hubiera realizado mi labor de investigación. Sin olvidar a mi madre y hermanos que siempre me han animado a seguir adelante, y a mi padre, que aunque hace muchos años que no está con nosotros, siempre está presente en nuestras vidas.

PORTIA.- Esa luz que percibimos arde en mi aposento. ¡Cuán lejos lanza sus rayos esa diminuta candela! De igual modo resplandece una buena acción en un mundo malo.

NERISSA.- Cuando brillaba la luna no percibíamos la candela.

PORTIA.- Así eclipsa una gran gloria a una gloria menor; el lugarteniente de un rey brilla con tan grande esplendor como el monarca hasta el momento en que este se presenta; entonces su grandeza va decreciendo, parecida a un arroyuelo que, desde el interior de las tierras, va a perderse en la inmensidad del océano...

W. Shakespeare (Año 1600)

“El mercader de Venecia”

Acto V, Escena I

Índice

Introducción.....	01
Capítulo 1. Marco teórico.....	05
1.1 Proceso visual.....	06
1.1.1 Procesado óptico.....	06
1.1.2 Procesado neuronal.....	07
1.2 Adaptación visual.....	14
1.2.1 Mecanismos de adaptación visual.....	14
1.2.1.1 Cambios en el tamaño pupilar.....	14
1.2.1.2 Cambios en la concentración del fotopigmento de la retina.....	15
1.2.1.3 Cambios neuronales.....	16
1.2.2 Adaptación a la oscuridad.....	17
1.2.3 Sensibilidad absoluta.....	17
1.2.3.1 Sumación espacial y temporal.....	18
1.2.3.2 Localización retiniana.....	20
1.2.4 Adaptación a la iluminación.....	21
1.2.4.1 Medida de la luminancia umbral en función de la intensidad del campo de adaptación.....	21
1.2.4.2 Variaciones del estímulo de detección...	23
1.2.4.3 Variaciones del campo de adaptación....	23
1.2.4.4 Adaptación a campos transitorios.....	25
1.2.4.5 Propiedades temporales.....	29
1.3 Adaptación visual en la conducción nocturna.....	31
1.3.1 Adaptación mesópica.....	32
1.3.2 Adaptación foveal y periférica.....	34
1.3.3 Adaptación transitoria.....	35
1.3.4. Tiempo de reacción.....	36
1.3.5. Líneas de investigación.....	37
1.4 Adaptación visual en procesos degenerativos causados por la retinosis pigmentaria.....	38

1.4.1 Adaptación a la oscuridad.....	40
1.4.2 Adaptación a la iluminación.....	41
Capítulo 2. Dispositivo experimental.....	43
2.1 Objetivos del dispositivo experimental.....	44
2.2 Diseño del dispositivo experimental.....	45
2.2.1 Haces principales de detección y de adaptación.....	48
2.2.2 Test de fijación para la medida de sensibilidad retiniana foveal.....	52
2.2.3 Test de fijación para la medida de sensibilidad retiniana excéntrica.....	54
2.2.4 Cámara para el control de la posición del observador.....	56
2.2.5 Impresión dental.....	58
2.3 Puesta a punto del dispositivo.....	59
2.3.1 Control de precisión de los tiempos de cierre y apertura de los obturadores.....	59
2.3.2 Medida de la luminancia.....	61
2.3.2.1 Técnica de medida de luminancia.....	62
2.3.2.2 Medida de las fluctuaciones de la emisión de las fuentes de luz.....	64
2.3.2.3 Medida de la luminancia en condición de oscuridad absoluta.....	64
2.3.3 Calibración de los filtros.....	65
2.3.4 Control de la posición del observador.....	69
2.3.4.1 Centrado pupilar.....	70
2.3.4.2 Control del tamaño pupilar.....	72
2.4 Conclusiones.....	73
Capítulo 3. Prestaciones del montaje experimental. Comparación con experimentos previos.....	75
3.1 Análisis del método psicofísico.....	76

3.1.1 Método.....	78
3.1.1.1 Observadores.....	78
3.1.1.2 Procedimiento.....	78
3.1.1.3 Ajuste del modelo logístico: Función psicométrica.....	80
3.1.2 Resultados.....	81
3.1.2.1 Comparación de métodos psicofísicos....	81
3.1.2.2 Análisis del ajuste del modelo logístico...	82
3.1.2.3 Análisis del efecto de la fatiga.....	84
3.1.3 Conclusiones.....	89
3.2 Medidas foveales del umbral con campo de adaptación transitorio.....	90
3.2.1 Reproducción de los trabajos de Boynton en 1954 y Crawford en 1947.....	90
3.2.1.1 Método.....	91
3.2.1.2 Resultados.....	93
3.2.2 Conclusiones. Validación del sistema de medida.....	95
 Capitulo 4. Adaptación retiniana ante luminancia mesópica	 97
4.1 Adaptación retiniana. Estado del arte.....	98
4.2 Método.....	104
4.2.1 Observadores.....	104
4.2.1.1 Observadores normales.....	104
4.2.1.2 Observador con retinosis pigmentaria....	105
4.2.2 Procedimiento general.....	106
4.2.2.1 Preparación previa.....	106
4.2.2.2 Detección de umbrales.....	107
4.3 Determinación del umbral absoluto.....	109

4.4 Adaptación a campos de luminancia de 5 cd/m ²	112
4.4.1 Adaptación a un campo de adaptación estable y transitorio.....	113
4.4.1.1 Adaptación a un campo estable (LA).....	113
4.4.1.2 Adaptación a un campo transitorio (SOA).....	115
4.4.1.3 Comparación entre adaptación estable y transitoria.....	116
4.4.2 Estudio de la evolución temporal de la adaptación en fóvea, 6° y 9°.....	120
4.4.3 Análisis de resultados.....	123
4.4.3.1 Deslumbramiento incapacitante.....	123
4.4.3.2 Velocidad de adaptación.....	126
4.4.4 Primeras conclusiones.....	129
4.5 Experimentos complementarios.....	130
4.5.1 Adaptación a campos de luminancia de 0.6 cd/m ²	131
4.5.2 Adaptación a campos fotópicos.....	134
4.5.3 Comparación de la adaptación mesópica y fotópica	138
4.6 Discusión y conclusiones.....	140
Conclusiones.....	145
Líneas futuras.....	146
Bibliografía.....	149
Anexos.....	159
Anexo I. Tabla de la calibración y posición de los filtros.....	159
Anexo II. Consentimiento informado.....	160

Introducción

La retina juega un papel fundamental en el proceso visual humano que preocupa tanto a fisiólogos como a psicólogos y por tanto este tema se ha estudiado, no sólo desde la fisiología, sino también desde la psicofísica. Durante el siglo XX se han desarrollado multitud de experimentos psicofísicos que han dado lugar a una amplia bibliografía donde se estudia la retina. Uno de los temas más estudiados por la psicofísica, a nivel retiniano, es la adaptación a los cambios de iluminación. El proceso de "*adaptación a cambios de iluminación*" permite al ojo adaptarse en un rango de iluminación superior a 10^8 , siendo capaz de detectar pequeñas variaciones de luminancia en el campo visual (Blackwell, 1946). Este proceso de adaptación modifica la sensibilidad retiniana y cambia según las variaciones espaciales y temporales o según las características espectrales de la luz. La literatura clásica ha evaluado los cambios en la sensibilidad retiniana en diferentes condiciones, tanto en conos como en bastones. Entre los hallazgos más relevantes se demostró que existe una mayor pérdida de sensibilidad retiniana cuando el test se presenta inmediatamente después del encendido de un campo de adaptación (Baker, 1949), e incluso antes de encender un campo de adaptación transitorio dicha pérdida es muy notable (Crawford, 1947). Respecto a este punto, los efectos sobre la visión foveal son, en prácticamente todos los casos, los que suscitan la atención de los investigadores. Sin embargo, los experimentos donde se valora la recuperación de las capacidades visuales extrafoveales (Bichao, 1995) son mucho menos numerosos. Por otro lado estos estudios evalúan los aspectos implicados en niveles de luminancia fotópica, siendo menos conocida la adaptación en niveles de luminancia mesópica. En esta línea, se ha planteado como objetivo principal de esta memoria evaluar la sensibilidad así como el comportamiento temporal de la retina ante un campo de luminancia mesópica, tanto transitorio como estacionario, y en distintas excentricidades. El estudio de estos comportamientos retinianos espaciales y temporales también

puede ser de gran utilidad para observar la evolución retiniana en ciertas patologías de la retina. Una detección temprana de las mismas podría mejorar la perspectiva de su evolución, mediante un diagnóstico precoz o bien como sistema de apoyo a la prevención. Un estudio de este comportamiento en retinas patológicas podría ser de gran ayuda en la práctica clínica.

Para materializar este objetivo se diseñó un dispositivo, descrito en el capítulo 2, capaz de medir la sensibilidad retiniana antes, durante y después de un deslumbramiento transitorio, con una resolución angular y temporal suficiente. Para desarrollar este dispositivo, dirigido a realizar los experimentos centrales de esta memoria, se disponía de un laboratorio situado en el Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica de la Facultad de Ciencias, que ya venía siendo utilizado por el Grupo de Iluminación del Departamento para la investigación en Visión. Es en este punto donde comenzó el desarrollo del dispositivo y, por consiguiente, de esta memoria. La amplia experiencia de los directores de la tesis en el montaje de dispositivos ópticos ha sido de gran utilidad para el desarrollo del aparato diseñado, proceso que ha conllevado 4 años de trabajo hasta obtener los resultados concluyentes y definitivos.

Este grupo, en su origen, Grupo de Iluminación y Visión del Departamento de Óptica de la Universidad de Valladolid, se formó hace siete años, tras la consolidación de los estudios de Óptica y Optometría de esta universidad. La base de este grupo la conformaron los Dres. en Física, Santiago Mar Sardaña y Juan Antonio Aparicio Calzada, dos de los directores de esta tesis, con la aportación imprescindible en su principio del Dr. Juan González Vizmanos. Además, el grupo cuenta con la aportación de las Diplomadas en Óptica, Beatriz Martínez Matesanz (que opta al grado de doctor, mediante esta memoria), Isabel Arranz de la Fuente y Cristina de la Rosa. Este grupo posteriormente pasó a formar parte del Grupo de Investigación Reconocido en Óptica de la Visión (GOV), en la actualidad denominado Técnicas Ópticas de Diagnóstico (TOD). Posteriormente en el año 2006, entró en colaboración con el grupo, firmando diversas publicaciones y ponencias en congresos, el Dr. J. A. Menéndez, del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Valladolid, quien aporta su experiencia en el análisis estadístico de

resultados y en la organización y optimización de medidas psicofísicas. A la base de este grupo se han sumado las valiosísimas aportaciones del Dr Luis Issolio, uno de los directores de esta memoria, iniciando así con el Departamento de Luminotecnia de la Universidad de Tucumán (Argentina), una estrecha colaboración que se materializa con dos estancias de dicho investigador en los últimos dos años en la Universidad de Valladolid. Este grupo, al que la doctoranda pertenece desde su origen, ha trabajado en distintos proyectos de investigación subvencionados por la junta de Castilla y León como *“Evaluación de la influencia de la edad en los tiempos de recuperación de funciones visuales frente a situaciones de deslumbramiento transitorio incapacitante”* (Consejería de Sanidad de la Junta de Castilla y León con referencia UV28/04, 2004/05); *“Medida de la sensibilidad retiniana frente a deslumbramientos transitorios incapacitantes: aplicación al diseño de un dispositivo de detección temprana de patologías oculares de polo posterior.”* (Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León. Proyecto VA021A05, 2005/07) y *“Estudio De Las Variaciones De Sensibilidad Retiniana Ante Cambios Bruscos De Iluminación En Visión Foveal y Excéntrica”* (Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León VA090A08, 2008/10). Todos los trabajos realizados en estos proyectos han formado parte de una o de otra forma de esta memoria.

Para desarrollar esta memoria se han establecido 4 capítulos principales, dedicados a repasar los conceptos teóricos, a describir el dispositivo experimental y su puesta a punto, y a presentar los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados.

El capítulo 1 desarrolla los conceptos fundamentales que forman el marco teórico sobre el cual se basa esta memoria. Dichos conceptos básicos pasan por el entendimiento del proceso visual y la adaptación del sistema visual a la luz, principalmente a cambios transitorios de iluminación. Sin olvidar el proceso de la adaptación visual en situaciones de conducción nocturna y en sujetos con retinosis pigmentaria, como dos de las aplicaciones directas de los experimentos de esta memoria.

El capítulo 2 describe de forma detallada cómo se construyó el dispositivo experimental que se ha utilizado para realizar los experimentos centrales. El dispositivo, cuya finalidad es

proporcionar un estímulo de detección y un campo de adaptación, variables en tamaño, tiempo y luminancia, permitirá hacer medidas tanto foveales como excéntricas. Para poner en funcionamiento dicho dispositivo se realizaron pruebas para controlar los tiempos de cierre y apertura de los obturadores, la medida de la luminancia, la transmitancia de los filtros y el centrado del observador.

En el capítulo 3 se describen las primeras medidas realizadas con el dispositivo. Estas medidas tienen como objetivo comparar los distintos métodos psicofísicos de medida de la luminancia umbral con el fin de optar por el método más adecuado. En este capítulo se muestra también una reproducción de dos experimentos clásicos (Crawford, 1947; Boynton, 1954), con el fin de comprobar la solidez, fiabilidad y precisión de dicho dispositivo.

El capítulo 4 es la parte central de esta memoria. En este capítulo se realizan medidas de sensibilidad retiniana y de evolución temporal de la retina en condiciones escotópicas, mesópicas y fotópicas, tanto para sujetos normales como para un sujeto con retinosis pigmentaria. Este capítulo muestra resultados en cuanto a la sensibilidad y la velocidad de adaptación de la retina, comparando los comportamientos de los sujetos normales con el patológico, y extrayendo conclusiones relevantes en cuanto al comportamiento retiniano según la zona de la retina medida y según el nivel de luminancia del campo de adaptación.

CAPÍTULO 1

Marco Teórico

Los conceptos teóricos desarrollados en este Capítulo 1 pretenden resaltar aquellos aspectos esenciales que ayudarán a una mejor comprensión de los experimentos realizados en esta memoria. Dichos trabajos han sido realizados con un dispositivo experimental que se ha diseñado con el propósito de estudiar el comportamiento del sistema visual humano ante diferentes condiciones de iluminación, con variaciones de tamaño y tiempo tanto del estímulo como del campo de adaptación.

En este capítulo se describe, por tanto, el procesamiento de la imagen, iniciado por el sistema óptico del ojo para su posterior procesamiento neuronal. En este proceso visual juega un papel imprescindible la luminancia del objeto y del entorno, así como la capacidad de adaptación del sistema visual humano a los cambios de la misma. Entre los aspectos de interés en la adaptación visual se analizará la pérdida en la eficiencia visual debido a cambios bruscos de iluminación. En los dos últimos apartados de este capítulo se resaltan los aspectos relevantes en el proceso de adaptación visual durante la conducción nocturna y en pacientes con retinosis pigmentaria. Esto es importante para comprender mejor las aplicaciones de los resultados obtenidos en los experimentos realizados en esta memoria.

1.1 El proceso visual

El proceso visual completo se desarrolla a través de un procesado óptico seguido de un procesado neuronal. Ante un objeto externo, la luz llega a nuestros ojos formando una imagen del objeto en la retina y generando señales eléctricas en los receptores que se transmiten, a través del nervio óptico, al cerebro. Este proceso visual se completa cuando se produce el reconocimiento del objeto con todas sus cualidades. El proceso visual es complejo ya que se implican desde las estructuras oculares hasta el propio cerebro y sus interconexiones. Este mecanismo complejo de la visión permite identificar objetos según su tamaño, forma, color y movimientos, y lo hace en condiciones muy variables de luminancia.

1.1.1 Procesado óptico

Si analizamos la estructura ocular de delante hacia atrás encontramos diferentes componentes ópticos fundamentales para la formación de la imagen en la retina. La capa externa del ojo tiene dos partes: la córnea y la esclera. La luz pasa a través de la córnea, la cual presenta una cierta curvatura que contribuye a cambiar la dirección de la luz enviándola a una pequeña apertura denominada pupila, que está directamente implicada en los mecanismos de la adaptación visual. Por otra parte, el iris es una membrana situada detrás de la córnea y delante del cristalino, que controla el tamaño de la pupila. La pupila actúa como diafragma de apertura variando su diámetro. La dilatación y constricción pupilar es causada por el músculo dilatador y el músculo esfínter del iris respectivamente. Según el nivel de luz, la pupila puede variar su diámetro en un rango aproximado de 2 a 8 mm. La variación del tamaño pupilar juega un papel fundamental en la calidad de la imagen retiniana. Un diámetro grande aleja al sistema de la paraxialidad aumentando las aberraciones ópticas, un diámetro pequeño mejora la profundidad de campo 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.

Con un sistema de visión maxwelliana se forma la imagen del filamento de la fuente de luz sobre la pupila de entrada del ojo. Si el área del filamento es menor que el área pupilar, toda la luz de la fuente entrará en el ojo del observador permitiendo una mayor iluminación retiniana. En los experimentos realizados en esta memoria se ha utilizado este sistema de visión.

Posterior a la pupila y antes de que la luz llegue a la retina se encuentra el cristalino, que se encarga de la acomodación. La acomodación consiste en un aumento de la potencia refractiva de este cristalino que se consigue mediante un incremento de su espesor y de la curvatura de sus superficies, gracias a la contracción del músculo ciliar. En las medidas realizadas en esta memoria se ha evitado que los observadores pongan en juego la acomodación.

1.1.2 Procesado neuronal

Cuando la luz pasa a través de los medios oculares llega a la retina. La retina es una membrana fotosensible que a su vez se considera parte del cerebro. Es por tanto el primer paso dentro del procesado neuronal de la imagen. En la retina hay 130 millones de células que van a transmitir, a través del nervio óptico, los impulsos nerviosos hasta el corteza visual, donde va a tener lugar la representación de las imágenes. La primera capa de la retina, esencial para el procesado visual, es el epitelio pigmentario. El epitelio pigmentario contiene abundante melanina, que es un pigmento oscuro que impide la reflexión de la luz por todo el globo ocular, evitando la iluminación difusa en la retina y contribuyendo a mejorar la calidad de la imagen. El epitelio pigmentario mantiene el metabolismo de la vitamina A para transferirla a los fotorreceptores y comenzar el proceso de la fototransducción participando, además, en la renovación de los segmentos externos de los fotorreceptores. Esto significa que, para un correcto funcionamiento de los fotorreceptores, el epitelio pigmentario debe estar en perfecto estado. Los fotorreceptores de la retina son los conos y bastones. La distribución de los conos y bastones en la retina tiene una relación directa con el proceso de la adaptación visual. En la figura 1.1 se representa la distribución de fotorreceptores en la retina. En la retina se puede establecer una

subdivisión, según Polyak (1941), en función de la densidad de fotorreceptores y que se describe en la tabla 1.1 (Artigas *et al*, 1995).

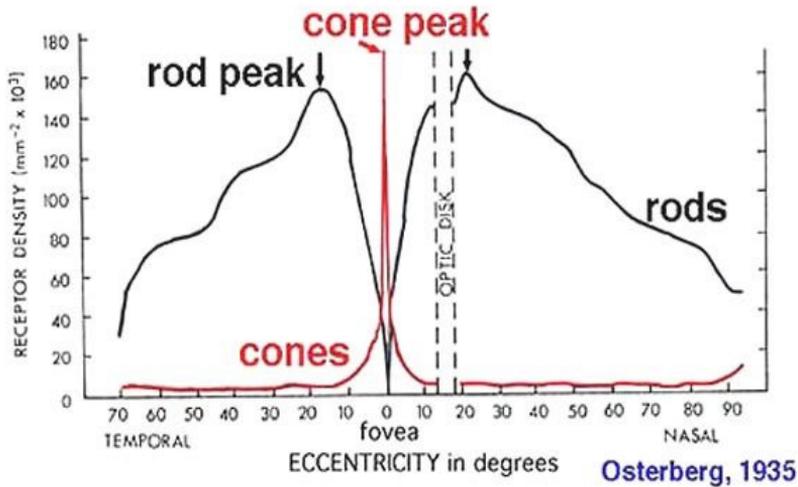


Figura 1.1. Densidad de fotorreceptores según la excentricidad.

Región retiniana central o mácula	Características	Diámetro lineal (mm)	Diámetro angular (°)
Fóvea	Depresión ligera	1.5	5.2
Foveola	Depresión acusada	0.3	1.4
Isla central	Conos más finos	0.05 - 0.075	0.17 - 0.24
Zona libre de bastones		0.5 - 0.6	1.7 - 2 1 (Osterberg, 1935)
Parafóvea	Anillo circular de 0.5 mm alrededor de fóvea	2.5	8.6
Perifóvea	Anillo circular de 1.5 mm alrededor de fóvea	5.5	19

Tabla 1.1. Subdivisión de la retina en regiones según Polyak, 1941 (J.M Artigas *et al*, Óptica Fisiológica: psicofísica de la visión, 1995, pp 18).

En la retina hay entre 6 y 7 millones de conos, aunque su mayor densidad está en la zona foveal, sobre todo en la foveola, que subtiende aproximadamente 1.4° y que está compuesta únicamente por conos. Los experimentos foveales, llevados a cabo en esta memoria, se realizan con un tamaño de estímulo menor de 1° y por tanto la zona está libre de bastones. El número de bastones es mucho mayor que el de conos, alcanzando el orden de 100

millones distribuidos prácticamente en la totalidad de la superficie de la retina. Los bastones no participan en la visión del color y son sensibles a niveles bajos de iluminación, mientras que los conos sí participan en la visión al color y son sensibles a niveles altos de iluminación. Las diferencias funcionales entre conos y bastones constituyen la base de la *teoría de la duplicidad*. En la tabla 1.2 se describen estas diferencias entre conos y bastones:

Tabla 1.2 Diferencias entre conos y bastones	
Bastones	Conos
Gran sensibilidad a la luz, especializados en la visión nocturna	Menos sensibilidad a la luz, especializados en la visión diurna
Más fotorpigmento, capturan más luz	Menos fotorpigmento
Gran amplificación, detección de fotones únicos	Menor amplificación
Baja resolución temporal: respuesta lenta, tiempo de integración prolongado	Gran resolución temporal: Respuesta rápida, tiempo de integración breve
Más sensibles a luz dispersa	Más sensibles a los rayos axiales directos

Tabla 1.2. Diferencias entre conos y bastones (Kandel *et al*, 2000, Principios de neurociencia, pp 509).

También existen diferencias morfológicas entre conos y bastones. En general, los bastones poseen una morfología más alargada y delgada que los conos. En la periferia, los bastones tienen un diámetro de 2 a 5 micras mientras que los conos tienen un diámetro de 5 a 8 micras. Sin embargo, en la fovea los conos tienen un diámetro de 1.5 micras. Tanto conos como bastones están formados por un segmento externo y un segmento interno que se proyectan hacia el epitelio pigmentario. Los segmentos externos de los bastones están constituidos por discos membranosos, aislados de la membrana plasmática, mientras que en los conos no existen discos membranosos aislados sino múltiples repliegues de la membrana plasmática. El segmento externo de los bastones es el doble de largo que el de los conos.

Sin embargo todos los fotorreceptores contienen, en su segmento externo, pigmento fotosensible que sirve para transformar la energía electromagnética en señales eléctricas mediante la fototransducción. La fototransducción es la base bioquímica para comprender la adaptación a la luz y a la oscuridad. Todos los pigmentos absorben cuantos de todas las longitudes de onda, aunque no son igualmente sensibles a todas ellas. Este pigmento consiste en una proteína, la opsina, unida al *11 - cis - retinal*, que es el responsable de la absorción de la luz. En el momento de la absorción de la luz el *11 - cis - retinal*, a través de un proceso enzimático, se convierte en *todo - trans - retinol* liberando la opsina. Durante este proceso la opsina desencadena la hiperpolarización de la membrana y la consecuente transmisión de la señal eléctrica. El *todo - trans - retinol* llega al epitelio pigmentario donde se transformará de nuevo en *11 - cis - retinal* (forma activa de la vitamina A) para unirse a la opsina en el proceso de regeneración.

De este modo se envía información, en forma de señal eléctrica, desde los fotorreceptores a las células ganglionares. Entre los fotorreceptores y las células ganglionares existen tres clases de interneuronas: las células bipolares, las células horizontales y las amacrinas (figura 1.2). Estas células no se limitan simplemente a transmitir las señales de los fotorreceptores a las células ganglionares, sino que también combinan las señales procedentes de varios fotorreceptores, de forma que las respuestas eléctricas producidas en las células ganglionares dependen de forma esencial de los patrones espaciales y temporales de la luz que estimula la retina (Kandel *et al*, 2000).

La información que llega a las células ganglionares puede llegar de varios fotorreceptores, como es el caso de los bastones donde existe una convergencia de muchos fotorreceptores a una célula ganglionar. En la retina periférica hay más bastones que conos y por tanto una importante convergencia. Esto supone un gran efecto sumatorio sobre la célula ganglionar y da lugar a una gran sensibilidad. Sin embargo, el hecho de que varios bastones estén conectados a terminaciones nerviosas comunes reduce el grado de detalle que es posible distinguir con estos receptores. Cuando un solo fotorreceptor conecta con una célula ganglionar no existe convergencia como ocurre en el caso de los conos. Esto

permite una resolución de los detalles finos de una imagen. Este fenómeno de sumación será visto con detalle en el apartado 1.2.3.1.

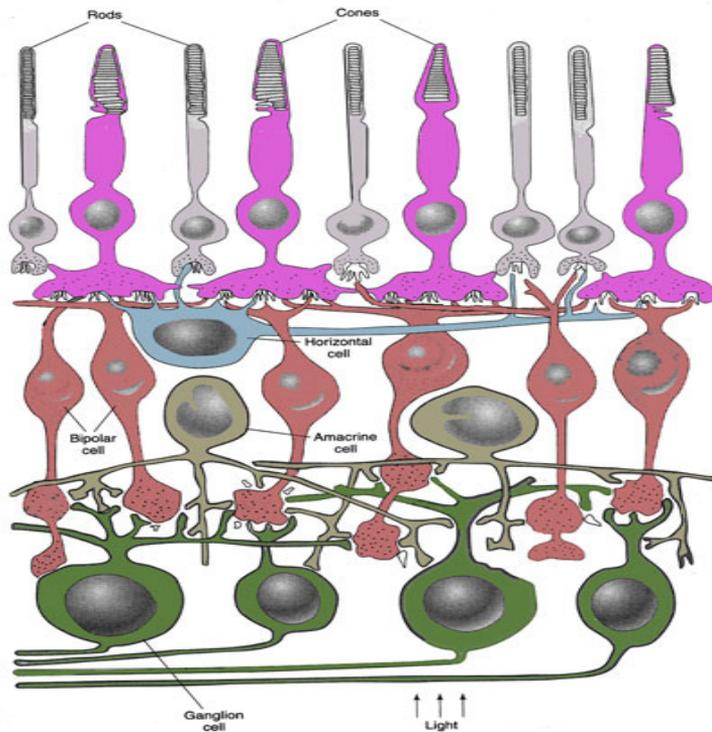


Figura 1.2. Conexiones sinápticas en la retina.
(www.skidmore.edu/~hfoley/images/Retina.jpg)

En el procesado de la imagen el campo receptivo juega un papel decisivo. El campo receptivo es la zona del campo visual dentro de la cual la neurona responde al estímulo de luz (Artigas *et al*). Las dimensiones y las propiedades del campo receptivo de la célula ganglionar están determinadas por el número de fotorreceptores que están conectados con ella a través de las células bipolares y por el tipo de conexiones. Cuando convergen muchos receptores sobre una célula ganglionar el campo receptivo será muy amplio, típico de bastones, cuando convergen menor número de fotorreceptores será pequeño, típico de conos. Las células ganglionares tienen un campo receptivo aproximadamente circular con una zona central y una zona periférica, y pueden ser denominadas ON/OFF u OFF/ON. Las células ganglionares con

centro ON se activan cuando se ilumina sólo el centro de su campo receptivo, en cambio si se ilumina el entorno OFF, este no se activa, a esto se la ha denominado como una respuesta inhibitoria. De tal forma que, si se iluminara todo el campo receptivo, ambas respuestas se suman sin producir cambios en la respuesta celular. Las células ganglionares con centro OFF producen la máxima respuesta cuando su centro receptivo está en la oscuridad pero no así su periferia. Esto significa que cuando el objeto que se quiere detectar es mayor que el campo receptivo, para obtener una respuesta, es imprescindible que haya un cambio de iluminación dentro del campo receptivo. Esto quiere decir que las células ganglionares están especializadas en detectar variaciones locales de iluminación. Responden, por tanto, a diferencias de luminancia más que a valores absolutos.

Existen dos grupos de células ganglionares funcionalmente distintas, que transportan las señales procedentes de los mismos fotorreceptores a través de vías paralelas. Las células ganglionares M (10 % de las células), cuyos campos receptivos son grandes, responden a objetos grandes, y en movimiento, y a cambios rápidos o respuestas transitorias a la iluminación. Las células ganglionares P (90 % de las células), que tienen campos receptivos pequeños, responden a los detalles y formas, a cambios lentos y están implicadas en visión en color (Kandel *et al*, 2000). En la tabla 1.3 se pueden observar las diferencias de sensibilidad entre las vías M y P. En los experimentos llevados a cabo en esta memoria se utilizan estímulos de luz policromática tanto de tipo transitorio como estable.

Tabla 1.3.		
Características del estímulo	Sensibilidad	
	Células M	Células P
Contraste al color	No	Sí
Contraste a la luminancia	Mayor	Menor
Frecuencia espacial	Menor	Mayor
Frecuencia temporal	Mayor	Menor

Tabla 1.3. Diferencias de sensibilidad de las células M y P según las características del estímulo (Kandel *et al*, 2000, Principios de Neurociencia, pp 530).

Los axones de las células ganglionares forman el nervio óptico, el quiasma y el tracto óptico. En el quiasma, los dos nervios ópticos entrecruzan la información. Al núcleo geniculado lateral derecho llega toda la información del hemicampo visual izquierdo y viceversa. Los dos núcleos geniculados laterales (situados en el tálamo) son el destino de la mayoría de los axones de las células ganglionares y en ellos establecen conexiones sinápticas con células cuyos axones llegan a la corteza visual. Cada núcleo está organizado en seis capas distintas. El derecho recibe la información del campo visual izquierdo: las capas 1, 4 y 6 reciben los axones del ojo izquierdo; las capas 2, 3 y 5 los del ojo derecho. Por otra parte, las capas 1 y 2 (capas magnocelulares) reciben información de las células tipo M, mientras que las capas 3-6 (capas parvocelulares) están unidas a las células tipo P. Entre estas capas hay otras capas intermedias más pequeñas, que también reciben información de la retina. Existe una parte de células ganglionares que no están unidas al tálamo sino a otras estructuras. Unas envían información al hipotálamo, interviniendo en la sincronización de los ritmos biológicos con el ciclo diario de luz-oscuridad. Otras, unidas al cerebro medio, intervienen en procesos motores: control del tamaño de la pupila y del movimiento de los ojos (Oyster, 1999). Los axones de las células de los núcleos geniculados laterales acaban en una zona de la corteza visual, denominada área 17 o corteza estriada. En esta área existe una capa principal, capa 4, para la recepción de los impulsos procedentes del núcleo geniculado lateral y que a su vez se divide en 4 subcapas.

Los axones de las células M acaban en una subcapa y los de las células P en otra, de forma que se sigue manteniendo la organización espacial de la retina. La información se distribuye a partir de la capa 4 hacia las demás capas. Las conexiones son principalmente radiales, formando columnas verticales que incluyen a todas las capas. Es en la corteza visual donde se produce el último eslabón del proceso visual, originándose la reconstrucción de distancias, colores, movimientos y formas de los objetos que nos rodean.

Los órganos sensoriales, por tanto, han transformado los estímulos en señales electroquímicas, las cuales han sido transmitidas al cerebro, dónde han sido interpretadas, concluyendo así el proceso visual completo.

1.2 Adaptación visual

El sistema visual humano es capaz de adaptarse a condiciones de luminancia muy extremas pasando de ambientes en completa oscuridad hasta ambientes extremadamente iluminados. Este proceso de la adaptación visual ha sido estudiado desde la psicofísica, mediante la presentación de estímulos de diferentes condiciones de tamaño, tiempo y luminancia. Para comprender mejor este proceso en este apartado se describirán los mecanismos de adaptación, la adaptación a la oscuridad, los conceptos de sumación espacial y temporal y un último apartado dedicado a la adaptación a la iluminación.

1.2.1 Mecanismos de adaptación visual

El sistema visual de los vertebrados está altamente especializado en la detección y análisis de patrones de luz distribuidos en tiempo y espacio. Se ha comparado el ojo humano con una máquina fotográfica, donde una cantidad excesiva de luz produce una sobrexposición de la imagen, pero ajustando la cantidad de luz que entra en la cámara o cambiando la sensibilidad de la película se conseguirá una imagen con la exposición adecuada. Este poder de adaptación del ojo se debe a los mecanismos de adaptación del mismo producidos por los cambios en el tamaño pupilar, por los cambios en la concentración del fotopigmento de la retina y por los mecanismos postreceptores.

1.2.1.1 Cambios en el tamaño pupilar

El tamaño pupilar puede ser alterado ante un cambio de iluminación e incluso, cuando el nivel de luminancia es invariable, el tamaño pupilar oscila constantemente (Hart, 1992). Sin embargo, las variaciones de la iluminación que llegan a la retina, debidas a la variación del tamaño pupilar, sólo serán poco más de 1 unidad logarítmica como máximo. Esto significa que la implicación del tamaño pupilar en el proceso de la adaptación visual es sólo una pequeña fracción de la capacidad de adaptación del observador. En cualquier caso, el dispositivo diseñado en esta memoria, utiliza un sistema de iluminación maxwelliana, garantizando que en todo momento la totalidad del haz entre en el ojo, siempre y cuando el

diámetro pupilar sea de mayor tamaño que el filamento de la fuente como ya se comentó en el apartado 1.1.1.

1.2.1.2 Cambios en la concentración del fotorpigmento de la retina

Los cambios en el estado de concentración del pigmento siempre se han considerado como uno de los mecanismos principales de adaptación. El pigmento de los conos, siendo mucho menos abundante y menos estable que el de los bastones, es más difícil de estudiar. Sin embargo, la similitud de todos estos pigmentos apunta a que el mecanismo molecular de la fototransducción es el mismo. En presencia de luz estable se reduce la capacidad del fotorreceptor de absorber cuantos de luz, debido a que la regeneración del fotorpigmento es más lenta que la pérdida del mismo. Cuanto más se aumenta la intensidad de la luminancia del campo de adaptación más disminuye el número de fotorpigmentos capaz de absorber luz. Esto significa que hay que aumentar la intensidad del estímulo para que este sea detectado.

En los bastones, se produce la saturación antes de que disminuya, ligeramente, el contenido de fotorpigmento. En este caso el blanqueo o disminución del fotorpigmento parece tener poco que ver con la adaptación, sólo una pequeña parte del fotorpigmento se ha blanqueado cuando ya se ha producido la saturación.

En los conos, la disminución del fotorpigmento contribuye poco a la pérdida de sensibilidad cuando la iluminación retiniana es menor de $4 \log \text{td}$, pero mucho si es mayor. El blanqueamiento del fotorpigmento previene de la saturación de los conos. Cuando la luz es estable se reduce el contenido de pigmento y la consiguiente capacidad de absorción de cuantos de luz, disminuyendo la intensidad efectiva del campo de adaptación. Este proceso de blanqueamiento es uno de los primeros mecanismos de adaptación multiplicativa. Los fenómenos de adaptación están influenciados, por tanto, por el equilibrio entre transducción y regeneración.

Las primeras teorías sobre la adaptación se basaban en la idea de que la adaptación a la luz era producida por este blanqueamiento y que la adaptación a la oscuridad era producida por la regeneración del pigmento, sin embargo parece que el

blanqueamiento del pigmento no es la única razón en el proceso de adaptación. Este tipo de procesos fotoquímicos son denominados procesos lentos de adaptación y aunque una parte importante de la adaptación tiene lugar en conos y bastones, la adaptación visual del sistema humano no puede ser explicada únicamente por estos procesos. Aparte del proceso fotoquímico de los fotorreceptores existen otros mecanismos, que por otro lado, previenen de la saturación y favorecen el proceso de adaptación. La rapidez en la respuesta ante algunas situaciones visuales implica que otros sistemas de adaptación están en juego como son los cambios neuronales. Estos procesos son denominados procesos rápidos de adaptación. En los experimentos de esta memoria, la cantidad de fopigmento blanqueado siempre ha sido menor al 0.01%, y por tanto insignificante (Blakemore and Rushton, 1965).

1.2.1.3 Cambios neuronales

Los cambios neuronales tienen una resolución temporal del orden de milisegundos. La respuesta neuronal producida por un fotorreceptor depende de la reacción química producida por la acción de la luz sobre el fopigmento. Si las reacciones ocurren en su nivel máximo, la cantidad de luz que alcanza el fopigmento aumenta y la célula no puede completar la señal del aumento produciendo la saturación. Por encima de ese nivel el aumento de la intensidad de luz producirá cambios más y más pequeños en el promedio de respuesta de la célula. Esto es lo que se ha denominado como *respuesta de compresión*.

Los bastones y los conos se conectan a través de una red de neuronas en la retina que van a formar el nervio óptico, como se vio en el apartado 1.1.2. Una revisión bibliográfica de Graham (1992) resume los modelos utilizados para explicar los fenómenos de adaptación. En este trabajo se sugiere que, en los cambios bruscos de la luminancia umbral producidos con el encendido del campo de adaptación, no se implican los mecanismos multiplicativos y sustractivos, y por tanto se produce una inmediata saturación, tanto en conos como en bastones. En cambio, la luminancia umbral medida ante un fondo estable pone en juego ambos mecanismos. El proceso multiplicativo actúa disminuyendo, de alguna forma, la intensidad del fondo y del estímulo, mientras

que el proceso sustractivo disminuye la luminancia efectiva del fondo.

1.2.2 Adaptación a la oscuridad

Si a un sujeto se le presenta un campo luminoso que luego desaparece, la sensibilidad retiniana de este sujeto necesita un tiempo para recuperar su estado inicial. Este tiempo, en el que recupera su sensibilidad retiniana absoluta, es lo que se denomina tiempo de adaptación a la oscuridad. En muchas ocasiones estamos expuestos a luces repentinas, como por ejemplo las de un automóvil en dirección contraria durante la noche, produciendo una fuerte pérdida de sensibilidad y requiriendo de un tiempo más o menos prolongado para la recuperación de la misma. Las curvas de adaptación a la oscuridad reflejan una acción combinada de conos y bastones, mediante una curva bifásica, mostrando un recobro del sistema de conos mucho más rápido que el de bastones. Sin embargo, los parámetros tanto del estímulo como los del campo de preadaptación influyen en el tiempo de adaptación a la oscuridad. A medida que se aumenta la intensidad del campo de preadaptación se puede observar una primera fase más larga, donde predominan conos, y otra fase más retrasada en el tiempo, donde predominan bastones (Hetch, 1937). Por otro lado, cuanto más breve es la luz de preadaptación, más rápido se recupera la sensibilidad retiniana (Wald and Clark, 1937). Aunque puede haber distintos tiempos de adaptación a la oscuridad con las variaciones de estos parámetros, todos los trabajos apuntan a que, en cualquier caso, existe una adaptación completa en aproximadamente 30 minutos. En los experimentos de esta memoria todos los observadores tuvieron un tiempo de adaptación a la oscuridad de 30 minutos, previo a cualquier medida realizada. Aunque este tiempo es el adecuado para la adaptación a la oscuridad completa después de presentar un campo de preadaptación luminoso intenso, ninguno de los observadores fue expuesto a iluminaciones intensas antes del periodo de adaptación.

1.2.3 Sensibilidad absoluta

La sensibilidad absoluta se refiere siempre a la condición en la que el ojo está completamente adaptado a la oscuridad. Como se

ha comentado en el apartado 1.2.2, el sistema visual alcanza su máxima sensibilidad absoluta en oscuridad después de 30 minutos o más. En estas condiciones, que el observador pueda detectar o no un cambio de luminancia, varía según las características del tamaño, tiempo y localización retiniana. En psicofísica, es habitual referir la sensibilidad retiniana absoluta como el valor inverso del incremento de la luminancia umbral de dicho estímulo (Baker, 1949).

1.2.3.1 Sumación espacial y temporal

El sistema visual humano suma los efectos de la luz en espacio y tiempo. En este apartado se examinará la relación del tamaño y duración del estímulo con la luminancia umbral del estímulo y por tanto con la sensibilidad retiniana absoluta.

La sumación espacial se refiere a la habilidad del ojo de sumar cuantos de luz sobre una cierta área de la retina. Esta área, donde se produce la sumación completa, es denominada área crítica. La sumación espacial ocurre debido a la convergencia de los fotorreceptores sobre las células ganglionares, como se vio en el apartado 1.1.2. La luminancia necesaria del estímulo (L_e), para que este sea detectado, disminuye con un aumento del área (A_e). Esto ocurre sólo dentro del área crítica, más allá de esta área la intensidad de la luminancia del estímulo, para que este sea percibido, se mantiene constante por mucho que aumente el área. Esta relación está determinada por la Ley de Ricco (1.1). Según esta ley, la luminancia es la mitad cuando el área es el doble manteniendo, su producto, un valor constante (K_s).

$$K_s = A_e \times L_e \quad (1.1)$$

(K_s : constante; A_e : Área del estímulo; L_e : luminancia del estímulo)

En cuanto a los bastones, se puede decir que existe una sumación espacial completa cuando el área está entre $30'$ y 1° (Hallett, 1963) pero, sin embargo, con una excentricidad de 39° dicha sumación completa puede conseguirse incluso con un área de 4.7° (Scholtes & Bouman, 1977). El tamaño de los campos receptivos varía con la excentricidad y explica la razón de por qué

el área crítica también varía con la excentricidad (Shapley, 1984) (Figura 1.3). La sumación espacial tiende a ser mayor para estímulos más breves, es decir, aumentando la duración del estímulo disminuye el área crítica (Barlow, 1958). Para los conos la sumación espacial completa se estima para un área de 6', un valor, que, siendo demasiado pequeño, ha sido cuestionado por algunos autores (Brindley, 1970).

El sistema visual también suma los efectos de la luz a través del tiempo. Durante este tiempo, denominado tiempo crítico, un incremento en la duración del estímulo (t_e) se traduce en una disminución de la luminancia necesaria en el estímulo (L_e) para que este sea detectado. Sin embargo para tiempos de exposición mayores que la duración crítica la luminancia del estímulo para que este sea detectado permanece constante, por mucho que aumente su tiempo de exposición. Esta relación está regulada por la Ley de Bloch (1.2), la cual implica que la luminancia del estímulo (L_e) es la mitad cuando el tiempo de exposición (t_e) es el doble, manteniendo, su producto, un valor constante (K_t).

$$K_t = t_e \times L_e \quad (1.2)$$

(K_t : constante; t_e : tiempo de exposición del estímulo; L_e : luminancia del estímulo)

El tiempo crítico, sin embargo, es mayor cuando el fondo es más luminoso y cuando el estímulo es más pequeño. En los bastones la sumación temporal es completa para tiempos de hasta 100 ms y no parece verse afectada por cambios en el tamaño del estímulo (Graham, 1935). En lo referente a los conos, el tiempo crítico es menor para mayor área del estímulo, por ejemplo para un área de 1' está entre 100 ms y 200 ms, pero para un área de 20' el tiempo crítico es de 50 ms (Karn, 1936).

Todos estos trabajos estiman el área crítica, con una dependencia de la duración del estímulo, y el tiempo crítico con una dependencia del área del mismo. Estos valores son diferentes para conos y bastones, y también son diferentes según la excentricidad retiniana.

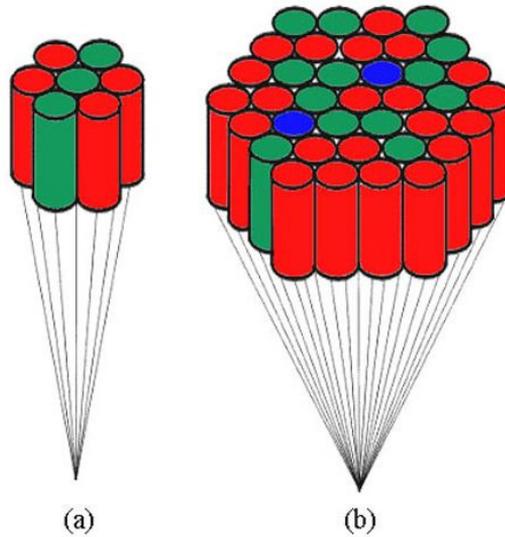


Figura 1.3. Ejemplos de los campos receptivos para 7° de excentricidad (a) y para 35° de excentricidad (b).
(<http://webvision.med.utah.edu/imageswv/KallSpat26.jpg>)

1.2.3.2. Localización retiniana

Si el tamaño y la duración del estímulo son importantes, también resulta relevante la localización retiniana. Según un estudio llevado a cabo por Riopelle & Bevan (1953) para un estímulo de 1° presentado durante 500 ms, se observaron diferentes sensibilidades en distintas zonas retinianas. La sensibilidad retiniana absoluta es menor en fóvea aumentando hasta un máximo, en el rango entre 12° y 22° de excentricidad, para luego disminuir progresivamente hacia los 60°. El trabajo de estos autores compara la sensibilidad según los cuadrantes temporal, nasal, superior e inferior, observándose que la retina temporal tiene una mayor sensibilidad que en las otras direcciones. En base a este estudio se determinó que las medidas realizadas en esta memoria debían hacerse en retina temporal por mostrar mayor sensibilidad retiniana. En general, todos los estudios citados en esta memoria, realizan las medidas de adaptación en retina temporal.

1.2.4 Adaptación a la iluminación

1.2.4.1 Medida de la luminancia umbral en función de la intensidad del campo de adaptación

El proceso de “*adaptación a cambios de iluminación*” permite al ojo adaptarse en un rango de luminancias muy amplio, superior a 10^8 , siendo capaz de detectar pequeñas variaciones de luminancia en el campo visual (Blackwell, 1946). El ojo tiene, por tanto, una gran capacidad para detectar pequeños cambios de luminancia sobre un campo de adaptación. A medida que aumenta la luz ambiente el sistema de bastones deja de actuar dando paso al sistema de conos que empieza a responder. Los niveles de luz a los que podemos estar expuestos se extienden desde los valores más bajos de luminancias o rango escotópico, pasando por el rango mesópico, hasta los valores más altos de luminancias en el llamado rango fotópico. Según el nivel de luminancia a la que se expone la retina habrá variaciones en la funcionalidad de conos y bastones. En la figura 1.4 se representan los distintos niveles de luminancias a las que puede verse sometido un sujeto.

En psicofísica, una forma de medir la sensibilidad es determinar el mínimo incremento de luminancia detectable (ΔL) o estímulo superpuesto sobre un campo de adaptación (L). Lo que el sujeto percibe se representa en la figura 1.5 y se utiliza para estudiar los procesos de la adaptación retiniana en situaciones preestablecidas, tanto de luminancia del campo de adaptación como de variaciones de tamaño y tiempo de dicho campo

A medida que aumenta la luminancia del campo de adaptación se requiere mayor incremento de luminancia de la señal para que esta pueda ser detectada. La relación entre el incremento de la luminancia umbral (ΔL) y del campo de adaptación (L) se mantiene constante (K), cumpliéndose así la Ley de Weber (1.3):

$$K = \Delta L / L \quad (1.3)$$

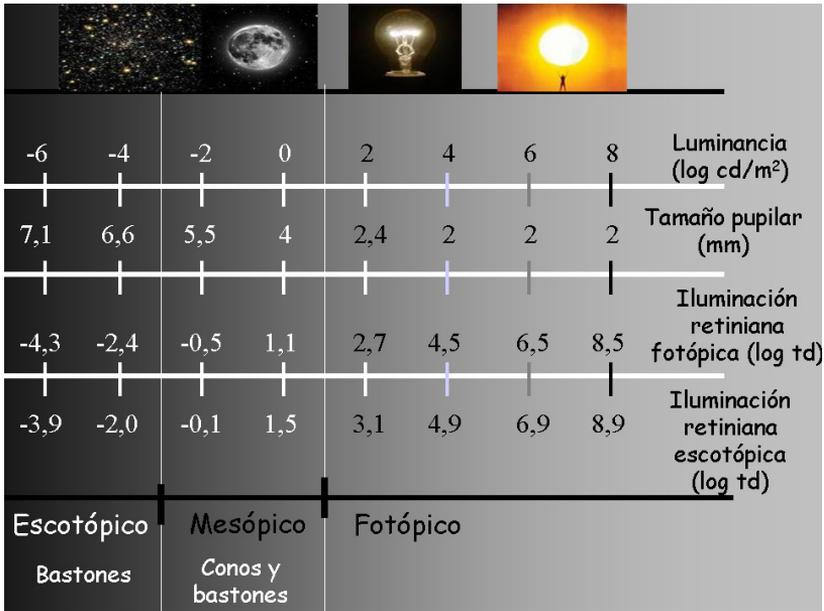


Figura 1.4 Rango dinámico de luminancias. (Basado en el diseño de Hood and Finkelstein, 1986)

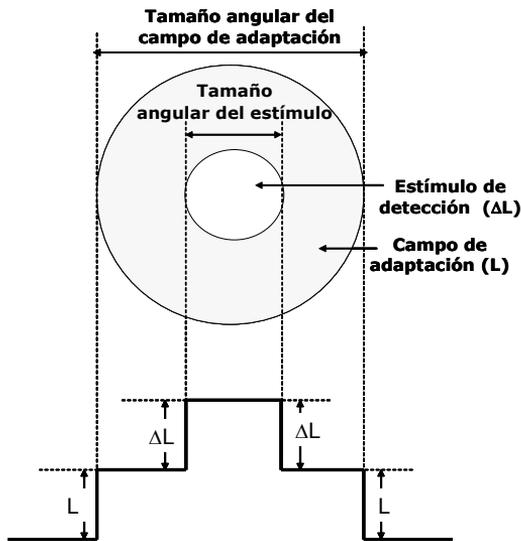


Figura 1.5. Esquema típico del campo luminoso en pruebas psicofísicas de detección de umbral.

Esta relación puede ser representada mediante las curvas de la luminancia umbral en función de la intensidad de luminancia del campo de adaptación. Esta relación se puede extender indefinidamente en el caso de los conos, ya que estos no se saturan ante un aumento de luminancia del campo estable. Sin embargo no es indefinida para los bastones ya que en ellos se produce la saturación en ciertas intensidades de luminancia del campo de adaptación estable (Adelson, 1982). En la figura 1.6 se puede observar el incremento de la luminancia umbral en función del incremento de luminancia del campo de adaptación para los bastones. Se observa como la Ley de Weber se cumple a partir de un cierto nivel de luminancia, pero cuando este nivel es muy alto la pendiente se hace más pronunciada y se produce la saturación.

La medida de incremento del umbral en función de la luminancia del campo de adaptación ha sido realizada para una gran variedad de tamaños y tiempos de duración del campo y del estímulo, así como para distintos tiempos de comienzo del estímulo con respecto al campo de adaptación, y para distintas zonas de la retina. La variación de todos estos parámetros tiene como finalidad estudiar el proceso de la adaptación retiniana a la iluminación.

1.2.4.2 Variaciones del estímulo de detección

La sensibilidad de conos y bastones ante un campo luminoso es diferente según las características del estímulo de detección. En cuanto a los conos, la sensibilidad retiniana mejora cuando el estímulo de detección es de mayor duración temporal (Keller, 1941) y de mayor diámetro (Geisler, 1979a) pero sólo sobre campos de baja luminancia.

1.2.4.3 Variaciones del campo de adaptación

En lo que se refiere a los bastones, se observa que con el aumento de la luminancia del campo de adaptación se pierde más y más rápidamente la sensibilidad retiniana (Aguilar y Stiles, 1954). Hay, además, otros parámetros del campo de adaptación que también influyen en la sensibilidad retiniana.

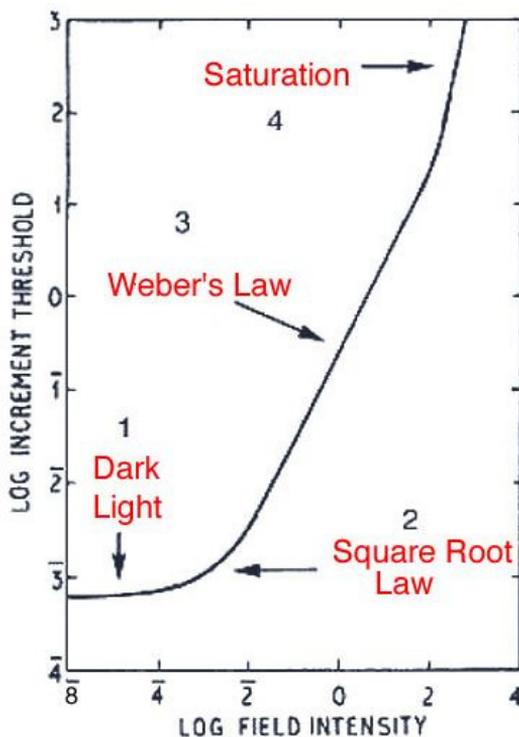


Figura 1.6. Incremento de la luminancia umbral (td escotópicos) en función de la iluminación retiniana (td escotópicos) para el sistema de bastones. Estos resultados han sido tomados del trabajo de Adelson 1982. (<http://webvision.med.utah.edu/imageswv/KallDark12.jpg>)

Tamaño del campo de adaptación. Tanto para conos como para bastones, se necesita más luz para detectar un estímulo sobre un campo de adaptación más pequeño. Con campos de adaptación más grandes, con respecto al tamaño del estímulo, hace falta menor luminancia para detectar el estímulo, es decir mejora la sensibilidad (Westheimer, 1967).

Duración y tiempo de presentación del campo de adaptación. El sistema visual humano no se adapta instantáneamente cuando se presenta de forma brusca un cambio de iluminación. Por ejemplo, si se entra en una habitación oscura y de forma inmediata se enciende una luz, el sistema visual tarda un tiempo en adaptarse a la nueva condición de iluminación. Los valores de luminancia umbral aumentan instantáneamente y van disminuyendo con el transcurso del tiempo. Un campo de adaptación transitorio produce un aumento en los valores de la

luminancia umbral mayor que un campo estable o prolongado en el tiempo, tanto para visión extrafoveal como para visión foveal. Finkelstein y Hood (1981) realizaron experimentos, en esta línea, para visión foveal, con un estímulo de 8' y 10 ms presentado al mismo tiempo que un campo de adaptación de 40' y 500 ms. En sus resultados se observa una mayor luminancia umbral con el campo de adaptación transitorio que con el campo de adaptación estable, sobre todo, con mayor luminancia del campo de adaptación. Esta pérdida brusca de sensibilidad es lo que se ha denominado "*saturación del sistema de conos*". Los experimentos para visión extrafoveal muestran que los bastones también se saturan ante un campo transitorio y esta saturación es mucho más pronunciada que la producida por un campo estable (Adelson, 1982; Geisler, 1979b).

1.2.4.4 Adaptación a campos transitorios

Hay una extensa bibliografía (Crawford, 1947; Baker, 1949; Adelson, 1982; Pokorny, 2003) que estudia la adaptación a campos breves de iluminación. Este aspecto cobra importancia, ya no sólo desde el punto de vista práctico, donde las tareas más cotidianas pueden presentar este tipo de situaciones, sino también a un nivel fundamental para comprender los mecanismos de adaptación, tanto en fotorreceptores como en la etapa postreceptoral.

Como se ha comentado en el apartado anterior, el umbral de detección del estímulo (ΔL) varía según el tiempo de duración del campo de adaptación (t_a) y del propio estímulo (t_e), así como del tiempo que transcurre entre ambos (Δt). En la figura 1.7 se representan diferentes situaciones temporales para evaluar los umbrales de detección con tiempos breves del campo de adaptación, también denominados transitorios. Este tipo de experimentos psicofísicos es denominado por algunos autores como "*prueba-flash*". Estas presentaciones del estímulo en diferentes tiempos determinan la evolución temporal de la adaptación. Es frecuente denominar dichas presentaciones como "*encendido asincrónico del estímulo*" o SOA (*del inglés Stimuli Onset Asynchrony*).

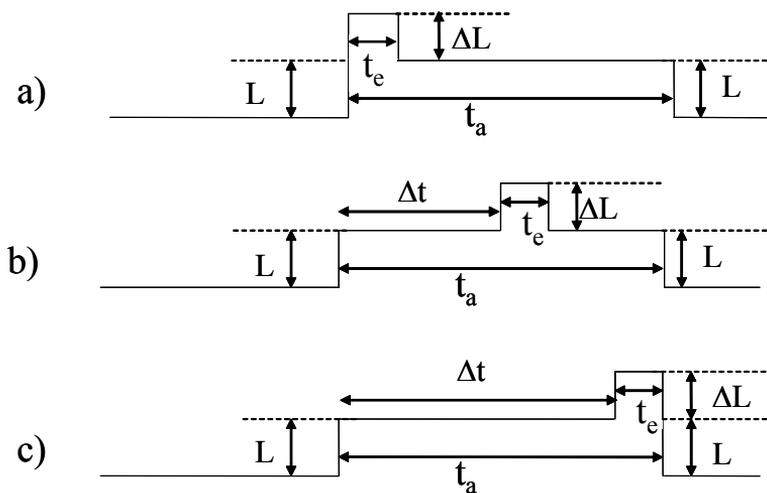


Figura 1.7. Distintos tiempos de presentación de un estímulo (ΔL) con respecto al campo de adaptación (L)

Como se ha visto anteriormente los procesos transitorios de iluminación producen una fuerte pérdida de sensibilidad retiniana. Esta línea de investigación se viene desarrollando desde que Crawford (1947) estudiara de forma exhaustiva la adaptación visual con campos de adaptación transitorios a nivel foveal.

Crawford (1947) midió la luminancia umbral para distintas presentaciones temporales de un estímulo de 0.5° de diámetro y 10 ms de duración con un campo de adaptación transitorio de 12° de diámetro y 500 ms de duración. Los resultados, que se representan en la figura 1.8, muestran los cambios de la luminancia umbral en función del tiempo transcurrido desde el encendido del campo de adaptación, para tres niveles de luminancia del mismo. Lo más destacado de este trabajo es la subida brusca del umbral cuando se presenta el estímulo con el encendido del campo de adaptación, al que le sigue una caída en los primeros 50 ms. También existe otro pico menor justo antes del momento en que se apaga el campo de adaptación. Se comprueba así que el campo de adaptación afecta a la sensibilidad sobre todo en los primeros instantes. También se puede apreciar un adelanto en el aumento del umbral, ya que 20 ms antes de la presentación del campo de adaptación se observa un paradójico crecimiento en los umbrales, denominado enmascaramiento.

Este fenómeno puede ser explicado por los distintos tiempos requeridos por el sistema visual para transmitir la información. La interpretación clásica de este fenómeno se basa en que el proceso de percepción del test o estímulo es más lento que el proceso de la señal del campo de adaptación, interfiriendo esta en la percepción del mismo. Baker (1949) también ha estudiado las variaciones de la luminancia umbral con la evolución temporal a nivel foveal, para varias luminancias del campo de adaptación. Sus resultados indican, para todos los valores de luminancia, un pico muy alto del incremento umbral justo con el encendido del campo de adaptación. Esta brusca disminución de la sensibilidad va seguida de una recuperación progresiva que tarda varios minutos. Pokorny (2003) ha reproducido el estudio de Crawford, obteniendo una disminución de la sensibilidad retiniana a los 25 ms antes de encender o antes de apagar el campo de adaptación. En dicho trabajo se trató de identificar los caminos neuronales, propuestos por Crawford con los caminos parvo y magnocelulares, sugiriendo que la detección del umbral está mediada por el camino parvocelular. A nivel extrafoveal, un experimento similar muestra el curso del tiempo de adaptación del sistema de bastones con resultados similares (Adelson, 1982).

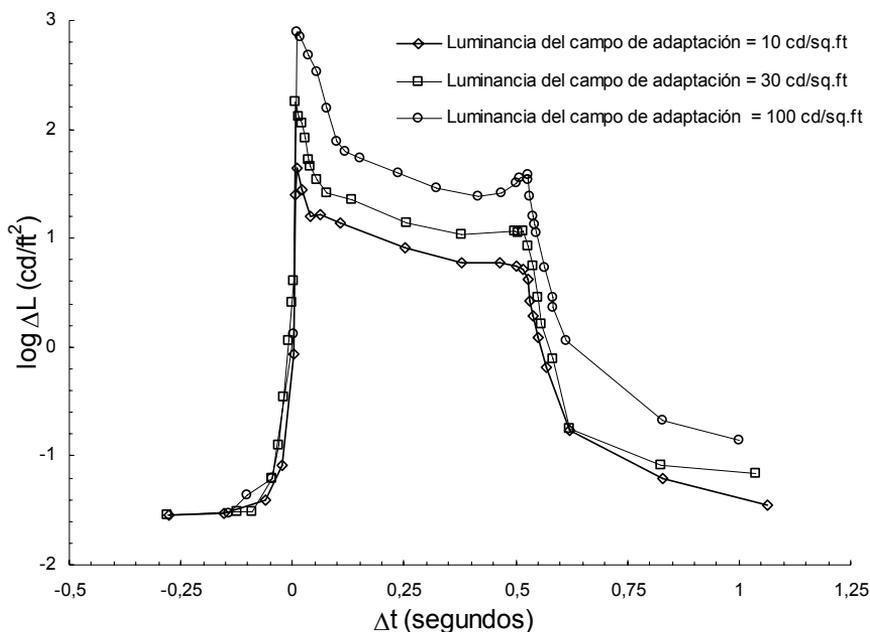


Figura 1.8 Variación del umbral en función del tiempo transcurrido entre el encendido del campo condicionante y el estímulo de detección (SOA). (Adaptación de Crawford 1947)

Estos estudios han sido realizados con adaptación directa, lo que significa que el estímulo de detección y el campo de adaptación se solapan. Sin embargo, existen condiciones de adaptación transitoria que se producen cuando el campo de adaptación se localiza en otro lugar distinto a la detección y que se denomina indirecta. En este caso el campo de adaptación actúa como fuente deslumbrante produciendo una luminancia de velo. Este deslumbramiento se caracteriza porque proviene de una fuente de luz intensa que incide en un lugar de la retina, pero que afecta a la imagen formada en el lugar de detección debido a la dispersión que se produce en los medios intraoculares. Boynton (1954) comparó la adaptación transitoria directa con la adaptación transitoria indirecta. Para ello determinó el campo de adaptación equivalente para producir el mismo umbral en adaptación directa e indirecta. Los resultados, mostraron una coincidencia en la dependencia funcional en la evolución temporal para los dos niveles diferentes de luminancia del campo de adaptación. Esto parecería indicar que una fuente deslumbrante produce un velo en la retina debido a la difusión intraocular y ese velo, no una inhibición neuronal, es la causa de la reducción al contraste y por tanto de la pérdida de sensibilidad. A menudo este deslumbramiento producido por adaptación indirecta es denominado “deslumbramiento incapacitante” (*del inglés disability glare*). Algunos autores definen el deslumbramiento incapacitante transitorio como la diferencia entre la luminancia umbral obtenida con una condición transitoria y la luminancia umbral absoluta, y el deslumbramiento incapacitante estable como la diferencia entre la luminancia umbral obtenida con una condición estable y la luminancia umbral absoluta (Bichao, 1995).

Bodmann realizó un estudio para valorar las variaciones del umbral con campos de adaptación transitorios mediante el cálculo de la “pérdida de sensibilidad (ϕ)” (1.4). Esta pérdida de sensibilidad relaciona el incremento de la luminancia umbral para un campo de adaptación transitorio (ΔL_t) con el incremento de la luminancia umbral para un campo de adaptación estable (ΔL_e).

$$\phi = \frac{\Delta L_t}{\Delta L_e} \quad (1.4)$$

La CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage* o *International Commission on Illumination*) define el factor de adaptación transitoria (del inglés *Transient Adaptation Factor* o TAF) como el inverso de la pérdida de sensibilidad ($1/\phi$), cuando el ΔL_t se mide 300 ms después de un cambio brusco de luminancia. En los experimentos de esta memoria se ha considerado, también dicho valor de 300 ms para el cálculo de ϕ .

Bodmann estudió varios aspectos que pueden influir en la pérdida de la sensibilidad (ϕ). Cuando hay un cambio del campo de adaptación de 2000 cd/m² a 8 cd/m² la pérdida de sensibilidad es mayor que en el caso contrario, cuando la luminancia cambia de 8 cd/m² a 2000 cd/m². Este estudio, realizado para campos de adaptación de diferentes tamaños angulares, concluye que a partir de 10° no existe variación significativa en los resultados, mientras que para valores menores de 10° la pérdida de sensibilidad es más notoria. Además un análisis del comportamiento extrafoveal para la adaptación transitoria muestra, en la periferia, que la pérdida de sensibilidad decrece con la excentricidad, revelando que la retina periférica se adapta más rápidamente que la fovea.

1.2.4.5. Propiedades Temporales. La Ley de Ferry Porter

Además de adaptarse a cambios de luminancia muy grandes, el ojo está en constante muestreo de información de las imágenes proyectadas en la retina. Sin embargo, el tiempo necesario para recoger y procesar la información, puede tener limitaciones debido a la capacidad temporal de respuesta de nuestro sistema visual. Un ejemplo es el tiempo de presentación entre dos estímulos breves, si dicho tiempo es muy pequeño, el ojo puede percibirlo como un único estímulo luminoso, pero si el tiempo de presentación entre ambos estímulos es largo, el ojo los percibirá como dos estímulos separados. La frecuencia crítica de fusión (CFF del inglés *Critical flicker frequency*), expresada en Hz, representa la frecuencia, a partir de la cual, un estímulo sinusoidal en el tiempo es percibido como un campo de luminancia constante. De forma que cuando la CFF es mayor el sistema tiene mejor resolución temporal. Es por tanto una medida de la resolución

temporal del sistema visual y cambia en función del área, la excentricidad y la luminancia.

La Ley de Ferry Porter (1.5) establece que la CFF crece linealmente con el logaritmo de la luminancia del estímulo (L). Esto puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\text{CFF} = a \log L + b \quad (1.5)$$

(donde a y b son dos constantes)

Cuando se comprueba esta ley en la zona foveal, se observa que se cumple para un alto rango de luminancias, del orden de 4 unidades logarítmicas. Sólo a partir de $2.5 \log t_d$ se rompe la linealidad de la función (Hart, 1992). En la figura 1.9 se pueden observar la CFF en fovea y en 5° y 15° de retina periférica, mostrando una CFF diferente según la localización retiniana. Si un estímulo luminoso es presentado en la fovea habrá un aumento de la CFF con el aumento de la luminancia, si el estímulo es presentado en la periferia, se estimularán ambos receptores mostrando una función bifásica. Lo que es evidente es que, a partir de ciertos niveles de luminancia, a medida que aumenta la excentricidad disminuyen los valores de CFF. Esto parece indicar que los conos tienen una mayor resolución temporal que los bastones.

Tyler y Hamer (1990) han examinado esta ley para un sólo tipo de cono, tanto en fovea como en periferia. Estos autores, que han escalado adecuadamente el tamaño del estímulo para estimular regiones de la retina homogéneas en cuanto a morfología y dimensiones del campo receptivo, revelan un aumento en la CFF para condiciones fotópicas, más pronunciado con la excentricidad (Tyler, 1993). Este resultado sugiere un aumento en la velocidad de la respuesta retiniana fotópica que parece estar relacionado con los cambios en la longitud y diámetro del segmento externo de los conos periféricos (Tyler, 1985).

En general, la Ley de Granit-Harper establece que la CFF aumenta linealmente con el logaritmo del área del estímulo. Sin embargo, debido a la diferente densidad de conos y bastones en periferia y sus diferentes propiedades de sumación espacial, la CFF dependerá del área y localización de la retina estimulada. Estos trabajos son relevantes para esta memoria, donde se estudian aspectos relacionados con la velocidad de adaptación del sistema visual.

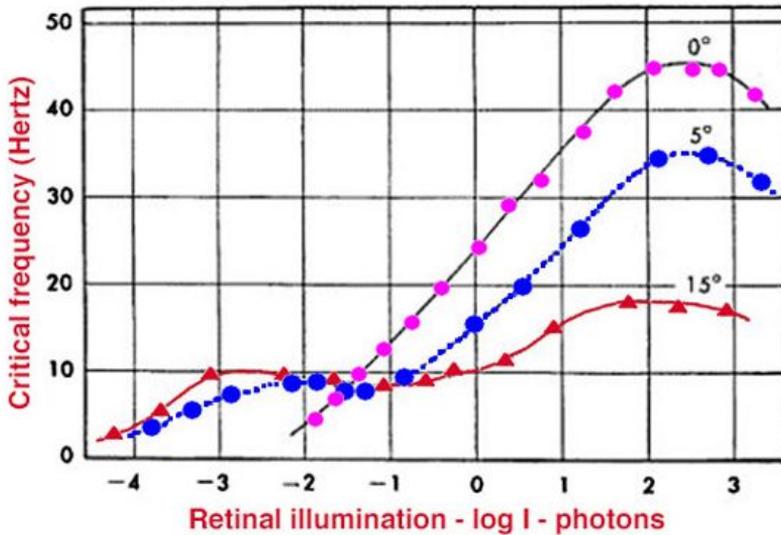


Figura 1.9. Frecuencia crítica de fusión, para un estímulo de 2°, en función de un amplio rango de iluminación retiniana (photons = troland), medido en fovea, a 5° y a 15° extrafoveal. (<http://webvision.med.utah.edu/imageswv/KallTemp9.jpg>)

1.3 Adaptación visual en la conducción nocturna

Una aplicación directa de los trabajos realizados en esta memoria es el proceso de la adaptación retiniana a los cambios de iluminación durante la conducción nocturna. La conducción nocturna se desarrolla en condiciones de pobre visibilidad. Entre los factores de riesgo, que llevan a este problema, están las características del propio conductor así como las características del estímulo que debe ser identificado o las condiciones de las carreteras por donde se conduce. En cuanto al conductor, edad y

función visual son algunos de los aspectos implicados en la conducción, ya que las carencias relacionadas con la visibilidad, sobre todo en bajas luminancias, complican la tarea. Es necesario conocer las características generales de las carreteras para poder valorar si las capacidades visuales son adecuadas. Sin embargo estas características varían enormemente de unas carreteras a otras. El bajo nivel de luminancia encontrado en las carreteras de noche, especialmente aquellas que no disponen de instalaciones fijas de iluminación puede ser la explicación para el alto número de accidentes que ocurren durante la noche. Conviene recordar que los peatones están implicados en la mayoría de estos accidentes, lo cual supone un agravante del problema.

La visión es responsable aproximadamente del 90% de la información necesaria durante la conducción. No sólo es importante valorar aquellas carencias relacionadas con la visión sino también las capacidades del sistema visual ante la conducción nocturna (Charman, 1997). Según Taylor (1987) hay dos pruebas fundamentales para valorar si la función visual es correcta durante la conducción nocturna, la recuperación al deslumbramiento y la pérdida de visibilidad. Estudios más recientes, sin embargo, proponen que los tiempos de reacción, aspectos visuales y campo de visión útil son una mejor forma de predecir las condiciones bajo las cuales son más posibles los accidentes (Plainis and Murray, 2002). En cualquier caso, aunque no se puede atribuir a la reducción de la visibilidad como la causa directa de los accidentes durante la conducción, lo que sí es cierto es que aproximadamente el 40% de los accidentes es por la noche (RACE, 2009), aún cuando el tráfico de noche es un 60% más reducido que de día. A continuación se describen aquellas condiciones típicas a las que se enfrenta un conductor en la noche, y que son importantes desde el punto de vista de la adaptación visual

1.3.1 Adaptación mesópica

Las condiciones a las que se enfrenta un sujeto durante la conducción nocturna dependen de las distintas luminancias en la carretera. Hay que tener en cuenta que la luminancia puede ser diferente en el interior del vehículo que en las distancias más próximas, iluminadas por los faros, o las más lejanas, iluminadas, o no, por las fuentes de luz de la carretera. En la figura 1.10 se puede

ver una típica condición de un conductor en una carretera mal iluminada durante la noche.



Figura 1.10. Situación típica durante la conducción nocturna.
(www.16valvulas.com.ar/.../07/bmw-nocturna-1.jpg)

Algunos estudios han demostrado que los accidentes producidos por la noche son menores cuando las carreteras están bien iluminadas (Simons, 1992). La luminancia de una carretera correctamente iluminada puede oscilar entre 1 cd/m^2 y 5 cd/m^2 , disminuyendo a 0.06 cd/m^2 si está mojada o no es una carretera principal (Plainis and Murray, 2002). En cuanto a las señales o peatones, estos pueden tener aún valores más bajos de luminancias. Una gran parte de las situaciones se desarrollan con valores de luminancia dentro del rango de la visión mesópica.

Muchos estudios realizados en esta línea, valoran los procesos de adaptación visual dentro de este rango, con la consiguiente interacción entre ambos fotorreceptores, conos y bastones (Goodman *et al*, 2007). Estudios de Plainis y Murray (2000) establecieron niveles de luminancia mesópica para su aplicación en la tarea de la conducción nocturna. Sin embargo, la visión mesópica entraña una gran complejidad debido a las diferencias en la respuesta temporal entre conos y bastones, debidas no sólo a los propios fotorreceptores sino a los procesos postreceptores (Stockman, 2006). La contribución de conos o bastones en el proceso de adaptación será diferente según el nivel de luminancia mesópica, la localización retiniana o el tiempo de presentación del estímulo.

Como se ha comentado en los apartados 1.2.2 y 1.2.3, después de presentar un estímulo luminoso, el observador tarda un tiempo en recobrar su sensibilidad retiniana inicial. Al comienzo del tiempo de adaptación juegan un papel más importante los conos y a medida que el observador se va adaptando a las bajas luminancias comienzan a predominar la respuesta de los bastones. Sin embargo, la visión mesópica está entre ambos niveles. Con la intención de estudiar la adaptación retiniana durante la conducción nocturna, Plainis y Murray (2005) realizaron un trabajo sobre el proceso de la adaptación retiniana en niveles mesópicos. En este trabajo midieron el umbral absoluto en función del tiempo de adaptación después de presentar una luz de 3500 cd/m² durante 1 min. Estas medidas las realizaron con un estímulo de 3° en oscuridad y con 4 niveles de iluminación mesópica (de 0.1 lux a 5 lux). Cuando el ojo está completamente adaptado a la iluminación mesópica, la sensibilidad retiniana se ve reducida con respecto a la obtenida en condiciones escotópicas aproximadamente en 2 unidades logarítmicas. Existe un predominio de los conos cuando la iluminación es de 5 lux y de bastones cuando la iluminación está entre 0.1 lux y 0.5 lux. En los niveles próximos a 0.1 lux, donde predominan los bastones, la sensibilidad aumenta pero disminuye la velocidad de recuperación. Es evidente que tanto los conos como los bastones juegan un papel relevante en la adaptación mesópica. Sin embargo, no hay que olvidar que la visión periférica, donde existe un mayor número de bastones, desempeña un papel fundamental durante la conducción nocturna.

1.3.2 Adaptación foveal y periférica

La zona de la retina donde se realizan las medidas tiene un papel relevante, ya que varía la densidad de conos y bastones en función de la excentricidad. La visión periférica está implicada en la detección de un objeto o un peatón, así que la adaptación visual debería ser estudiada no sólo a nivel foveal sino también periférico. Ambas zonas retinianas están implicadas en la conducción nocturna y la adaptación es distinta según la localización del estímulo o de la fuente deslumbrante. En el trabajo de Plainis y Murray (2005) se estudió la adaptación en retina foveal y periférica, para excentricidades de 10°, 20°, 30° y 40°. En su trabajo los autores concluyen que la sensibilidad retiniana y la velocidad de

recuperación de dicha sensibilidad disminuyen con la excentricidad, tanto en iluminación mesópica de 5 lux como de 0.5 lux. Por otro lado la sensibilidad retiniana aumenta con el tamaño del objeto en la periferia, pero hay un tamaño crítico por encima del cual la sensibilidad no aumenta más. Los experimentos realizados en esta memoria pueden estimar la velocidad de adaptación a distintas condiciones de luminancia en distintas zonas de la retina contribuyendo a la investigación en esta línea.

1.3.3 Adaptación transitoria

Durante la conducción nocturna el conductor se ve expuesto a procesos de adaptación visual ante cambios bruscos de luminancia. Los ejemplos más habituales pueden ser la entrada en un túnel, las luces de un automóvil que viene en dirección contraria, la salida a una carretera secundaria mal iluminada o la aparición repentina de una luz lateral. Un ejemplo típico de este deslumbramiento se puede ver en la figura 1.11.



Figura 1.11. Deslumbramiento producido por un vehículo en dirección contraria. (www2.diariomotor.com/imagenes/2009/11/mercedes-clase-s-visi%C3%B3n-nocturna.jpg)

Bichao (1995) midió la pérdida de sensibilidad foveal y periférica simulando las características de la conducción nocturna. En ese trabajo se sugiere que los métodos utilizados habitualmente para comprobar la discapacidad visual ante un deslumbramiento

no son los más adecuados, ya que valoran pérdidas de sensibilidad visual a nivel foveal y con deslumbramiento estable. Las condiciones experimentadas por el conductor, sin embargo, son muy diferentes, ya que sufre una discapacidad en retina periférica producida por deslumbramientos transitorios. Por este motivo compara el efecto del deslumbramiento producido por campos de adaptación estables y transitorios, tanto a nivel foveal como extrafoveal, comprobando que el deslumbramiento transitorio produce mayor pérdida de sensibilidad retiniana que el deslumbramiento estable, algo que ya había sido estudiado en la bibliografía clásica comentada en el apartado 1.2.4.4. Además parece que este efecto es más pronunciado en retina periférica. Esto resulta de gran interés si se tiene en cuenta que la retina periférica juega un papel relevante en la conducción. El deslumbramiento producido por un campo transitorio, tanto foveal como extrafoveal, en diferentes excentricidades, es uno de los aspectos estudiados en esta memoria.

Cuando este fenómeno se estudia en personas de edad avanzada se observa un retraso en la recuperación de la sensibilidad ante deslumbramientos transitorios con respecto a los jóvenes (Higgins, 2005).

1.3.4 Tiempo de reacción

La medida del tiempo de reacción es propuesta por algunos autores para valorar la visibilidad durante la conducción nocturna. Plainis y Murray (2002) establecieron una relación entre el tiempo de reacción y el contraste, frecuencia espacial y luminancia, concluyendo que dicho tiempo es mayor cuando estos parámetros son bajos, y que además también aumenta considerablemente en retina periférica cercana. El tiempo de reacción es una medida compleja que estima el tiempo en el que una persona es capaz de responder ante un estímulo, teniendo en cuenta el tiempo de procesado y el de decisión. Es evidente que en este aspecto juegan un papel importante, no sólo la visión y su adaptación ante las condiciones de la conducción, sino un largo número de variables correspondientes a mecanismos más complejos. Wood y Troubeck (1995) realizaron un trabajo donde expusieron a los sujetos jóvenes a las mismas carencias visuales que tenían las personas del grupo de mayor edad. Los resultados de dicho trabajo sugirieron que, a

pesar de simular las mismas carencias visuales, la función visual de personas de edad avanzada era peor que la de los jóvenes. Los autores proponen que esta pérdida de la función visual en las personas de mayor edad es debido a que los tiempos de reacción y posterior procesamiento son más lentos. Lovsund and Hedin (1986) midieron los tiempos de reacción foveal y periférico, encontrando un mayor tiempo de reacción en sujetos de más edad y con defectos de campo.

1.3.5 Líneas de investigación

Dada la importancia de los aspectos visuales implicados en la conducción nocturna como la visión periférica o los cambios bruscos de iluminación experimentados por los conductores en visión nocturna es necesario analizar las aportaciones de los trabajos, ya comentados, en esta línea. Bichao (1995), como acabamos de describir, estudió el efecto de un deslumbramiento indirecto transitorio sobre un estímulo foveal en el rango fotópico (140 cd/m^2) y para una excentricidad de 2.8° , concluyendo que los efectos del deslumbramiento transitorio son mayores en la periferia que en la fovea. Bodmann (1991) midió la recuperación espacio-temporal retiniana en condiciones de iluminación fotópicas y con adaptación directa. Sus resultados mostraron un comportamiento diferente según la zona de la retina estudiada, encontrando que hay una pérdida de sensibilidad alta en la fovea, que se reduce en los 5° de excentricidad y que aumenta para excentricidades mayores. Pero, sin embargo ambos trabajos han sido realizados en diferentes condiciones experimentales y paradigmas de medición, haciendo difícil la comparación entre ambos estudios y por tanto imposible predecir el comportamiento de la periferia en una condición de adaptación transitoria como la que se presenta en la tarea de conducción vehicular nocturna.

Por otro lado, como también se ha comentado, Plainis y Murray (2005) midieron la velocidad de regeneración de los fotopigmentos, tras el blanqueo de los mismos, de modo que los resultados de su trabajo se orientan a explicar los procesos de adaptación lentos.

Se observó que la velocidad de recuperación de los fotopigmentos es mayor con iluminación de 0.1 lux que con iluminación de 5 lux y que dicha velocidad de recuperación es menor a medida que aumenta la excentricidad, justificando estos hallazgos sobre la base de la mayor velocidad de adaptación de los conos en comparación con los bastones. Si bien los niveles de iluminación estudiados coinciden con los que se hallan en la tarea de conducción vehicular nocturna surge también la necesidad de estudiar los procesos rápidos de adaptación que se dan ante la presencia de fuentes deslumbrantes o cambios de luminancia. La mayoría de los estudios trabajan sobre el tiempo de recuperación o tiempo de reacción (Plainis y Murrays, 2002), sin embargo las condiciones de adaptación espacio-temporales están menos documentadas, encontrándonos una laguna en la capacidad y velocidad de adaptación de la retina en la detección de un estímulo en condiciones deslumbrantes.

En esta memoria se plantea establecer las características dinámicas de la adaptación retiniana, evaluando la visibilidad de un estímulo en niveles de adaptación escotópicos-mesópicos y en diferentes zonas de la retina en función de la evolución temporal. Este estudio tiene una aplicación directa en la tarea de la conducción nocturna, ya que la conducción vehicular se caracteriza por la concurrencia de factores tales como la adaptación escotópica-mesópica, deslumbramiento, su variación temporal y visión periférica que afectan el funcionamiento del sistema visual. Dada la importancia de esta tarea en la vida moderna se hace necesario realizar investigaciones que estudien la forma en que interactúan esos factores.

1.4 Adaptación visual en procesos degenerativos causados por la retinosis pigmentaria (RP)

Un proceso degenerativo o deterioro paulatino de las células de la retina puede ser focal o generalizado, ocasionado por defectos genéticos, inflamación, trauma, enfermedad vascular o envejecimiento. Además la degeneración de la retina puede afectar a distintas zonas. Dependiendo de las causas de la degeneración o

de su localización se pueden presentar multitud de patologías retinianas. La retinosis pigmentaria es una patología degenerativa que afecta a la retina, de forma crónica, y que puede conducir a la ceguera. Esta enfermedad, frecuentemente hereditaria, se divide en 3 tipos genéticos de herencia diferente: autosómica dominante, autosómica recesiva y la ligada al cromosoma X. En España el número de afectados supera los 15000 individuos, estimándose en 480000 los portadores del gen defectuoso y, por tanto, posibles transmisores de esta enfermedad (Urtubia, 1999). Los afectados nacen con esta alteración, pero sin embargo, es raro que se manifieste antes de la adolescencia. Esto supone un serio obstáculo para realizar el tan necesario diagnóstico precoz. Los estudios llevados a cabo sobre el proceso de la adaptación visual han sido más numerosos y han estado más centrados en retinosis pigmentaria debido a sus numerosos problemas de adaptación tanto a la luz como a la oscuridad. No todas las retinosis pigmentarias son iguales ni conducen a la misma pérdida de visión. Sin embargo, todos los autores coinciden en que el cambio esencial y primero de la retina es la degeneración y desaparición de bastones y conos. En las áreas del campo visual en las que desaparecen los segmentos externos de los fotorreceptores y disminuye su densidad, el paciente pierde su visión. En las áreas donde el paciente todavía responde a estímulos de luz, los segmentos externos de los fotorreceptores están desorganizados y son más cortos de lo normal. Esta desorganización se produce dentro de los discos de los propios fotorreceptores. La retinosis pigmentaria origina una pérdida progresiva de bastones y conos, empezando por la periferia y tendiendo a las zonas centrales. La creencia de que la degeneración de bastones producida en los primeros estadios de la patología era la causa directa de la degeneración de los conos producida en estados más tardíos ha sido rechazada por estudios recientes (Holopigian, 2001). Sin embargo, en todos los casos la degeneración afecta a ambos fotorreceptores y el paciente puede llegar a la ceguera, a pesar de tener funcionales las conexiones entre la retina y el cerebro.

Existen una serie de enfermedades retinianas que tienen en común con la retinosis pigmentaria la distrofia de conos y bastones como parte de su etiología y que en ocasiones son confundidas con la retinosis pigmentaria por presentar cambios fundoscópicos similares. Los síntomas típicos de la retinosis pigmentaria son la

ceguera nocturna o nictalopía, la reducción del campo visual periférico, la cual da lugar a la visión en túnel, el deslumbramiento ante excesiva luminosidad y muy tardíamente la disminución de agudeza visual. Como se puede ver todos los signos y síntomas derivados de esta patología presentan problemas directamente relacionados con el proceso de la adaptación visual. Un estudio de la adaptación visual, para distintas condiciones, podría facilitar el diagnóstico precoz de la retinosis pigmentaria. En el ámbito clínico, una prueba muy eficiente para detectar una retinosis pigmentaria es el electroretinograma (ERG). Los pacientes con retinosis pigmentaria, en estadios tempranos, pueden mostrar en el ERG valores fáciles de detectar. Las respuestas no están solamente reducidas en amplitud, sino también retrasadas en los tiempos y estos cambios, pueden detectarse incluso varios años antes de que aparezcan cambios visibles en el fondo de ojo. Estas pruebas muestran una adaptación anormal de los bastones a la oscuridad en la primera fase de la patología. Por otro lado, existen estudios que valoran estas pérdidas funcionales en el proceso de adaptación con el método psicofísico del tipo *prueba-flash* (Greenstein *et al*, 1982). Partiendo de estos trabajos se puede encaminar la investigación al estudio del comportamiento retiniano típico de un paciente con retinosis pigmentaria. Estos estudios podrían ser de gran utilidad para detectar los primeros estadios de la patología, con el fin de realizar un diagnóstico precoz, con las ventajas que ello supone. Diagnosticar una retinosis pigmentaria en los primeros estadios de su desarrollo permitiría evaluar el efecto de los tratamientos antes del comienzo de la degeneración de los fotorreceptores y conseguir el retraso, e incluso la no aparición, de los signos clínicos. En esta memoria se ha estudiado la adaptación visual para sujetos normales y para un sujeto con retinosis pigmentaria.

1.4.1 Adaptación a la oscuridad

Un estudio de Ripps (1976) comparó el tiempo de recuperación de la sensibilidad retiniana a la oscuridad de dos sujetos con retinosis pigmentaria con un sujeto con visión normal. La luminancia umbral fue medida después de una exposición de 7 minutos a un campo de luminancia de 8900 cd/m². Se utilizó un estímulo de 4.5° a 12° de retina temporal. Los sujetos con ceguera nocturna no presentaron la típica curva bifásica que presentaron

los sujetos ocularmente sanos, sino una curva monofásica que indicaba un comportamiento anormal o incluso una falta de funcionalidad en los bastones. Algunos sujetos con ceguera nocturna necesitaron un período de adaptación a la oscuridad mínimo de 3 a 4 horas, mientras que un sujeto normal necesita 30 ó 35 minutos. La retinosis pigmentaria produce la ceguera nocturna entre sus síntomas más evidentes y estos resultados parecen indicar una pérdida en la función de los bastones como su causa principal. Es interesante analizar este aspecto en sujetos que tienen degeneración de bastones, ya que hay muchas situaciones de la vida cotidiana donde se presentan niveles muy bajos de iluminación y por tanto pueden presentar una ceguera funcional.

1.4.2 Adaptación a la iluminación

Hood (1982) propuso el método psicofísico del tipo *prueba-flash* para la medida de cambios en la sensibilidad visual para sujetos con patologías retinianas. Este tipo de prueba psicofísica permite determinar si una patología retiniana afecta a la habilidad del sistema visual para adaptarse a campos luminosos estables y transitorios. En base a esto, Greenstein *et al* (1982) comprobaron que esta prueba psicofísica podría ofrecer resultados con alta fiabilidad y consistencia, para ser recopilados con fines clínicos, según el tipo de afectación. En la actualidad, los procesos de adaptación retiniana se están valorando también mediante el uso del ERG. Algunos trabajos han comparado el uso del ERG con los métodos psicofísicos con el fin de estimar la pérdida de sensibilidad del sistema de conos en pacientes con retinosis pigmentaria, encontrando similares resultados con ambos métodos (Seiple *et al*, 1993).

Hay un gran interés, por parte de los científicos, de encontrar la causa de esta pérdida de funcionalidad de los conos, que se desarrolla en los estados más avanzados de la retinosis pigmentaria. Greenstein *et al* (1984) evaluaron la luminancia umbral en función de la luminancia de un campo de adaptación de 500 ms y 1° de diámetro, para un estímulo de 10 ms y 23', presentado con el encendido del campo. En estas condiciones, observaron que para los pacientes con retinosis pigmentaria la sensibilidad foveal se ve disminuida con respecto a los sujetos normales. Los autores se plantean que puede ser debido a una

disminución en la capacidad de los fotorreceptores para capturar cuantos de luz, aunque en un trabajo posterior (Greenstein *et al*, 1987) rechazaron esa hipótesis. Algunos estudios han demostrado que la retinosis pigmentaria causa una disminución de la sensibilidad y ralentiza la respuesta de los conos foveales, pero aún se debate el por qué. Entre estos estudios unos sugieren que se debe a un problema en la fototransducción (Dagneline y Massof, 1993) y otros que se debe a un problema en la porción más interna del fotorreceptor o incluso a fenómenos postreceptores (Hood, 1996).

Los pacientes con retinosis pigmentaria tienen una débil respuesta a la luz que se refleja en el ERG, incluso en los primeros estadios de la patología. Un paciente con una buena agudeza visual, sensibilidad al contraste y discriminación del color pueden tener una disfunción, desde hace mucho tiempo, del campo periférico. Un diseño adecuado de una prueba psicofísica puede ayudar a comprender el progreso de la patología (Dagneline y Massof, 1993). Todos los estudios realizados con el método *prueba-flash* han aportado datos relevantes en los procesos degenerativos de la retina. El trabajo realizado en esta memoria utiliza como prueba psicofísica dicho método, con tamaños y duraciones del campo y de estímulo similares a los utilizados por otros autores. Esto refuerza los experimentos realizados y plantea la posibilidad de nuevos experimentos comparativos y adicionales.

CAPITULO 2

Dispositivo Experimental

En este capítulo 2 se describirá el dispositivo experimental que se ha diseñado y desarrollado para poder medir la sensibilidad retiniana y la velocidad de adaptación tanto de retina foveal como periférica en distintas condiciones de luminancia. Como punto de partida, antes de comenzar el diseño, se plantearon los requisitos principales que habría de satisfacer el dispositivo para posteriormente describir el proceso de su construcción. En primer lugar se mostrará de forma detallada cómo se han conseguido que los dos haces principales, uno para la detección del estímulo y otro para el campo de adaptación, tuvieran la configuración adecuada. Posteriormente se describirá la construcción y configuración de los test utilizados para mantener la fijación del observador. Una vez diseñado dicho dispositivo, su puesta a punto fue esencial para controlar todos los aspectos implicados en las medidas. Por este motivo se ha dedicado un último apartado para explicar la forma en que se han controlado algunos de los aspectos más relevantes como los tiempos de cierre y apertura de los obturadores, la medida de la luminancia, la calibración de los filtros y la posición del observador.

2.1 Objetivos del dispositivo experimental

El objetivo principal del dispositivo experimental es medir umbrales de detección de luz para distintos tiempos de presentación de un campo de adaptación de distintas luminancias.

En muchos de los experimentos clásicos, mencionados en el apartado 1.2 del primer capítulo, se utiliza el incremento de luminancia umbral sobre un campo de adaptación como prueba psicofísica para el estudio de la sensibilidad retiniana y de los procesos de adaptación. En base a esto, se ha desarrollado un sistema que permitiera este tipo de prueba psicofísica, donde los tamaños angulares subtendidos desde el observador, tanto del campo de adaptación como del estímulo de detección, fueran del orden del medio grado y los tiempos de presentación se pudieran establecer con una incertidumbre del milisegundo. Esta alta resolución temporal y espacial ha sido, por tanto, un objetivo específico en el diseño del dispositivo. Sin olvidar que, para estudiar los fenómenos de adaptación en diferentes condiciones, es conveniente variar el tamaño y el tiempo de presentación, así como utilizar un amplio rango de luminancias del estímulo y del campo. Para conseguir esto, el dispositivo experimental debía tener alta precisión y versatilidad en cuanto a tamaños, tiempos y luminancias del estímulo y del campo de adaptación.

Con el objetivo de obtener medidas del umbral que no estén afectadas por las fluctuaciones del tamaño pupilar se consideró el uso de visión maxwelliana. Como se comentó en el apartado 1.1, del primer capítulo, este sistema de iluminación se basa en formar la imagen del filamento de la fuente luminosa en el plano de la pupila de entrada del ojo del observador. Si la imagen del filamento es menor que el tamaño pupilar, toda la luz entra en el ojo. Este sistema de iluminación, además, permite obtener un campo iluminado homogéneo de gran intensidad, ya que toda la luz que proviene de la lámpara pasa a través de la pupila, excluyendo los efectos de las fluctuaciones o cambios pupilares (Boynton, 1954; Das, 1964). Con este sistema se puede determinar la iluminación retiniana en función de la luminancia de la fuente de luz y del tamaño de la imagen del filamento (Westheimer, 1966). Sin embargo, unas de las principales desventajas es la necesidad de una posición estable de la pupila durante todo el experimento

(Beer *et al*, 2005). La técnica habitual para estabilizar esta posición es una impresión dental. Esto asegura la posición y el alineamiento de la pupila. En base a esto, se fijó como otro objetivo específico conseguir un alineamiento del observador apropiado para obtener un sistema de visión maxwelliana con una posición estable, así como evitar el efecto Stiles-Crawford con un centrado adecuado.

Algunos de los dispositivos clásicos en esta línea (Adelson, 1982; Aguilar, 1954) son eficaces para conseguir dichos objetivos y por ello se ha diseñado un dispositivo experimental muy similar. Por otro lado, el desarrollo de las técnicas actuales de medida y de calibración han permitido controlar de forma precisa las prestaciones de este dispositivo, considerándolo de suficiente precisión para el desarrollo de los experimentos.

2.2 Diseño del dispositivo experimental

El dispositivo experimental se puede ver de forma esquemática en la figura 2.1 y mediante una fotografía se puede ver el montaje completo en la figura 2.2. Dicho dispositivo consta de dos haces principales. Un haz de detección, representado mediante una línea continua negra (—), y un haz para el campo de adaptación, representado mediante una línea discontinua roja (— ·). El haz de detección sale de la fuente S2 y se refleja en el espejo M2 hacia la pupila del observador. El haz del campo de adaptación viene de la fuente S1, se refleja en el espejo M1 y se solapa con el haz de detección, antes de llegar al ojo del observador (E), mediante el separador de haz BS2.

Además de los dos haces principales existen otros, como se puede ver en las figuras 2.1 y 2.2: un haz de fijación para la medida foveal, representado con una línea de color azul (- -), un haz de monitorización de la pupila, representado con una línea de color verde (· · · · ·), y un haz de fijación para la medida excéntrica, representado con una línea de color marrón (— ·). Tanto el haz de fijación para medida foveal (FMT) como el haz de fijación para medida excéntrica (EMT) fueron utilizados para mantener la fijación del observador y así poder proyectar las imágenes tanto del estímulo de detección como del campo de adaptación sobre la zona de la retina deseada. Los separadores de haz BS1 y BS4, situados en

el haz de detección, han sido utilizados para superponer éste, con el FMT y el EMT, respectivamente. Los estímulos de fijación para realizar las medidas foveales y extrafoveales serán mencionados en esta tesis como test de fijación, considerando que ningún otro término puede ser más adeudado para su denominación. Sin embargo el haz de detección mostrará al observador lo que se denominará como estímulo de detección. Esta nomenclatura será utilizada durante todo el texto de esta memoria. La cámara CCD se ha empleado para controlar la posición de la pupila de entrada del ojo del observador (E) y para poder medir el tamaño pupilar, en caso de ser necesario. El separador de haz BS3 se utilizó para ver la imagen pupilar a través de la cámara CCD. En este trabajo se tomó como referencia del eje Z la dirección de avance de la luz.

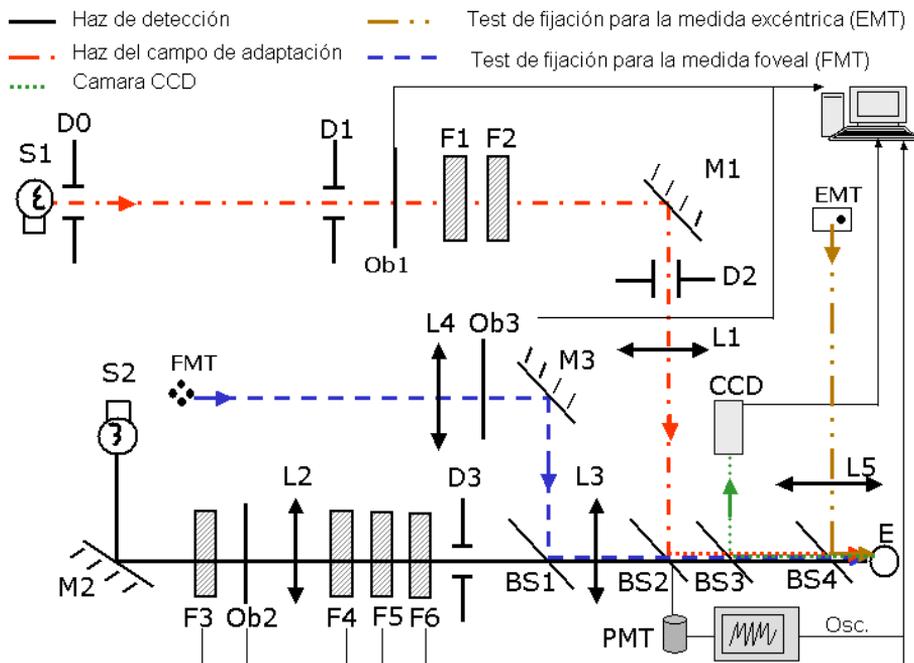


Figura 2.1 Esquema completo del dispositivo experimental.

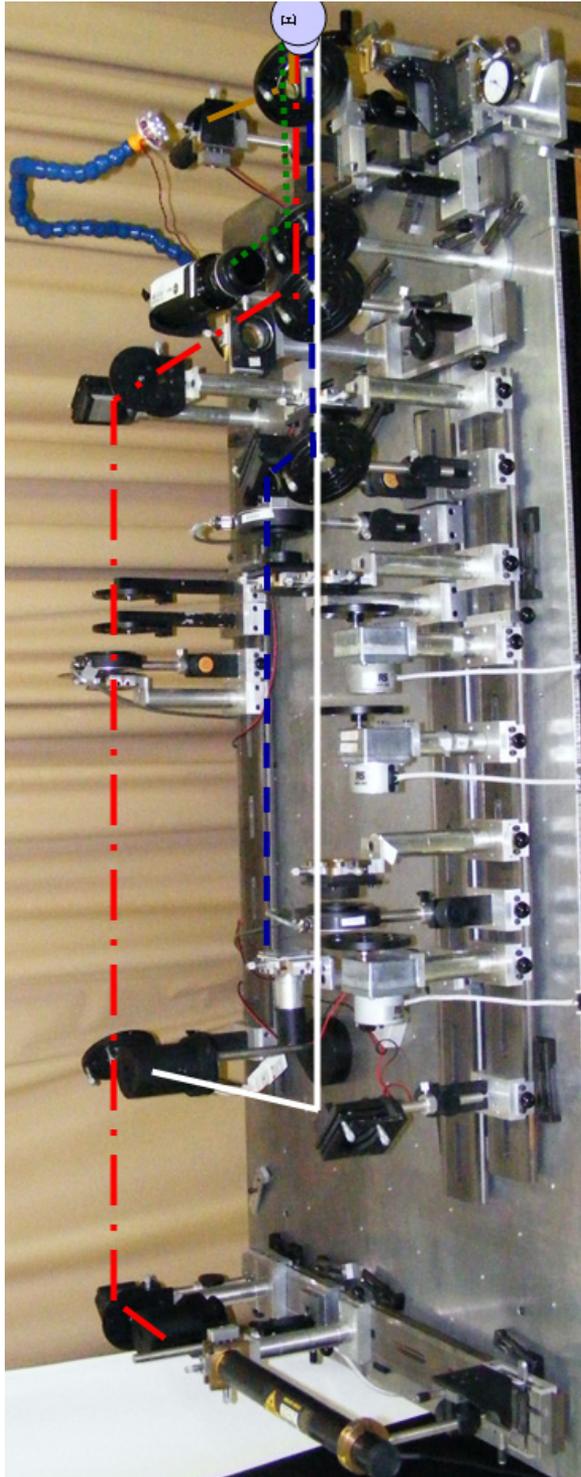


Figura 2.2. Fotografía del dispositivo experimental. (En esta fotografía se ha usado el mismo criterio de colores para los distintos haces del dispositivo, exceptuando para el haz de detección, que se ha sustituido por color blanco para poder distinguirlo mejor)

2.2.1 Haces principales de detección y de adaptación

Previamente a las medidas, el alineamiento fue realizado con un láser (632.8 nm). Las fuentes de luz utilizadas para estudiar los fenómenos relacionados con los procesos de adaptación retiniana suelen ser de luz blanca policromática (Baker, 1949). Un estímulo acromático puede evitar complicadas interacciones posiblemente debidas a los canales oponentes (Finkelstein and Hood, 1982). Además resulta interesante trabajar con estímulos policromáticos puesto que se pretende estudiar el comportamiento del sistema visual humano en términos de luminancia y no cromáticos. Por ese motivo, se utilizaron lámparas halógenas de luz incandescente de 50 W como fuentes de luz S1 y S2 para los haces del campo de adaptación y de detección respectivamente. Cada lámpara está conectada a una fuente estabilizadora independiente con la finalidad de mantener constante la intensidad de la corriente en 4 A y con mínimas variaciones. En estas condiciones la lámpara emite como un cuerpo gris a unos 3000 K. En la figura 2.3 se puede observar la densidad espectral de irradiancia de la lámpara, estabilizada a 4 A, utilizada en el dispositivo experimental. Dicha calibración ha sido realizada en el Centro De Tecnologías Físicas "Leonardo Torres Quevedo" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Estas lámparas de incandescencia son fuentes térmicas basadas en el calentamiento de un filamento de tungsteno y tienen una vida limitada. La luminancia se midió diariamente con el fin de controlar que sus valores se reproducían a lo largo del tiempo que duraban los experimentos. Se puede comprobar que las variaciones del logaritmo de luminancia fueron menores al 1.5%, en ambos haces, durante el período de tiempo de las pruebas.

En el haz de detección encontramos un diafragma (D3), cuatro tambores de filtros neutros (F3, F4, F5 y F6) y un obturador (Ob2); en el haz del campo de adaptación encontramos tres diafragmas (D0, D1 y D2), dos tambores de filtros (F1 y F2) y un obturador (Ob1). El separador de haz BS2, solapa ambos haces (Figura 2.1).

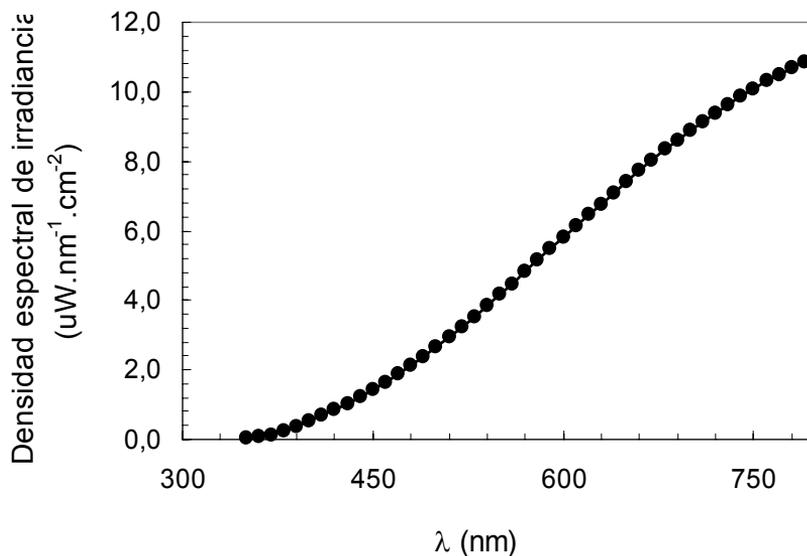


Figura 2.3. Curva de emisión de una lámpara incandescente halógena con filamento de tungsteno que emite a 3000 K, utilizada en este trabajo. En la figura se representa la densidad espectral de irradiancia ($\mu\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$), medida a 50 cm, en función de la longitud de onda.

Los diafragmas D3 y D2 determinan el tamaño angular del estímulo de detección y del campo de adaptación respectivamente. Estos diafragmas, circulares, se han situado sobre un soporte de fabricación propia, que permite variar manualmente el tamaño angular que subtienden desde el ojo del observador. En el caso del diafragma D3 los tamaños angulares posibles son de 0.43° , 0.57° , 0.69° , 0.77° , 1.09° , 1.6° y 2.3° y en el caso del diafragma D2 los tamaños angulares son de 0.20° , 0.26° , 0.32° , 0.36° , 0.5° , 0.75° y 1.05° . El diafragma D3 se situó en la focal de la lente L3 para formar su imagen en el infinito, de forma que el observador, emetropizado, viera el estímulo sin poner en juego la acomodación (Figura 2.4). Igualmente el diafragma D2 se encuentra en el plano focal objeto de la lente L1.

Las lentes L3 y L1 están situadas de forma adecuada para formar imagen del estímulo y del campo de adaptación, respectivamente, en el infinito. Las lentes L2 y L3 forman la imagen del filamento de la lámpara S2 en la pupila de entrada del ojo y la lente L1 forma la imagen del filamento de la lámpara S1 también en

la pupila de entrada del ojo para solaparse con el filamento de S2. Las lentes utilizadas son, en cualquier caso, dobletes acromáticos, minimizando los efectos de las aberraciones cromáticas. Estas lentes fueron montadas en soportes especiales mediante tornillos de precisión micrométrica, que permitían un ajuste fino de su posicionamiento XY. En la figura 2.4 se puede ver con detalle el trazado de rayos en el haz de detección. En el caso del haz del campo de adaptación el esquema conceptual es el mismo.

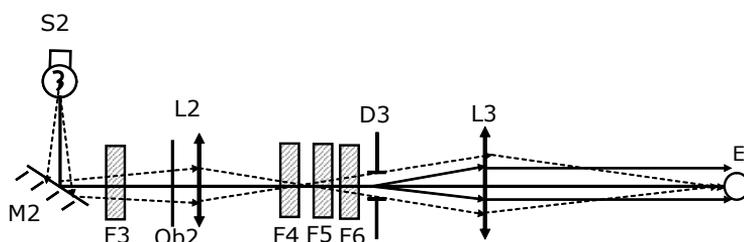


Figura 2.4 Detalle del haz de detección.

Los filtros de densidad neutra, empleados en ambos haces principales, fueron utilizados para variar la luminancia de los mismos, bien para la medida de la luminancia umbral o bien para modificar la luminancia del campo de adaptación. Estos filtros neutros de absorción y de 25 mm de diámetro se colocaron sobre discos rotatorios. En el apartado 2.3.3 se describirán con más detalle dichos filtros así como su calibración y su transmitancia espectral.

Los obturadores Uniblitz, Ob1 y Ob2, permiten variar el tiempo de exposición del campo de adaptación y del haz de detección respectivamente. Los obturadores son controlados por el programa LABOV, diseñado para el control del dispositivo. En el apartado 2.3.1 se describirán las características de dichos obturadores.

Se utilizaron separadores de haz tipo *“pellicle”*. Estas películas son membranas de nitrato de celulosa que se estiran sobre una montura de metal y que tienen un espesor de 2 μm . La ventaja de utilizar este tipo de película es que la reflexión de la segunda superficie está, a efectos prácticos, superpuesta a la de la primera superficie. Las películas utilizadas además no tienen recubrimiento

lo cual resulta una ventaja, ya que de lo contrario alterarían la temperatura de color del estímulo de detección y del campo de adaptación de forma diferente. Estas películas reflejan el 10% y transmiten el 90% de la luz incidente, cuando se usan a 45° . En resumen, estas películas son muy recomendables porque ofrecen un mínimo en: absorción, aberraciones cromáticas e imágenes residuales. En el montaje experimental se han utilizado películas de diámetro de 25 mm, excepto en el caso de la película BS4 que ha sido de un diámetro de 50 mm. Esta película tuvo que ser de mayor diámetro para que el observador pudiera ver el test de fijación para la medida excéntrica lo más periféricamente posible. Dichas películas fueron montadas sobre soportes de fabricación propia.

Esta configuración del dispositivo experimental permite al observador ver el estímulo de detección y el campo de adaptación concéntricos (Figura 2.5). Sin embargo, el dispositivo permite variar, si el experimento lo requiere, la posición del campo de adaptación con respecto al estímulo de detección. Además, permite controlar el tamaño, el tiempo de exposición y el tiempo de presentación entre ambos haces mediante diafragmas y obturadores respectivamente. Para conseguir que solamente llegue luz de los dos haces principales al ojo del observador, la habitación se mantuvo en completa oscuridad, mediante el apantallamiento adecuado.

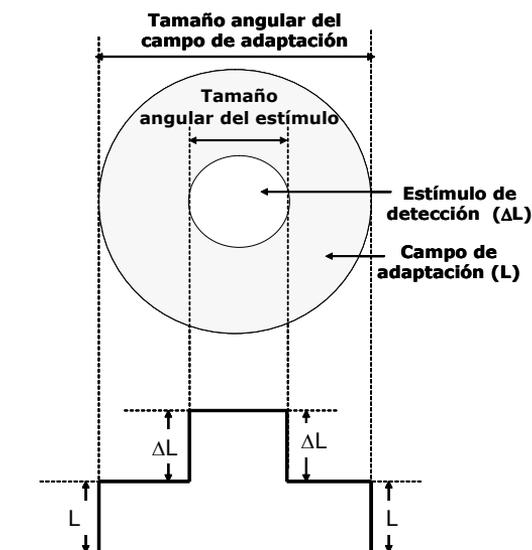


Figura 2.5 Vista del observador de ambos haces principales.

2.2.2 Test de fijación para la medida de sensibilidad retiniana foveal (FMT)

Se construyó un test con el fin de mantener la fijación mientras se realizaban las medidas foveales. La bibliografía existente recomienda que dicho test no sea mayor de 1° con el fin de evitar la inestabilidad de fijación (Finkelstein and Hood, 1986). Dicho test fue fabricado con una lámina de metacrilato a través de la cual se podían ver 4 puntos, en disposición de diamante, transiluminados mediante LEDs (longitud de onda central de 630 nm). Los LEDs utilizados fueron conectados a una fuente de alimentación de 5 V y mediante un regulador se podía variar la intensidad luminosa, además fueron cubiertos con una carcasa de metal negro, para evitar la difusión de la luz que emitían. Los cuatro puntos subtienden un ángulo de 0.45° , en dirección horizontal y vertical, desde la pupila de entrada del observador. En la figura 2.6 se puede observar con detalle el test de fijación para la medida foveal.

El test de fijación para la media foveal forma su imagen en el infinito, a través de las lentes L4 y L3, de forma que el observador, emetropizado, no tenga que poner en juego la acomodación (Figura 2.7). El programa LABOV permite controlar el tiempo de presentación del test como se verá detalladamente en el apartado 2.3.1. El obturador del test de fijación para la medida foveal (Ob3) se debe abrir el tiempo suficiente para que el observador fije fovealmente. Por otro lado, el tiempo que transcurre entre el cierre del obturador del test de fijación y la apertura del obturador del estímulo o del campo de adaptación debe ser lo suficientemente breve como para que el observador no pierda la fijación foveal antes de realizar la prueba.

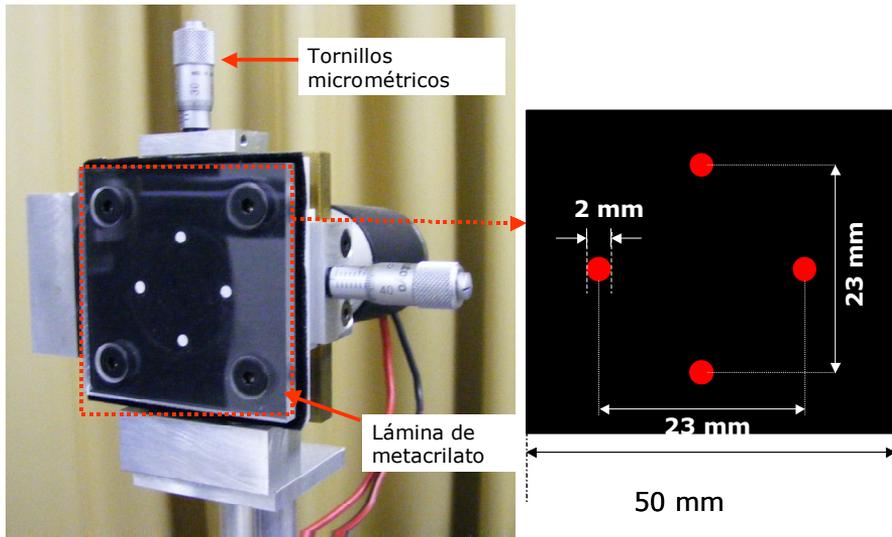


Figura 2.6 Detalle del test de fijación para la medida foveal (FMT). La distancia entre puntos subtende un tamaño angular desde el observador de 0.43° , y cada punto de $5'$.

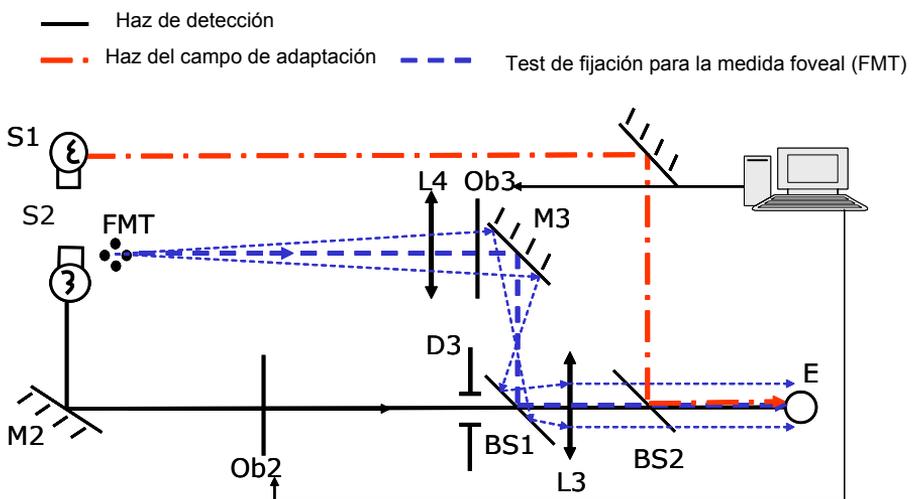


Figura 2.7. Formación de la imagen del test de fijación foveal en retina

2.2.3 Test de fijación para la medida de sensibilidad retiniana excéntrica (EMT)

El test de fijación para la medida de sensibilidad retiniana excéntrica (EMT) se diseñó con características similares al test de fijación para la medida foveal. El EMT será utilizado para que el observador mantenga la fijación foveal al tiempo que se mide la luminancia umbral en la retina periférica. Este test consta de un único punto de fijación conseguido mediante la realización de un orificio, de 0.5 mm, en una chapa de color negro mate (Figura 2.8). Al igual que para el test de fijación para la medida foveal se utilizaron unos LED's (longitud de onda central de 630 nm) para iluminar el punto de fijación. Estos LED's, que fueron cubiertos con una carcasa negra de color mate como la utilizada para el FMT, se conectaron a una fuente de alimentación de 5 V, y mediante un regulador se podía variar su intensidad luminosa.

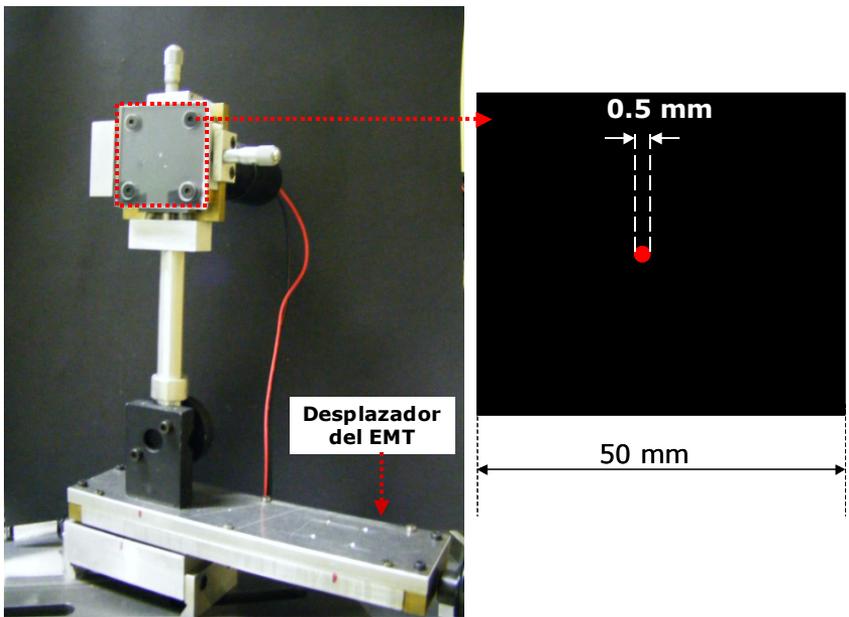


Figura 2.8 Detalle del test de fijación para la medida excéntrica (EMT). El punto de fijación subtende desde el observador un tamaño angular de 8.6'.

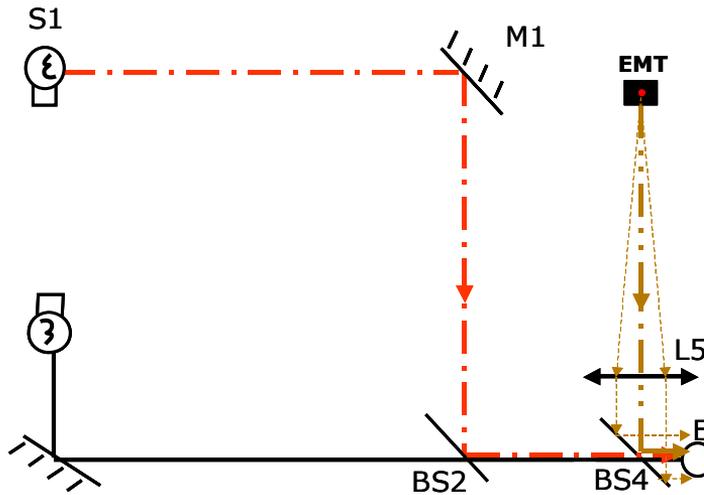


Figura 2.9. Formación de la imagen del test de fijación para la medida excéntrica (EMT) en retina

El test de fijación para la medida excéntrica ha de permanecer siempre encendido mientras se realizan las pruebas y por ello no requiere el uso de un obturador. La imagen de este test a través de la lente L5 se forma en el infinito y subtende un ángulo de $8.6'$ desde el observador. Para solapar la imagen del test con el campo de adaptación y el estímulo de detección se utilizó la película BS4 (Figura 2.9). De esta forma el observador puede ver el test de fijación, el estímulo de detección y el campo de adaptación simultáneamente y en el infinito. Para conseguir el máximo campo de visión se utilizó una película de diámetro de 50 mm y una lente L5 lo más próxima posible a dicha película.

Para poder cambiar la posición del test de fijación para la medida excéntrica sobre la retina periférica se utilizó un desplazador que permitía el movimiento de dicho test en dirección X (Figura 2.8). Una vuelta completa de la manivela del desplazador se corresponde con 1 mm de desplazamiento del test en el eje X. A su vez 1 mm de desplazamiento se corresponden con 0.3° de giro del ojo. Por tanto, para realizar las medidas a 3° de la retina periférica el desplazamiento del test, en el eje X, sería de 10 mm (Figura 2.10). De esta forma, la posición del test podía variar desde 0° hasta 15° , en pasos de menos de 0.1° , con respecto a la posición del estímulo de detección y/o del campo de adaptación.

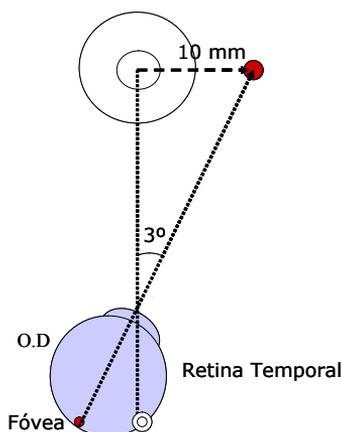


Figura 2.10. Detalle del desplazamiento del EMT para la medida en la retina periférica.

El dispositivo se podía utilizar para realizar medidas tanto en retina temporal como en retina nasal. Sin embargo, en este caso el dispositivo se preparó para la medida en retina temporal ya que, como se explicó en el capítulo 1, esta zona de la retina tiene mayor sensibilidad absoluta (Riopelle and Bevan, 1954).

2.2.4 Cámara para el control de la posición del observador

En el dispositivo experimental también se instaló una cámara CCD Retiga Exi modelo *Fast 1394* para el control de la posición del observador y del tamaño pupilar (Figura 2.11). El desarrollo de técnicas para la medida de la pupila humana con luz infrarroja ha sido realmente útil para poder realizar estudios de la respuesta pupilar a diferentes niveles de iluminación (Colombo *et al*, 2007; Spadea *et al*, 2005; Bootsma, *et al* 2007). Siguiendo la técnica de usar luz infrarroja para la medida de la pupila, esta es iluminada por 8 LEDs infrarrojos (longitud de onda central de 830 nm), de modo que la cámara, que incorpora un filtro que bloquea la luz visible, permite ver en todo momento, a través de la película BS3, la pupila del observador (E). La imagen de la pupila por la cámara CCD se puede ver con detalle en la figura 2.12. Para mantener estabilizada la posición de la cabeza se utilizó una

impresión dental, individualizada para cada observador, instalada sobre un desplazador XYZ. Este desplazador XYZ fue utilizado para centrar la pupila del observador. (Figura 2.13b)

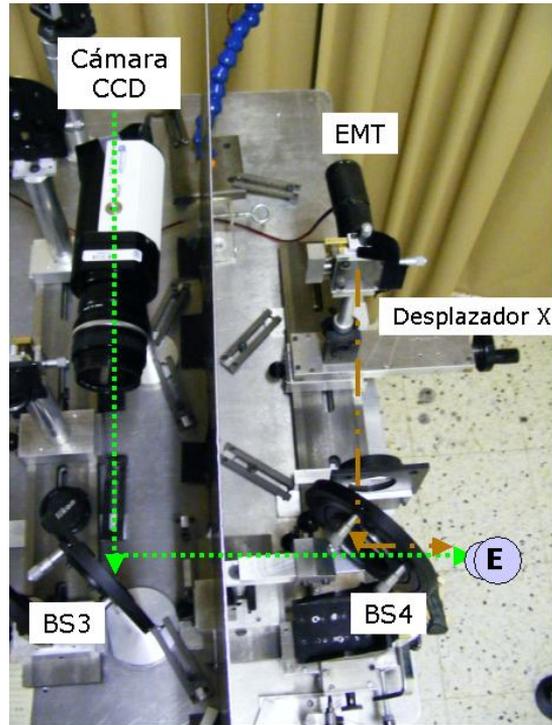


Figura 2.11. Detalle de la cámara CCD y del test de fijación para la medida excéntrica (EMT)

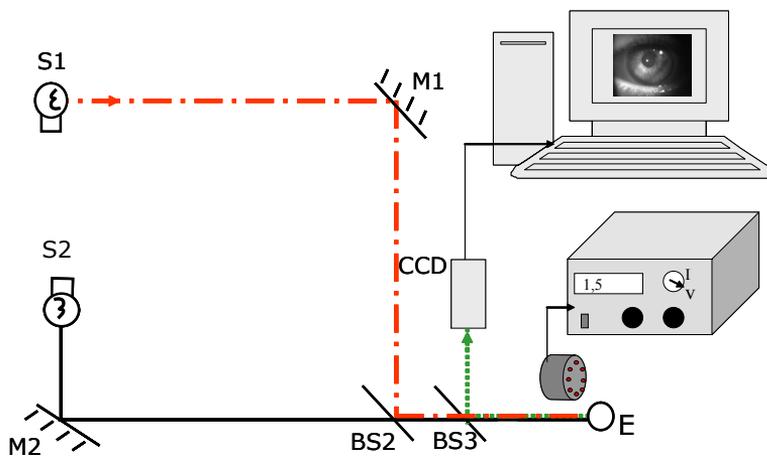


Figura 2.12. Detalle de la cámara CCD

2.2.5 Impresión dental

Para mantener estable y fija la posición pupilar se fabricó una impresión dental individual para cada observador (Figura 2.13). Dicha impresión dental es de un material termoplástico que tiene una temperatura de trabajo de 50° C. Cuando el material estaba en su temperatura adecuada se colocaba sobre la pieza metálica y el observador mordía sobre dicho material en la misma posición a la que iba a situarse sobre el dispositivo (Figura 2.13a). Para mantener y desplazar la impresión dental se fabricó un soporte con la posibilidad de moverse en dirección X,Y, Z mediante unos tornillos (Figura 2.13b).



Figura 2.13a. Detalle de la impresión dental

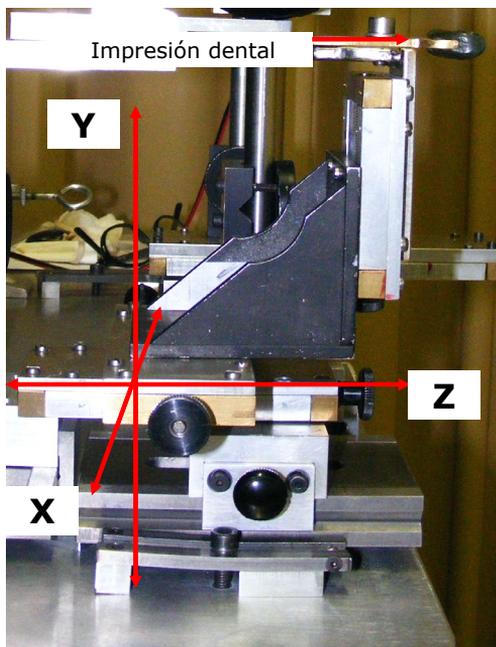


Figura 2.13b. Detalle del desplazador XYZ

2.3 Puesta a punto del dispositivo

Una vez que la parte óptica estuvo resuelta, fue necesario controlar el funcionamiento del dispositivo para comenzar a realizar las medidas. Todos los elementos que componen el dispositivo debían ponerse a punto antes de comenzar los experimentos. Para ello se establecieron las conexiones necesarias de los elementos ópticos, que fueron controlados por un programa diseñado específicamente para el manejo del dispositivo experimental (LABOV). De esta forma todos los obturadores del montaje y algunos filtros motorizados se controlaron con dicho programa. A su vez se determinó la técnica de medida de la luminancia de los dos haces principales y se calibraron los filtros utilizados. Por último se realizó un minucioso centrado del observador.

2.3.1 Control de precisión de los tiempos de cierre y apertura de los obturadores

En el dispositivo se han colocado tres obturadores Uniblitz VS25STO-100, uno para el haz del campo de adaptación (Ob1), otro para el haz de detección (Ob2) y un tercero para el test de fijación para la medida foveal (Ob3). El cierre y apertura de los obturadores es controlado por el usuario mediante el programa. Las conexiones del sistema informático con los obturadores se pueden ver en la figura 2.14.

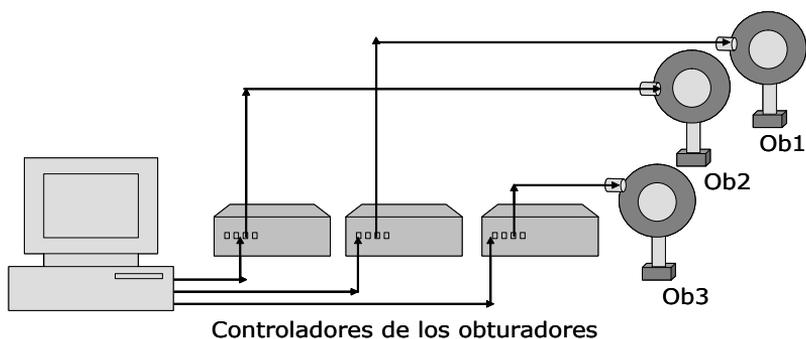


Figura 2.14. Conexiones de los obturadores mediante los controladores (Modelo VMMD1) al ordenador control

Se ha comprobado la precisión de los tiempos de cierre y apertura de los obturadores, en su posición habitual, mediante un fotomultiplicador (PMT) y un osciloscopio (Osc) (Figura 2.1). En la figura 2.15 se representan los milivoltios registrados, en un tiempo de apertura del obturador de 500 ms, para tres registros diferentes (Y1, Y2, Y3). Se puede observar que no hay diferencias apreciables para los tres registros. Los experimentos realizados nos permitieron comprobar que el tiempo de apertura y cierre de los obturadores es repetitivo y que la precisión fue del orden del milisegundo. Este control se ha realizado también para tiempos de apertura de 10 ms y 50 ms, llegando a la misma conclusión.

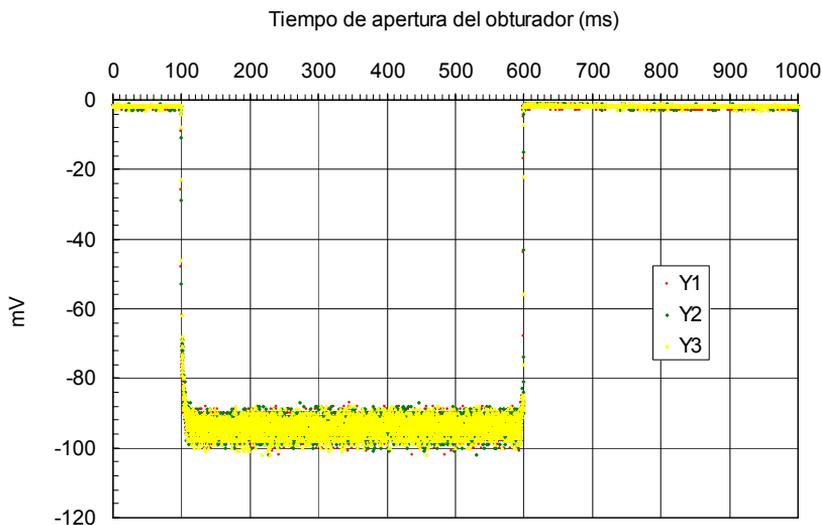


Figura 2.15. Señal registrada por el fotomultiplicador para un tiempo de apertura del obturador de 500 ms.

El sistema informático controla el instante de apertura y cierre de los obturadores. Dicho programa se ha diseñado para que los obturadores se abran y se cierren de forma controlada, con prácticamente cualquier presentación temporal. La figura 2.16 representa los tiempos de presentación de test de fijación para la medida foveal (t_{FMT}), del estímulo de detección (t_e) y del campo de

adaptación (t_a), así como el tiempo que transcurre desde el cierre del test de fijación y la apertura del campo de adaptación (t_1) y el tiempo que transcurre desde el cierre del campo de adaptación y el estímulo de detección (t_2). Todos estos tiempos pueden variar según el experimento. El tiempo t_2 puede ser positivo cuando la presentación del estímulo de detección es posterior al cierre del campo de adaptación (Figura 2.16) o negativo cuando la presentación del estímulo de detección se solapa con el campo de adaptación o se presenta antes. El control de los tiempos de presentación y el retardo entre los tres obturadores dependerá del experimento y siempre se realizará mediante el programa.

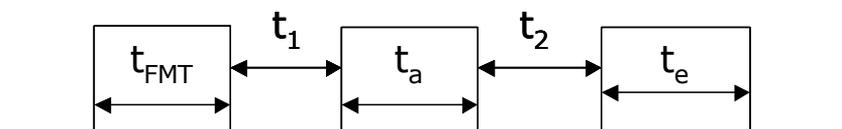


Figura 2.16. Tiempos de presentación del FMT, estímulo de detección y campo de adaptación.

2.3.2 Medida de la luminancia

Todas las medidas de luminancia han sido realizadas con un luminancímetro Spectra Pritchard modelo 1980A. La CIE ha establecido la sensibilidad espectral del observador patrón en visión fotópica y en visión escotópica (Artigas *et al*, 1995). En esta memoria siempre nos vamos a referir a medidas fotométricas fotópicas.

La medida de la luminancia en el haz de detección y del campo de adaptación proporciona información sobre la cantidad de luz que llega al plano pupilar del observador. Por otro lado, la medida de la luminancia es imprescindible para realizar la calibración de los filtros neutros y así conocer la luminancia umbral percibida por el observador en los experimentos.

2.3.2.1 Técnica de medida de la luminancia

Para medir la luminancia se situó el luminancímetro directamente sobre el haz de detección, enfocado en el plano del diafragma D3, como se refleja en la figura 2.17. Sin embargo, con el fin de asegurar que la medida era adecuada se diseñó una prueba de comprobación basada en la igualación psicofísica de semicampos.

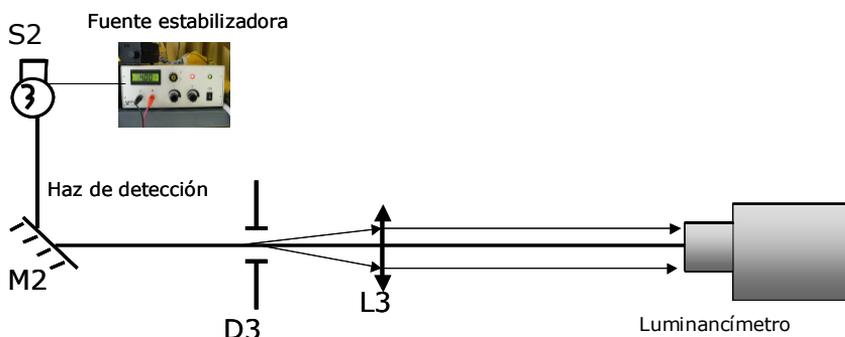


Figura 2.17. Medida directa de la luminancia

Para realizar esta prueba se sustituyó la cámara CCD del dispositivo por una fuente de luz S3, de iguales características que las fuentes S1 y S2, conectada a una fuente estabilizadora a 4 A. Además se fabricaron dos piezas semicirculares complementarias, de diámetro 3.8 mm. Las piezas semicirculares fueron colocadas en los planos focales objeto de la lente L3, del mismo brazo de detección, y de la lente L6, situada en el nuevo brazo. Esto significa que, en el caso del haz de detección, la pieza semicircular se situó en el lugar donde habitualmente se encuentra el diafragma D3.

Mediante observación directa, por parte de un sujeto, se igualó el brillo percibido de los dos semicampos proyectados sobre una pantalla, situada en el plano focal de la lente L7. Para igualar el brillo se interpusieron filtros neutros (F), presentados en forma de escalera, ascendente y descendente, en pasos de densidad de 0.1 unidades logarítmicas. Una vez igualado el brillo, se calculó la

luminancia del nuevo haz con el luminancímetro situado frente al mismo (Figura 2.18) y se calculó la luminancia del semicampo, proyectado en la pantalla, en función de la transmitancia y reflectancia de la película BS3.

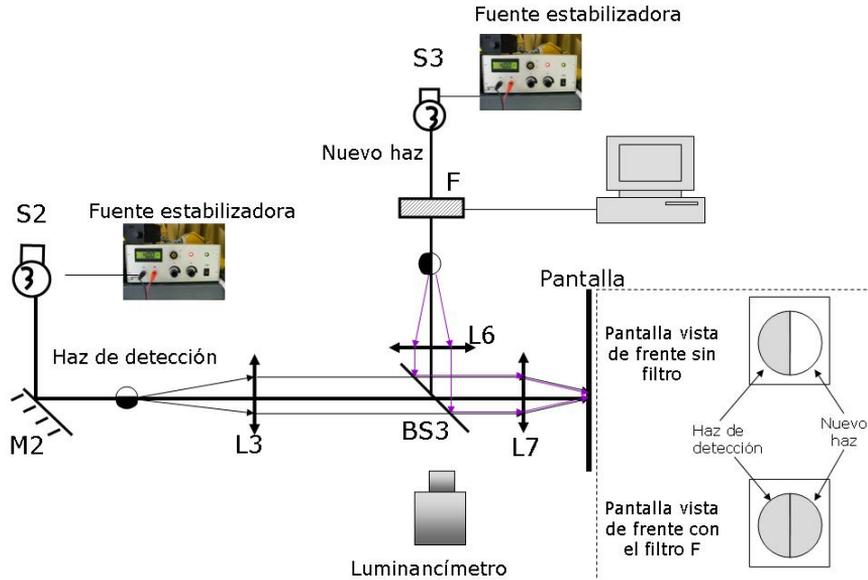


Figura 2.18 Medida de la luminancia del haz de detección a partir de una técnica de compensación psicofísica

El valor de la luminancia, para ambos semicampos, presentó una diferencia del 2.3% con el valor determinado por la medida directa. Estos resultados aseguran la fiabilidad de la medida con el luminancímetro de forma directa sobre el haz.

Esta pauta de medida fue realizada de forma similar en el haz del campo de adaptación. La medida de la luminancia, tanto del haz de detección como del haz del campo de adaptación, debe ser realizada antes de cada prueba o experimento. Esta medida además fue imprescindible como paso previo para el cálculo de la transmitancia de los filtros y sus densidades ópticas.

2.3.2.2 Medida de las fluctuaciones de la emisión de las fuentes de luz

Con el fin de estimar las derivas de las lámparas utilizadas en los experimentos, se midieron los valores de luminancia, para cada una de las lámparas, desde el instante del encendido hasta 5 horas después, en intervalos de 15 minutos. En la figura 2.19 se ha representado el valor del logaritmo de la luminancia de las fuentes S1 y S2 en función del tiempo. La representación en unidades logarítmicas ayuda a una mejor comprensión de la repercusión de las fluctuaciones sobre las medidas en los experimentos realizados en esta memoria, ya que todos los valores de luminancia umbral se representarán siempre en unidades logarítmicas. Como se puede apreciar en el momento del encendido el valor de la luminancia presenta un pico que disminuye notablemente en los primeros 15 minutos. Aunque desde el momento del encendido hasta los primeros 60' la variación del logaritmo de la luminancia es de 1.3%, tanto para S2 como para S1, la luminancia tiende a estabilizarse en el período de una hora. Entre la primera hora desde el encendido y las 5 horas después, la luminancia muestra variaciones menores del 0.26% para el estímulo de detección y del 0.45% para el campo de adaptación. Las fluctuaciones después de una hora de encendido son mínimas y por ese motivo el tiempo de espera anterior a la realización de las medidas fue siempre al menos de una hora para una mayor estabilización de las lámparas.

2.3.2.3 Medida de la luminancia en condición de oscuridad absoluta

Para conseguir la máxima oscuridad en ausencia de luces residuales se apantallaron todos los elementos posibles de dispersión de luz. Con el apantallamiento sobre dicho dispositivo se midió la luminancia percibida por el observador en su posición de medida, cuando no se le mostraba ningún haz de luz. Para la medida de la luminancia en oscuridad completa se comprobó en primer lugar el *offset* del propio luminancímetro y el ruido intrínseco del instrumento. Se pudo observar que cambiando el campo de medida del luminancímetro de 3° a 6' el *offset* se multiplica por 10³. El ruido propio de este instrumento de medida, es por tanto mayor con un campo de medida más pequeño. Por esta razón se utilizó un campo de 3° para la medida de luminancia

en la oscuridad completa resultando un valor medio de luminancia de $3.5 \times 10^{-6} \text{ cd/m}^2$ (con un error de $\pm 1.5 \times 10^{-6} \text{ cd/m}^2$).

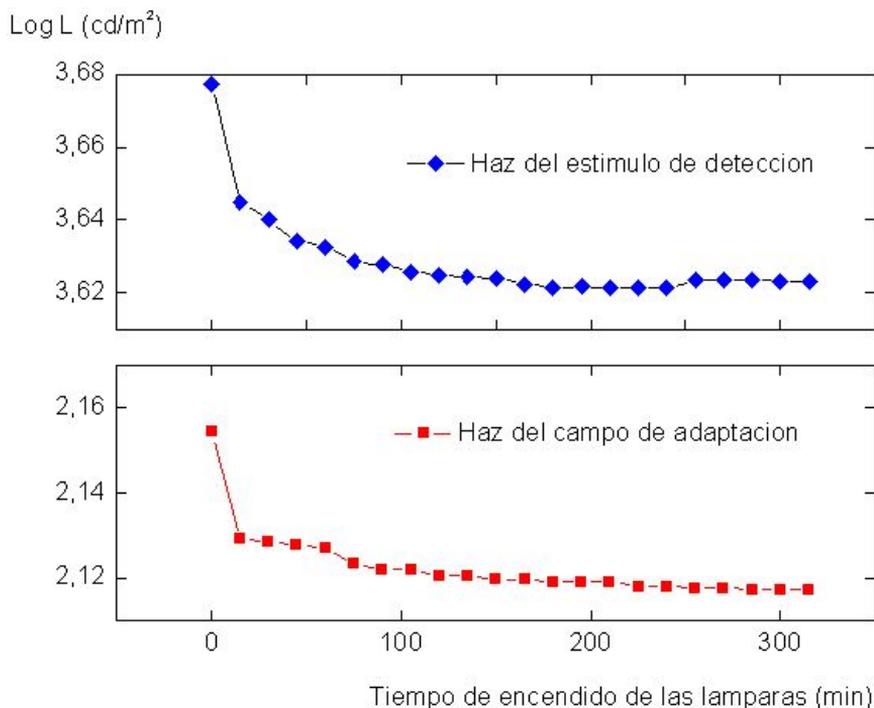


Figura 2.19. Evolución temporal del logaritmo de luminancia del haz de detección y campo de adaptación durante 5 horas.

2.3.3 Calibración de los filtros

Los filtros de densidad neutra fueron colocados sobre discos rotatorios y montados sobre un soporte. Cada disco rotatorio tiene 6 posiciones, una de ellas sin filtro y 5 posiciones restantes para filtros de 25 mm de diámetro. Como se ha podido ver, en el apartado 2.2.1, en el haz de detección se interpusieron los tambores de filtros motorizados F3, F4, F5 y F6. Los pasos de densidad de estos filtros fueron de 0.1, 0.5, 1 y 2 respectivamente. En el haz del campo de adaptación se interpusieron los filtros F1 y F2, no motorizados, con pasos de densidad de 0.1 y 0.5

respectivamente. Con estos filtros es posible variar la luminancia, en pasos de 0.1, desde 0.1 hasta 18 unidades logarítmicas en el haz de detección, y desde 0.1 a 3.0 unidades logarítmicas en el caso del haz del campo de adaptación. En los filtros motorizados el motor permite rotar la posición de dichos filtros un ángulo de 360° en ambas direcciones. El movimiento de los motores de los filtros está controlado por el programa a través del ordenador. En la figura 2.20 se pueden ver con detalle algunos de los filtros utilizados y las conexiones con el ordenador.

Medida de la densidad real de los filtros: La calibración de los filtros neutros ha sido realizada con el luminancímetro Spectra Pritchard, utilizado para la medida de luminancia. Con el fin de comprobar la densidad real de los filtros utilizados en el dispositivo, se han medido las luminancias tanto sin filtro como a través de cada uno de los filtros utilizados. Con el valor obtenido de la transmitancia luminosa de cada filtro (T) se ha podido calcular la densidad óptica real de los mismos (D). La determinación de la densidad óptica real tiene un error de ± 0.02 . En la tabla 2.1 y 2.2 se indica la densidad medida de cada filtro y su correspondiente densidad nominal (densidad dada por el fabricante) pudiendo comprobar como, en algunos casos, no se corresponden exactamente.

Para conseguir pasos de densidad desde 0.1 hasta 18, se combinaron los tambores de los filtros en la posición adecuada. Las posiciones fueron numeradas de 0 a 5 en cada uno de los tambores. Dicha combinación fue controlada por el programa. En el Anexo I se pueden observar las distintas combinaciones de algunos de los filtros disponibles en el experimento y su posición para conseguir la densidad real necesaria. El programa permite rotar los tambores en ambas direcciones consiguiendo la combinación de filtros deseada en el menor tiempo posible. Sin embargo, aunque este tiempo es el mínimo posible, no es constante sino variable dependiendo de la posición de cada tambor.

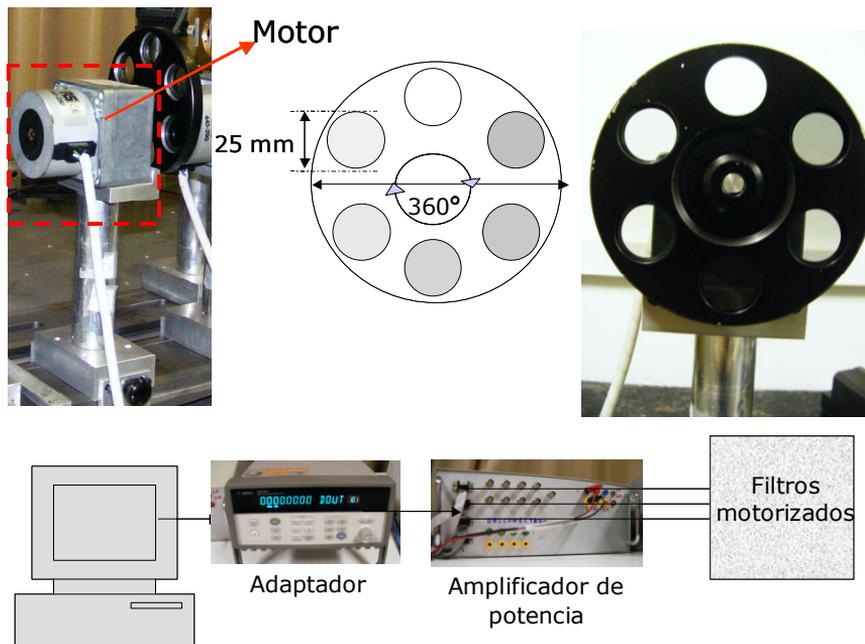


Figura 2.20 Detalle del tambor de filtros y de las conexiones con la computadora.

Tabla 2.1					
F4		F3		F5	
Densidad nominal	Densidad medida	Densidad nominal	Densidad medida	Densidad nominal	Densidad medida
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.10	0.50	0.53	1.00	1.10
0.20	0.20	1.00	1.00	2.00	1.91
0.30	0.30	1.50	1.49	3.00	2.92
0.40	0.40	2.00	2.03	4.00	4.98
0.50	0.53	2.50	2.57	5.00	6.65

Tabla 2.1 Relación entre la densidad nominal y la densidad real de los filtros situados en el haz de detección

Tabla 2.2			
F1		F2	
Densidad nominal	Densidad medida	Densidad nominal	Densidad medida
0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.11	0.50	0.53
0.20	0.24	1.00	1.11
0.30	0.33	1.50	1.45
0.40	0.43	2.00	2.05
0.50	0.53	2.50	2.55

Tabla 2.2 Densidad para los filtros situados en el haz del campo de adaptación

Medida de la transmitancia espectral de los filtros: Con el fin de comprobar que los filtros transmiten por igual en todas las longitudes de onda del espectro visible se midió la transmitancia de los filtros más utilizados en los experimentos en función de la longitud de onda mediante un espectrofotómetro *Safas Monaco*. En la figura 2.21 se ha representado la densidad, en lugar de la transmisión con el fin de continuar con la misma nomenclatura utilizada en este apartado. Esta figura representa la densidad de los filtros de densidad nominal 0.1, 0.5 y 1 en función de la longitud de onda. Estos resultados indican que los filtros utilizados tienen una transmisión adecuada en todas las longitudes de onda del espectro visible, y que sólo cambia ligeramente a partir de 670 nm. Esta variación, sin embargo, no es relevante para nuestras medidas, ya que la curva de la eficiencia luminosa del sistema visual humano transmite valores significativamente bajos en esas longitudes de onda.

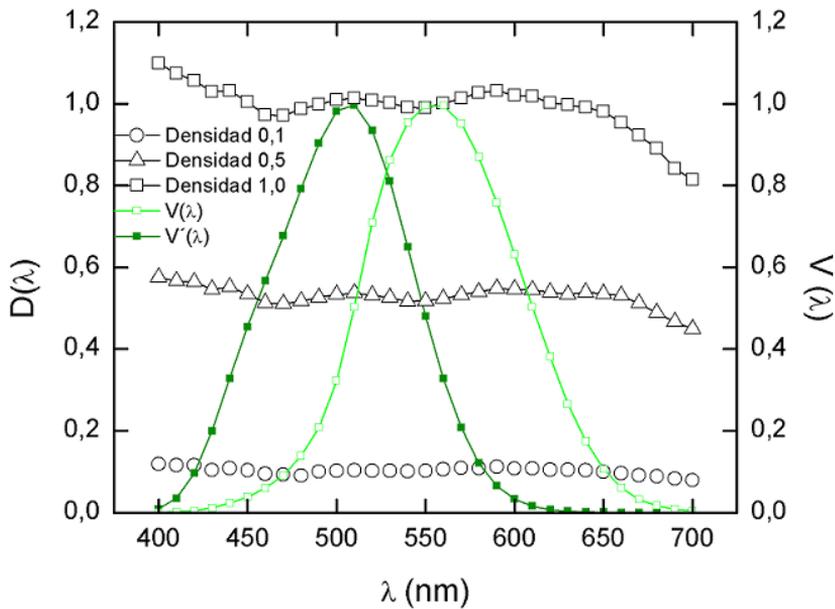


Figura 2.21 Densidad de los filtros de 0.1, 0.5 y 1.0 en función de la longitud de onda. En la figura se representan las curvas de visibilidad fotópica $V(\lambda)$ y escotópica $V'(\lambda)$ para el observador patrón

2.3.4 Control de la posición del observador

El último paso, previo a las medidas, fue el control de la posición del observador en el dispositivo experimental. Se comenzó solapando los filamentos de las lámparas en un mismo plano. Para ello se comprobó, mediante una pantalla milimetrada, que la imagen de los filamentos de las fuentes, S1 y S2 se solaparan en el mismo plano. Dicha pantalla milimetrada permite medir los tamaños de ambos filamentos, siendo de 2.5 mm alto x 0.8 mm ancho para S2 y de 1.5 mm alto x 0.8 mm ancho para S1. Esta imagen llega a través del separador de haz BS3 a una cámara CCD que la envía a la computadora. Mediante un software adecuado dicha imagen puede verse en tiempo real o ser capturada para ser procesada. Posteriormente se comprobó, mediante un telescopio, que tanto el haz de detección como el haz del campo de adaptación estuvieran concéntricos, tal y como se comentó en el apartado 2.2.1. Una vez estuvieron centrados los haces principales, se situaron el FMT y el EMT también concéntricos con el estímulo de detección y el campo de adaptación. De este modo, el dispositivo se

encontraba preparado para centrar al observador, fijado sobre la impresión dental, mediante el desplazador XYZ (Figura 2.22). Tanto para el centrado pupilar en XYZ como para el control del tamaño pupilar se utilizó la cámara CCD previamente citada.



Figura 2.22 Posición del observador en el dispositivo.

2.3.4.1 Centrado pupilar

Para conseguir un correcto centrado pupilar, la pupila de entrada del ojo debe estar situada en el plano donde se forma la imagen de ambos filamentos, para lo cual se moverá al observador en dirección Z. Además, para conseguir que los filamentos de las fuentes S1 y S2 estén en el centro pupilar se moverá al observador en dirección horizontal (X) y vertical (Y).

Cuando la cámara CCD está correctamente enfocada, en el plano donde forman imagen los filamentos solapados, el ojo del observador se debe mover en dirección Z hasta que se ve nítida la imagen del iris a través de la cámara. Una vez posicionada la pupila en dirección Z, puede verse la imagen del filamento reflejada a través de los medios oculares (Figura 2.23). Posteriormente se manipula el desplazamiento en XY para que la imagen de los filamentos quede siempre en el centro pupilar.

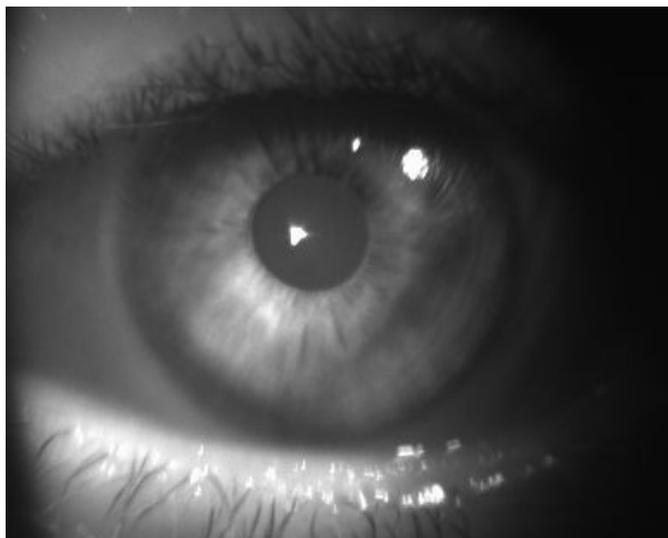


Figura 2.23 Imagen del filamento sobre el centro pupilar. Se observan los reflejos de Purkinje.

Una vez realizado el centrado, el observador tiene la posición adecuada para realizar las medidas foveales. Sin embargo, cuando el observador mira el test de fijación para la medida excéntrica en diferentes zonas de la periferia de la retina se observa como el filamento se descentra con respecto al centro pupilar debido al giro ocular. Mediante un cálculo simple se determinó el desplazamiento necesario en la dirección X para cada excentricidad con el fin de situar la posición de los filamentos centrada sobre la pupila cuando se realizan las medias excéntricas. Esto evita en cualquier caso el efecto Stiles-Crawford independientemente de la excentricidad a la que se quiera medir. Para realizar este desplazamiento calculado en X se utilizó el reloj comparador (Figura 2.24). En esta situación siempre se comprobó que el tamaño

pupilar fuera mayor que el tamaño de la imagen de los filamentos; en caso contrario se utilizaría un midriático.

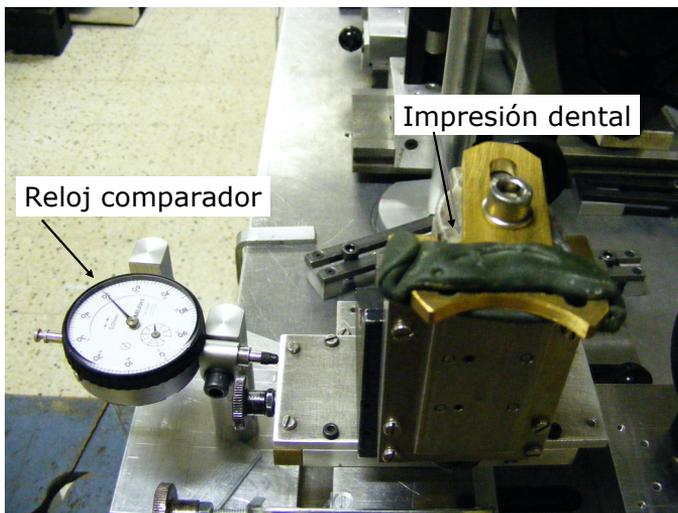


Figura 2.24 Detalle del reloj comparador y de la impresión dental

2.3.4.2 Control del tamaño pupilar

En los experimentos de esta memoria se utilizan luminancias dentro del rango escotópico, mesópico y fotópico. Es bien sabido, como se explicó en el apartado 1.1, que el diámetro pupilar varía con el nivel de luminancia del campo de adaptación. Por este motivo y con el fin de comprobar si el tamaño del filamento era menor que el tamaño pupilar se midieron los diámetros pupilares para campos de adaptación de 5 cd/m^2 y 100 cd/m^2 (luminancias utilizadas en los experimentos). Las medidas se realizaron con la cámara CCD instalada en el dispositivo. Se hicieron 5 medidas del tamaño pupilar en cada condición de luminancia y se calcularon los valores medios así como su desviación estándar. Para un campo de adaptación de luminancia 5 cd/m^2 la media del diámetro pupilar fue de 5.6 mm , con una desviación de $\pm 0.55 \text{ mm}$. Para un campo de adaptación de 100 cd/m^2 la media del diámetro pupilar fue de 3.7 mm , con una desviación estándar de $\pm 0.4 \text{ mm}$.

Según estos valores, el diámetro pupilar es mayor que el tamaño del filamento en los dos niveles de luminancia utilizados evitando que la pupila corte el filamento. Si se observa el diámetro pupilar con un campo de adaptación de 100 cd/m^2 , la máxima contracción pupilar, producida inmediatamente después de la presentación del campo de adaptación reduce la pupila a un diámetro menor que el tamaño del filamento, lo que no ocurre con 5 cd/m^2 . Esta situación hace necesaria la utilización de midriáticos para la dilatación pupilar cuando se utiliza luminancia fotópica.

2.4 Conclusiones

El dispositivo experimental se ha diseñado con el propósito de realizar los experimentos desarrollados en los capítulos 3 y 4. La resolución temporal del orden del milisegundo y la resolución espacial del orden del medio grado que se han conseguido con dicho dispositivo son adecuadas para la medida de los procesos rápidos de adaptación retiniana. Por otro lado, el control preciso de aspectos como la luminancia, localización retiniana, tiempos, áreas estimuladas, o posición del observador hace que este dispositivo sea útil y suficientemente preciso para comenzar con los experimentos. Estos experimentos, capaces de reproducir trabajos clásicos de la literatura, permiten evaluar de manera precisa la respuesta espacio temporal del sistema visual humano para amplios rangos de luminancia. A su vez, esto permite comprender los mecanismos que explican esa respuesta, así como evaluar sus efectos en situaciones reales de la vida cotidiana, como la conducción, o estudiar y caracterizar los comportamientos no normales de los sujetos con patologías oculares. Se puede concluir que los objetivos planteados en cuanto a resolución angular y temporal, así como el tipo y características de la iluminación, y alineamiento adecuado del observador, se han conseguido con este dispositivo.

CAPÍTULO 3

Prestaciones del montaje experimental. Comparación con experimentos previos

Una vez diseñado y puesto a punto el dispositivo experimental se realizarán las primeras pruebas con el objetivo de comprobar las prestaciones del montaje. Estas pruebas tienen como finalidad comprobar que el aparato diseñado puede reproducir trabajos clásicos, de forma que se pueda comprobar la solidez y fiabilidad del mismo para los posteriores trabajos que se van a describir en esta memoria. Para ello se han establecido dos experimentos. El primero será comprobar los métodos psicofísicos que se van a utilizar. Se harán medidas de luminancia umbral con tres métodos, comparándolos entre sí, comprobando sus diferencias y analizando sus variaciones con el fin de determinar el más adecuado. El segundo experimento pretende reproducir algunos de los trabajos clásicos de medida de luminancia umbral mediante el método *prueba-flash*, ya mencionados en el capítulo 1. Se realizará un trabajo semejante al de Crawford en 1947 y al de Boynton en 1954, comparando los resultados obtenidos con los de estos autores. Una vez determinado el método psicofísico más adecuado, y haber validado y afianzado el dispositivo, se llevará a cabo el trabajo descrito en el capítulo 4, núcleo de resultados de esta memoria.

3.1 Análisis del método psicofísico

Debido a las características y a la complejidad del sistema visual resulta difícil cuantificar las relaciones entre el estímulo y su percepción final. Para ello, se han desarrollado diferentes sistemas de medida con el fin de aumentar la precisión y minimizar los errores. Estos métodos de medida cuantifican las relaciones entre el estímulo y la respuesta visual en condiciones determinadas. Sin embargo, siempre que se realizan mediciones sensoriales, hay que tener en cuenta que dependen tanto del propio observador como del método utilizado. Se han desarrollado distintos métodos psicofísicos a lo largo de los años. En este apartado se analizan las medidas realizadas con dichos métodos con el fin de afianzar el dispositivo como un instrumento válido para este tipo de pruebas.

Algunos de los trabajos que estudian el comportamiento retiniano ante campos de adaptación transitorios utilizan el método de límites ascendentes (Hood, 1990). Este método consiste en ir aumentando la luminancia del estímulo hasta que el observador es capaz de responder que sí percibe dicho estímulo. Otros autores utilizan el método de límites descendentes (Boynton, 1954). Este método consiste en ir disminuyendo la luminancia del estímulo hasta que el observador es capaz de responder que no percibe dicho estímulo. El uso de límites descendentes podría distorsionar la evolución temporal de la adaptación (Baker, 1949) o en el caso de estudiar la adaptación a la oscuridad puede incluso producir un blanqueamiento del fotorpigmento, no deseado, debido a la presentación del primer estímulo con una luminancia muy por encima del valor umbral (Plainis, 2005). Aunque, por otro lado, presentar primero el estímulo más visible resulta más familiar para los observadores lo cual puede suponer una ventaja para su uso en estudios de tipo clínico. El método de los límites puede dar lugar a una tendencia por parte del observador a repetir la misma respuesta produciendo errores en la estimación del umbral. Este error hace que el umbral determinado con el método de límites descendentes sea menor que el determinado con el método de límites ascendentes (Gescheider, 1997). En cualquier caso, alternar las series ascendentes y descendentes o utilizar el método de la escalera puede minimizar dichos errores. Este método consiste en presentar sucesivamente series ascendentes y descendentes. El sentido de la serie se invierte cuando el sujeto invierte su respuesta.

Cornsweet (1962) modificó este sistema presentando dos series alternadas de forma aleatoria para evitar la influencia del conocimiento del observador sobre cómo varía el estímulo en función de su respuesta.

En estudios más recientes otros autores utilizan el método de estímulos constantes (Bichao, 1995; Issolio, 2006a). Este método consiste en escoger un número fijo de intensidades del estímulo (este número de intensidades fijas está generalmente entre 5 y 7). Estas intensidades deben estar en el rango del umbral. Cuando las intensidades se han escogido, se presentan en un orden aleatorio. Cada serie aleatoria de estímulos se presenta varias veces (en general, más de 20 veces). Las respuestas son Si-No (es decir, visto - no visto). El observador tiene que escoger una de las dos alternativas disponibles. Un observador ideal pasaría de ver siempre un estímulo a no verlo nunca, con un mismo umbral de detección en todas las medidas. Sin embargo, un observador real no tiene tan claramente definido el umbral de detección debido al ruido neuronal intrínseco del sistema visual humano y también al ruido propio de la imagen observada o ruido externo. La señal producida por el estímulo debe ser percibida diferente del propio ruido neuronal, de lo contrario no se percibiría. El ruido además puede variar en el tiempo, variando así el umbral de detección (Schwartz, 2004). Con este método se obtiene una función psicométrica que tiene la forma de una función sigmoide, a menudo denominada Ogiva de Galton, y que ofrece la probabilidad de la detección de un estímulo. Esta función psicométrica permite una mejor comprensión del mecanismo de detección ya que factores como el ruido, también están implicados en la forma de esta función. Es habitual utilizar como valor del umbral aquel que da lugar a una probabilidad de detectar o ver el estímulo el 50% de las veces que es presentado.

En base a esto, cada método psicofísico plantea diferentes ventajas y desventajas, y por tanto en este experimento se van a analizar distintos métodos psicofísicos para compararlos entre sí, así como para seleccionar el más adecuado en cada prueba.

3.1.1 Método

3.1.1.1 Observadores

En el experimento han participado dos sujetos (BM e IA), de edades de 38 y 35 años en el momento del experimento. Ambos observadores fueron emetropizados con la compensación óptica que les proporcionó su mejor agudeza visual. El valor de la agudeza visual siempre fue mayor de 20/20 Snellen. Para determinar la compensación óptica se les realizó un examen visual optométrico en una habitación adecuadamente iluminada y con un test de agudeza visual diseñado para los experimentos descritos en esta memoria, con el fin de asegurar una medida más precisa. El observador IA era usuario habitual de lentes de contacto, y se le prescribieron aquellas con las cuales obtenía su mejor agudeza visual. Durante las pruebas utilizó dichas lentes de contacto. Ambos observadores, que no presentaron ningún tipo de enfermedad sistémica, fueron sometidos a una exploración visual para determinar si eran ocularmente normales. Los medios oculares no presentaron opacidades de ningún tipo y tenían un fondo de ojo completamente sano. Todas las medidas fueron monoculares, realizadas en ambos casos sobre los ojos derechos de los sujetos y con los respectivos ojos izquierdos ocluidos. Todas las medidas se realizaron en condiciones de oscuridad, habiendo estado adaptados a dicha situación durante un período de 30 minutos.

3.1.1.2 Procedimiento

Para hacer las medidas se utilizó el dispositivo experimental diseñado y descrito en el capítulo 2. Los observadores se posicionaron sobre su impresión dental y fueron centrados según el procedimiento descrito en el apartado 2.3.4 del capítulo 2. Durante el centrado se solaparon las imágenes de los filamentos de las dos fuentes de luz, y se situaron centradas sobre el plano pupilar del observador, comprobando a su vez, que se veían concéntricos el campo de adaptación, el estímulo y el test de fijación para la medida foveal.

Todas las medidas fueron realizadas en visión foveal para tres métodos psicofísicos: límites ascendentes, límites descendentes y estímulos constantes o aleatorio. Los valores de la luminancia umbral (L_u), fueron medidos para los tres métodos psicofísicos. Para determinar estos valores se presentó el estímulo de detección, durante 40 ms, 100 ms después del apagado del campo de adaptación transitorio de 500 ms. Se consideró un tiempo de espera entre pruebas de 30 s, siendo suficiente para la recuperación de la retina (Boynton, 1954). En la figura 3.1 se puede ver un esquema de la presentación temporal del estímulo. El tamaño angular del test de fijación fue de 0.45° , del campo de adaptación de 0.75° y del estímulo de detección de 0.43° . En cualquier caso la luminancia del campo de adaptación fue de 241 cd/m^2 .

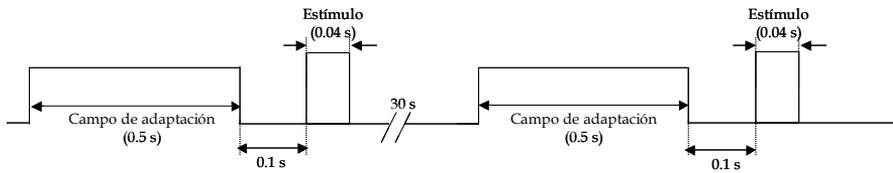


Figura 3.1. Presentación temporal del estímulo y campo de adaptación.

Se realizaron unas pruebas preliminares a los observadores para determinar el rango de luminancias donde se encontraba el valor umbral aproximado. Estas pruebas sirvieron de aprendizaje con el fin de establecer un criterio adecuado en la percepción del estímulo. Para cada sujeto y para cada método psicofísico se realizaron 240 medidas programadas, 12 valores de luminancias presentados un total de 20 veces. Los 12 valores de luminancias fueron seleccionados en base al valor de luminancia umbral tanteado previamente. La duración de cada prueba fue aproximadamente de dos horas y media, debido a lo cual se realizó en tres días diferentes. Cada día se realizó un método psicofísico distinto.

Para medir el umbral con el método de límites descendentes, se presentó el test de detección desde los valores de luminancias más altos a los más bajos, hasta que el sujeto no detectaba el estímulo. La luminancia umbral fue, por tanto, el último valor de luminancia que fue capaz de detectar. En el

método de límites ascendentes se presentó el test de detección desde los valores de luminancias más bajos, subiendo dicha luminancia hasta que el sujeto detectara la señal. La luminancia umbral fue, por tanto, el primer valor de luminancia que fue capaz de detectar. No se intentó modificar en forma alguna el método de límites ascendentes y descendentes, manteniendo en todas las medias el mismo estímulo al comienzo de la serie. En el método de estímulos constantes se presentó el test de detección con valores de luminancia seleccionados de forma aleatoria. Con todos los métodos, se empleó la técnica de respuesta SI-NO, donde el observador sólo dice si detecta la señal o no. El experimentador es quien registra las respuestas verbales del observador.

3.1.1.3 Ajuste del modelo logístico: Función psicométrica

La variabilidad es una característica intrínseca de todo sistema biológico y aún más de los sistemas neuronales. Por este motivo las técnicas experimentales desarrolladas para medir umbrales, utilizan explícitamente modelos estadísticos donde se obtiene la probabilidad de detectar las diferentes intensidades presentadas al observador. Las probabilidades de detección de un estímulo aparecen como una función sigmoide de dichas intensidades.

En cada una de las tres situaciones, exposición aleatoria, ascendente o descendente, se ajustó un modelo logístico a la respuesta "*Proporción de Estímulos Percibidos o de Respuesta = si*" como función de los distintos valores de la luminancia L

$$P(\text{Respuesta} = \text{si} / L) = \frac{\exp(b_0 + b_1 * \log_{10} \frac{L_0}{L_u})}{1 + \exp(b_0 + b_1 * \log_{10} \frac{L_0}{L_u})} \quad (3.1)$$

Donde b_0 y b_1 son los coeficientes del modelo, L_0 es el valor de luminancia de la fuente sin filtro y L_u el valor de la luminancia umbral.

El modelo se ha utilizado para estimar el umbral de luminancia a la que se percibe el estímulo el 50% de las veces. También se ha calculado el umbral de luminancia a la que se percibe el estímulo el 25% y el 75% de las veces, como los extremos del intervalo inferior y superior respectivamente, con respecto a la probabilidad de contestar afirmativamente el 50% de las veces (Gescheider, 1997). En todos los casos se ha estimado este intervalo para representar el error de cada valor de luminancia umbral. Aunque se podría acotar el umbral con el error estimado estadísticamente, acotar con un porcentaje de la función de la respuesta es una forma que representa mejor la variabilidad de ese parámetro. El ajuste de la curva psicométrica, derivada de las medidas realizadas, al modelo utilizado viene dado por el valor denominado χ^2 . Cuando χ^2 es pequeño (p valor > 0.05) indica que hay un buen ajuste de las medidas al modelo.

3.1.2 Resultados

3.1.2.1 Comparación de métodos psicofísicos

Los resultados obtenidos se pueden observar en las figuras 3.2a y 3.2b donde se representa la proporción de aciertos en función de la luminancia umbral para el observador BM y para el observador IA respectivamente. En esta figura se ha representado el ajuste del modelo logístico explicado en el apartado anterior para los tres métodos psicofísicos y para cada observador. Para los tres métodos, el observador BM tiene mayor luminancia umbral (L_u) que el observador IA. Sin embargo, en ambos sujetos, se observa mayor luminancia umbral con el método ascendente (curva azul). La luminancia umbral para BM es de 1.1 cd/m², para el método aleatorio y descendente, y de 1.7 cd/m² para el método ascendente. La luminancia umbral para el observador IA es de 0.6 cd/m², para el método aleatorio y descendente mientras que con el método ascendente es de 0.8 cd/m². En la Tabla 3.1, se han representado los valores para cada método y para cada sujeto, así como los extremos de sus intervalos superior e inferior, y el p -valor.

Tabla 3.1 Valores de luminancia umbral para los distintos métodos psicofísicos						
	IA			BM		
	Ascend.	Descend.	Aleatorio	Ascend.	Descend.	Aleatorio
$L_u(\text{cd}/\text{m}^2)$ 50%	0.8	0.6	0.6	1.7	1.1	1.1
$L_u(\text{cd}/\text{m}^2)$ 25%	0.5	0.5	0.5	0.7	1.4	1
$L_u(\text{cd}/\text{m}^2)$ 75%	1.3	0.7	0.8	2.1	1.3	1.8
p-valor	0.0248	0.9892	0.0705	0.2417	0.998	0.0274

Estos resultados muestran, para ambos observadores, un valor de luminancia umbral obtenida por el método de los límites descendentes y aleatorio menor que la obtenida por el método de límites ascendentes. En el caso del método de límites descendentes este comportamiento ha sido referido en el texto preliminar de este apartado 3.1 como un efecto típico de subestimación del umbral descrito por la bibliografía clásica (Gescheider, 1997; Schwartz, 2004). Por otro lado, en la figura 3.2, se puede observar que la diferencia entre la luminancia umbral medida con el método descendente y ascendente para el observador BM es de $0.6 \text{ cd}/\text{m}^2$, mientras que para el observador IA es de $0.2 \text{ cd}/\text{m}^2$. La sobreestimación del umbral en el método ascendente y la subestimación en el método descendente produce la tendencia típica del método de límites, tendencia que es mayor para el observador BM que para el observador IA.

3.1.2.2 Análisis del ajuste del modelo logístico

En la figura 3.2 y en la tabla 3.1 se puede observar que alguno de los datos no se ajustan adecuadamente al modelo. Así, por ejemplo, los datos del observador BM sometido al método aleatorio proporcionan un p-valor pequeño (0.0274) que delata un ajuste inadecuado. Este mal ajuste se debe a la influencia de la elevada proporción de respuestas afirmativas con un estímulo de baja luminancia. La exclusión de estas respuestas haría que el modelo proporcionara un buen ajuste sin cambiar por ello el valor de la luminancia umbral, considerando así que la función sí presenta un ajuste adecuado. En el caso del observador IA, bajo el método ascendente, tiene un p-valor de 0.0248 y por tanto < 0.05 , mostrando un mal ajuste al modelo logístico. Esto se debe a una

proporción inusual, relativamente alta, de respuestas negativas en los valores más elevados de luminancias. Estos pequeños desajustes pueden ser debidos a factores como fatiga o distracciones del observador. Sin embargo, con el método descendente y para ambos observadores el modelo logístico ajusta extraordinariamente bien a las proporciones observadas. La exclusión de estas respuestas más extremas produce en todos los casos cambios poco perceptibles en la estimación de la luminancia umbral. En el apartado siguiente se valorará el fenómeno de la fatiga con el fin de comprobar si tiene alguna repercusión en las medidas.

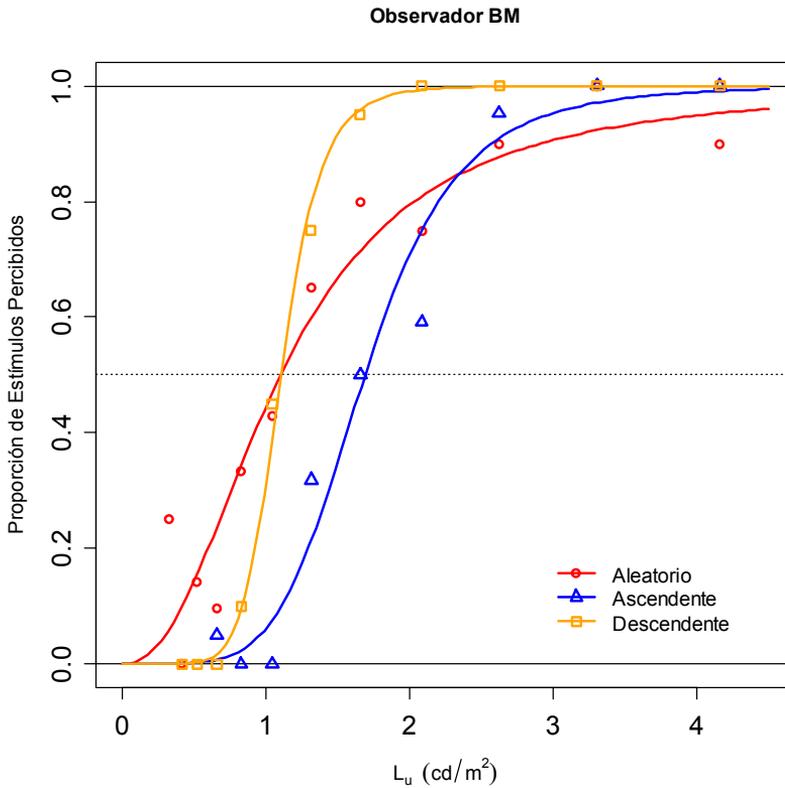


Figura 3.2a Ajuste de los datos a la función logística para los tres métodos psicofísicos para el observador BM.

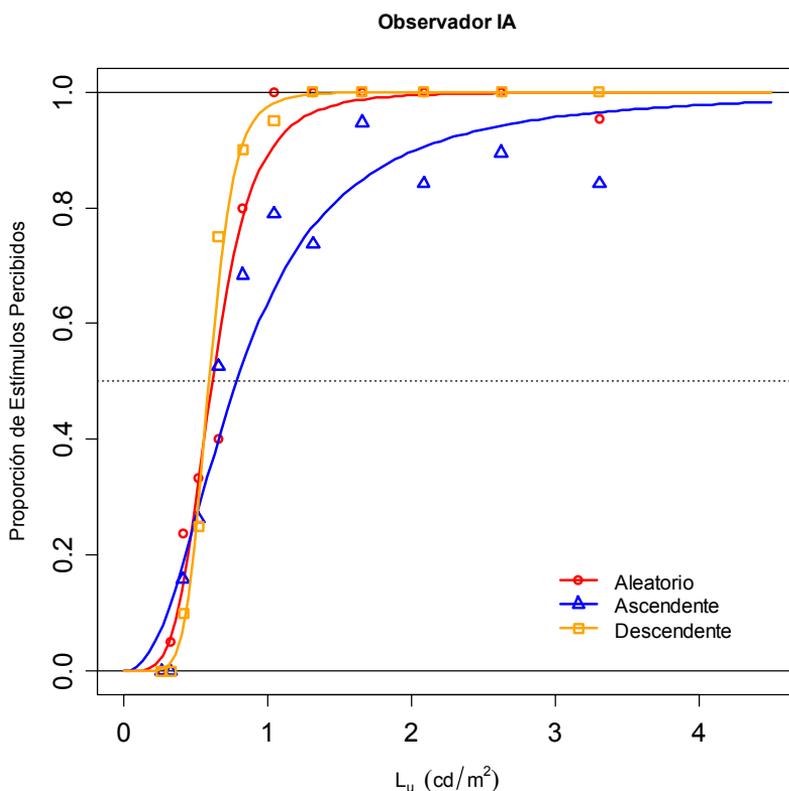


Figura 3.2b Ajuste de los datos a la función logística para los tres métodos psicofísicos para el observador IA.

3.1.2.3 Análisis del efecto de la fatiga

Para comprobar si el umbral de luminancia varía durante el período de tiempo durante el cual se realizan las medidas se ha introducido la variable ciclo dentro del modelo logístico (Expresión 3.1). Cada ciclo incluye 24 de las 240 medidas del umbral, y en cada ciclo se obtiene el valor de la luminancia umbral detectada el 50% de las veces. En la figura 3.3a, 3.3b y 3.3c se han representado, para cada observador, la proporción de respuestas afirmativas para cada valor de luminancia para cada uno de los 10 ciclos (color azul) y para la prueba completa (color rojo). El ciclo 1 corresponde a las primeras 24 medidas y el ciclo 10 corresponde a las últimas 24 medidas. En la figura 3.3a se han representado las medidas con el

método aleatorio, en la figura 3.3b con el método ascendente y en la figura 3.3c con el método descendente.

En el caso del observador BM se puede observar claramente como el valor de luminancia umbral correspondiente al 50% de la probabilidad de respuestas afirmativas para cada ciclo es muy parecido para todos los métodos psicofísicos. No se han apreciado variaciones significativas en la medida del umbral entre el ciclo 1 y el ciclo 10, en ninguno de los tres métodos. Esto indica que en su caso la fatiga o cansancio no influye significativamente en la medida del umbral. Parece, por tanto, que el observador BM tiene una alta estabilidad durante el transcurso de las pruebas para los tres métodos de medida. Sin embargo en el observador IA se puede observar cómo para el método aleatorio y descendente durante las 240 pruebas, disminuye la probabilidad de decir SI. Esto se traduce en un incremento de la luminancia umbral, desde el ciclo 1 al ciclo 10, de 0.5 cd/m^2 para el método aleatorio y de 0.3 cd/m^2 para el descendente. Esto indica que posiblemente, para este sujeto, un factor externo como la fatiga juegue un papel importante.

Para comprobar si el efecto fatiga puede reducirse disminuyendo el tiempo de duración de las medidas se ha analizado dicho valor de la luminancia umbral para un tiempo menor, aproximadamente de 1 hora y 30 minutos. Este tiempo corresponde a 6 ciclos (es decir 6 ciclos de 24 secuencias), para los que ha seguido el mismo criterio que cuando se han incluido los 10 ciclos completos. Este análisis ha sido realizado para el método aleatorio y para el observador IA. En este análisis se ha podido verificar que, si bien el efecto de la variable ciclo es del mismo orden que cuando usamos los datos completos, dicho efecto no es estadísticamente significativo ($p\text{-valor} = 0.07$). La estimación de la luminancia umbral tomada con estos datos de los 6 primeros ciclos es inferior a la que se obtiene con los ciclos completos. Este cambio en el valor de la luminancia umbral, posiblemente debido a la fatiga, no es adecuado y por tanto convendría disminuir el tiempo de duración de las medidas

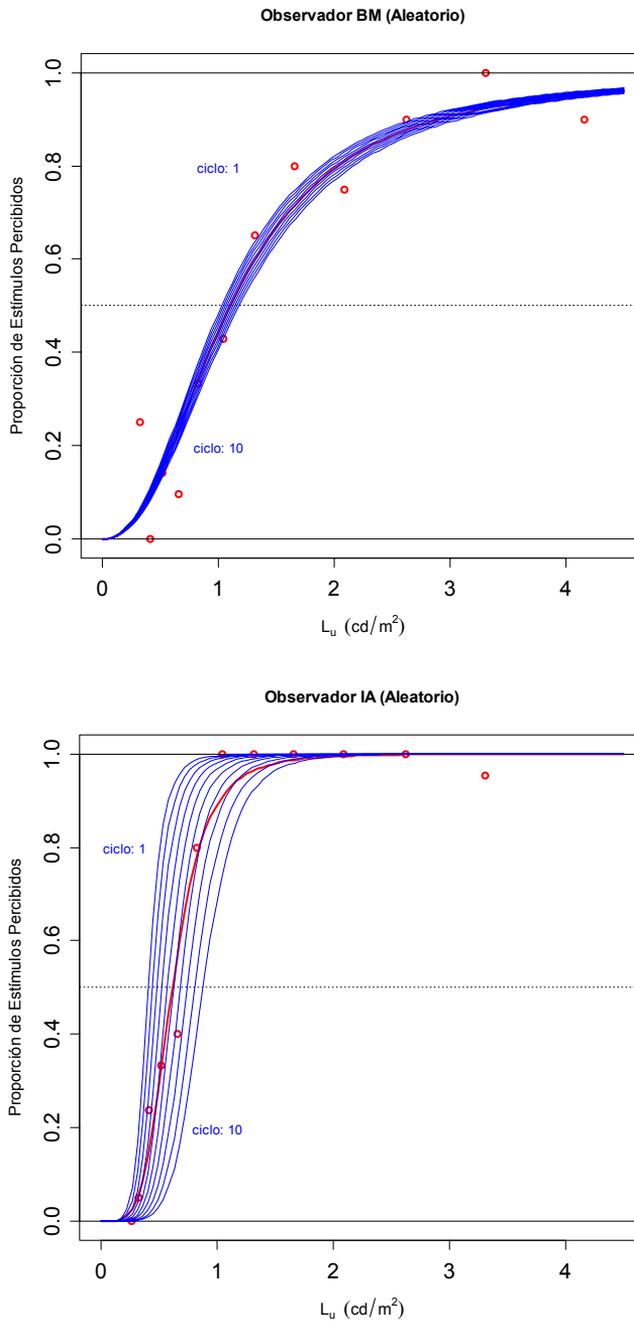


Figura 3.3a. Efecto de la fatiga en las medidas con el método aleatorio para los dos observadores BM y IA

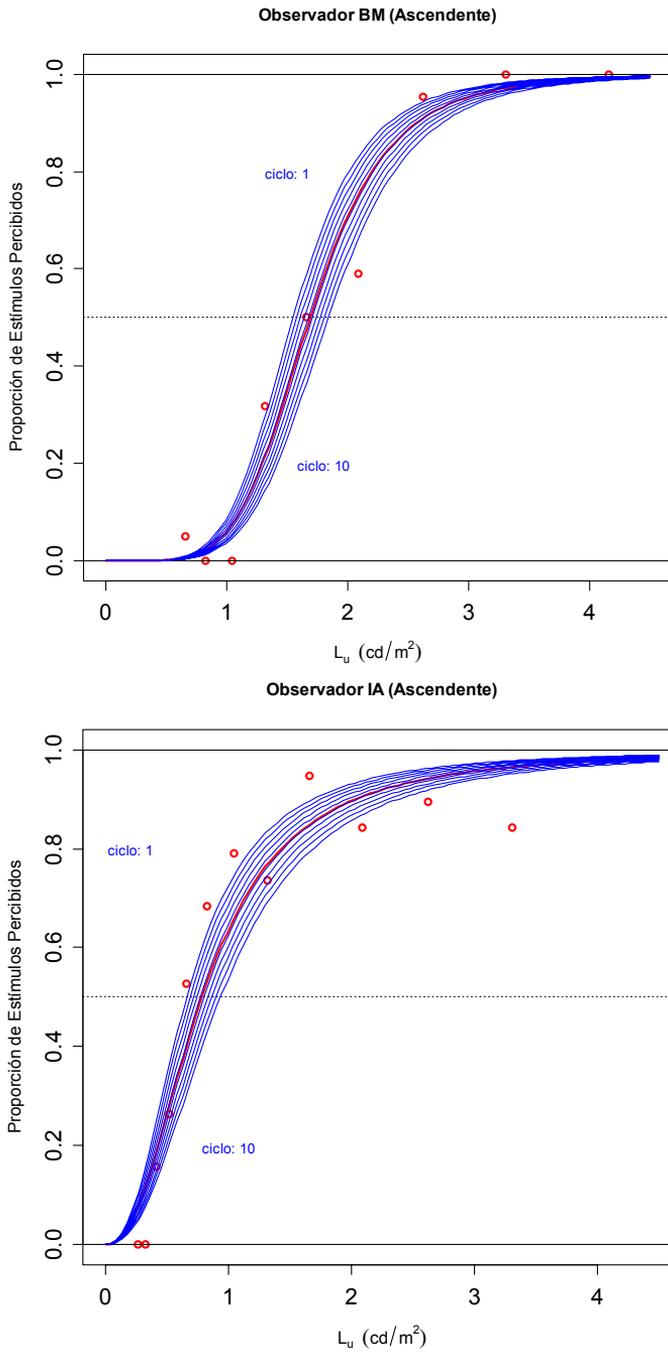


Figura 3.3b. Efecto de la fatiga en las medidas con el método ascendente para los dos observadores BM y IA

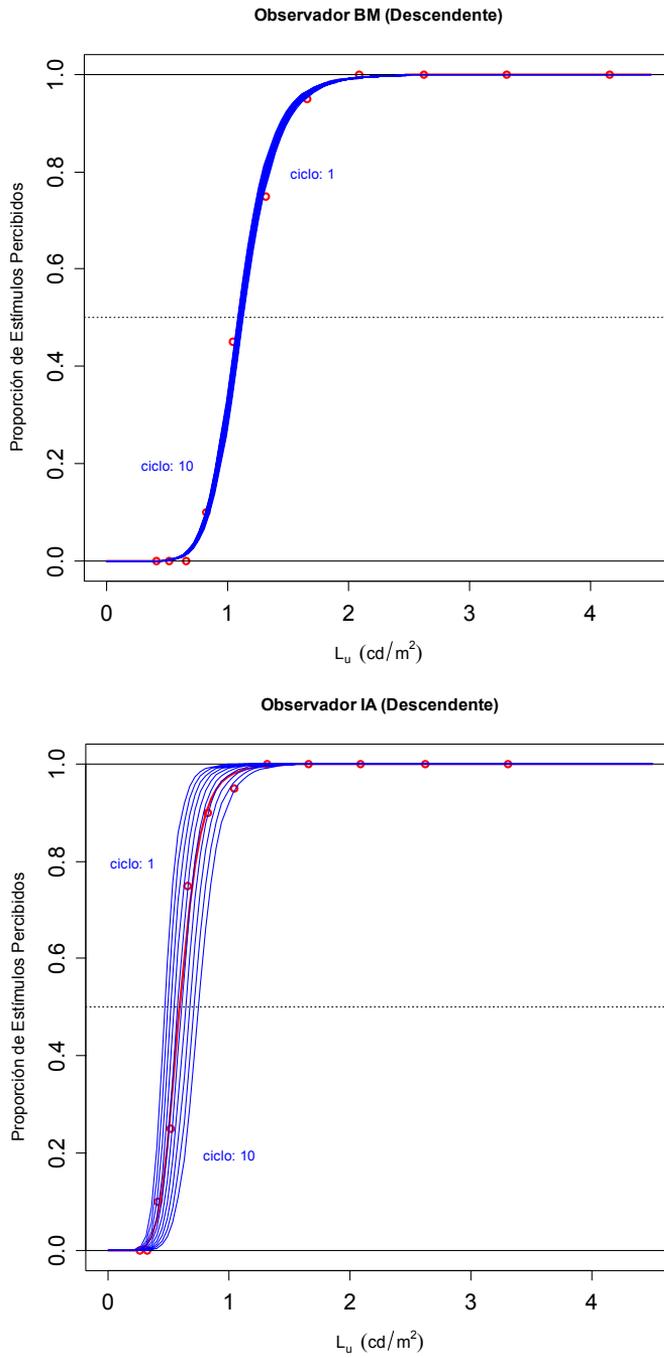


Figura 3.3c. Efecto de la fatiga en las medidas con el método descendente para los dos observadores BM y IA

3.1.3 Conclusiones

A la vista de los resultados, es evidente que existen diferencias entre los valores de luminancia umbral para distintos individuos debido a las características intrínsecas de cada observador. También se confirman las diferencias existentes entre los distintos métodos psicofísicos. Para ambos sujetos, con el método ascendente el valor de la luminancia umbral es mayor al obtenido con el método descendente confirmando la tendencia a la repetición de la respuesta en ambos observadores (Gescheider (1997). Este dispositivo experimental, por tanto, puede reproducir resultados obtenidos en la bibliografía clásica demostrando la solidez del montaje. La diferencia en el valor de luminancia umbral obtenida entre el método de límites ascendentes y el método de límites descendentes no es deseable, cuestionando por tanto la validez de este método. No obstante, los resultados indican que la estimación del umbral es muy similar con el método ascendente y con el método de estímulos constantes. El método aleatorio o de estímulos constantes evita los errores de subestimación y sobreestimación y mediante el uso de las curvas psicométricas se pueden controlar los errores inducidos por el ruido intrínseco, ya comentados anteriormente.

El estudio de la evolución temporal de los sujetos durante la realización de las medidas demuestra que, mientras que el sujeto BM no muestra influencia de la fatiga con el paso del tiempo, el sujeto IA sí la muestra. Hacer menos medidas, disminuyendo el tiempo de duración de la prueba, disminuye la influencia de la fatiga en la medida de la luminancia umbral.

En base a estos resultados se recomienda utilizar el método aleatorio en los experimentos que se van a realizar en esta memoria, limitando el tiempo de realización de la prueba a 1:30 h para disminuir el efecto de la fatiga que pueda producirse en algunos observadores. Sólo se considerarán útiles los valores de luminancia umbral obtenidos mediante aquellos datos que indiquen un buen ajuste al modelo logístico empleado. En la medida de lo posible, conviene que los observadores sean entrenados para discriminar las respuestas correctas e incorrectas y para adquirir experiencia, ya que parece que esto optimiza la fiabilidad y la validez de la medida (Blackwell, 1952).

El uso del método de los límites, modificando el estímulo por el cual se comienza, ayuda a evitar los errores de sobre estimación y subestimación del valor umbral (Schwartz, 2004). Este método sin embargo, es aconsejable para estudios de tipo clínico, ensayos pilotos o para una primera estimación del umbral.

3.2 Medidas foveales del umbral con campo de adaptación transitorio

Después de comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo experimental, mediante un estudio comparativo de distintos métodos psicofísicos, se realizó un segundo experimento. Este segundo experimento tiene como finalidad confirmar que dicho dispositivo es adecuado para realizar pruebas psicofísicas con campos de adaptación transitorios. Como ya se explicó en el capítulo 1, el estudio de la adaptación retiniana en condiciones de adaptación transitorias suscita un particular interés en los experimentos psicofísicos. Este tipo de trabajos han sido útiles para comprender los fenómenos de adaptación retiniana a nivel receptoral y postreceptoral. Sin embargo, también pueden ser adecuados por su aplicación en situaciones cotidianas, como la conducción o la clínica, con la finalidad de valorar los estados retinianos, sobre todo de sujetos con patologías incipientes.

El primer estudio sobre la adaptación transitoria realizado en esta memoria ha sido comparar los resultados de algunos de los trabajos, ya publicados, con los resultados obtenidos con el dispositivo experimental diseñado. Esta comparación se ha realizado únicamente en visión foveal con el fin de eliminar situaciones más complejas en estos primeros experimentos.

3.2.1 Reproducción de los trabajos de Boynton en 1954 y Crawford en 1947

Hay una extensa bibliografía sobre medidas del umbral de luminancia foveal ante campos transitorios (Crawford, 1947; Baker, 1949; Boynton, 1954; Finkelstein, 1981). Gran parte de estos trabajos estudian la evolución temporal de la luminancia umbral para distintos tiempos desde el inicio del estímulo con respecto al inicio

del campo de adaptación. Todos estos autores utilizaron un mecanismo similar al dispositivo experimental diseñado en esta memoria y descrito en el capítulo 2. El experimento de Crawford (1947) ha jugado un papel fundamental a lo largo de estos años y ha servido como base científica hasta los tiempos actuales. Los datos de Crawford sugirieron mecanismos neuronales que involucraban de alguna forma las medidas de luminancia umbral con el encendido y con el apagado del campo de adaptación. Estos mecanismos suscitaron un particular interés y se desarrollaron para comprobar fenómenos como la saturación de los conos o los mecanismos sustractivos y multiplicativos. Incluso más recientemente, algunos autores también han reproducido este trabajo con el fin de ahondar sobre las primeras interpretaciones realizadas por Crawford del fenómeno, ya comentado en el Capítulo 1, en cuanto al brusco aumento del umbral antes del encendido del campo de adaptación (Pokorny, 2003).

Boynton (1954) realizó un trabajo similar al de Crawford, aunque con algunas variaciones de los tamaños y tiempos de presentación del campo de adaptación y del estímulo. Además realizó las medidas, tanto para adaptación directa como indirecta. En nuestro experimento únicamente se van a realizar medidas foveales para adaptación directa, presentando tanto el estímulo como el campo de adaptación en fovea. El diseño experimental utilizado por Boynton fue muy similar al de Crawford y al dispositivo diseñado en esta memoria, utilizando iluminación maxweliana; dos haces principales, detección y flash; así como filtros y obturadores que controlan los tiempos de exposición. Las condiciones en este experimento han sido similares a las utilizadas por dichos autores con el fin de comprobar que efectivamente nuestros resultados son equiparables y coherentes tanto con los resultados de Crawford como con los de Boynton.

3.2.1.1 Método

Los observadores que participaron en este experimento fueron los mismos que participaron en el experimento anterior. Las pautas que se siguieron, en cuanto a los observadores, en el apartado 3.1.1.1 fueron las mismas para participar en ambos estudios.

Se utilizó el dispositivo experimental diseñado y descrito en el capítulo 2. Se le presentó al observador: el test de fijación para la medida foveal, el campo de adaptación y el estímulo de detección, concéntricos y fovealmente. Los campos angulares subtendidos por el estímulo de detección y campo de adaptación fueron de 0.43° y 1.05° respectivamente. El campo de adaptación de luminancia 24 cd/m^2 fue presentado durante 500 ms y el estímulo de detección fue presentado durante 40 ms. Aunque los experimentos de Crawford fueron realizados para un tiempo de exposición del estímulo de 10 ms y por tanto diferente al utilizado en nuestro experimento, ambos trabajos pueden ser comparables ya que un experimento control realizado por Finkelstein *et al* (1981) indicó que el cambio en la duración del estímulo de 10 ms a 40 ms no influía en la forma de las curvas de incremento umbral.

Primero se muestra el test de fijación para la medida foveal durante 1 segundo, y medio segundo después de cerrar el obturador de dicho test (Ob3, figura 2.1) se muestran el campo de adaptación. El tiempo que transcurre entre el inicio del campo de adaptación y el inicio del estímulo Δt , puede ser positivo, negativo o cero en el caso de que el obturador del haz del campo de adaptación (Ob1, figura 2.1) y el obturador del haz de detección (Ob2, figura 2.1) se abran simultáneamente.

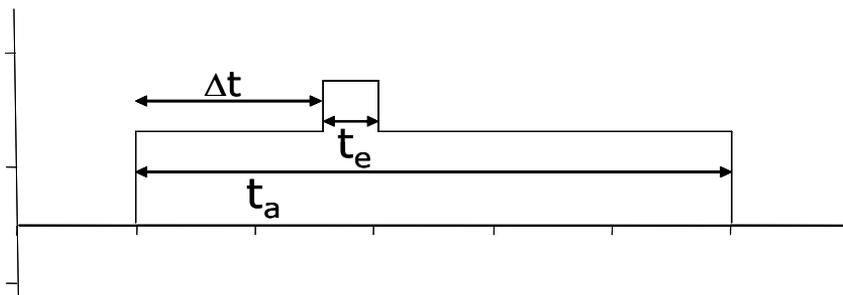


Figura 3.4 Representación temporal de los pulsos luminosos enviados al ojo (t_a) representa la duración del pulso de adaptación y t_e la del haz de detección).

Si con las condiciones elegidas del haz de adaptación, el estímulo no es percibido por el observador, se reduce la densidad de los filtros, en pasos de 0.1 unidades logarítmicas, del haz de detección hasta llegar al valor umbral. Una vez estimado un valor umbral, se utilizó la combinación de límites ascendentes y

descendientes para calcular, mediante un promedio, el valor de la luminancia umbral (L_u) del haz de detección así como la estimación del error mediante la desviación estándar. En este experimento se utilizó el método de los límites ya que sólo se pretendía estimar las medidas con el fin de comprobar que estos resultados reproducen los resultados de los trabajos clásicos. Este valor de luminancia umbral fue determinado para distintos valores de Δt . Al igual que Boynton, que utilizó un nivel de luminancia del campo de adaptación superior al utilizado en nuestro experimento, se esperó un tiempo entre secuencias de 30 s para que la retina recupere su estado inicial.

3.2.1.2 Resultados

Los resultados de la luminancia umbral foveal en función del tiempo para los dos observadores, IA (triángulos) y BM (cuadrados), se muestran en la figura 3.5. En la figura 3.5 también se ha representado la evolución temporal obtenida en el experimento de Crawford para tiempos similares a los utilizados en nuestro experimento (círculos). Dicha evolución se representa en términos de la variación del logaritmo de la luminancia umbral detectable (L_u) en función del intervalo Δt transcurrido entre el inicio del campo de adaptación y el inicio del haz de detección. De forma general se puede observar como el sujeto BM tiene un valor de luminancia umbral ligeramente superior al del observador IA, como ya se pudo comprobar en el experimento anterior y que se reafirma en estas pruebas. Sin embargo, el comportamiento para ambos observadores es muy similar. Dicho comportamiento es también similar al obtenido en el experimento de Crawford, donde todos los valores umbrales son, al menos, 1 unidad logarítmica mayores, posiblemente porque Crawford utilizó un campo de adaptación de 100 cd/m^2 y en nuestro experimento se han utilizado 24 cd/m^2 . En la figura 1.8 del apartado 1.2.4.4 del capítulo 1, se puede observar la evolución temporal, según Crawford, para más tiempos y para distintas luminancias del campo de adaptación, mostrando claramente como disminuye el valor de la luminancia umbral para campos de adaptación con menor luminancia.

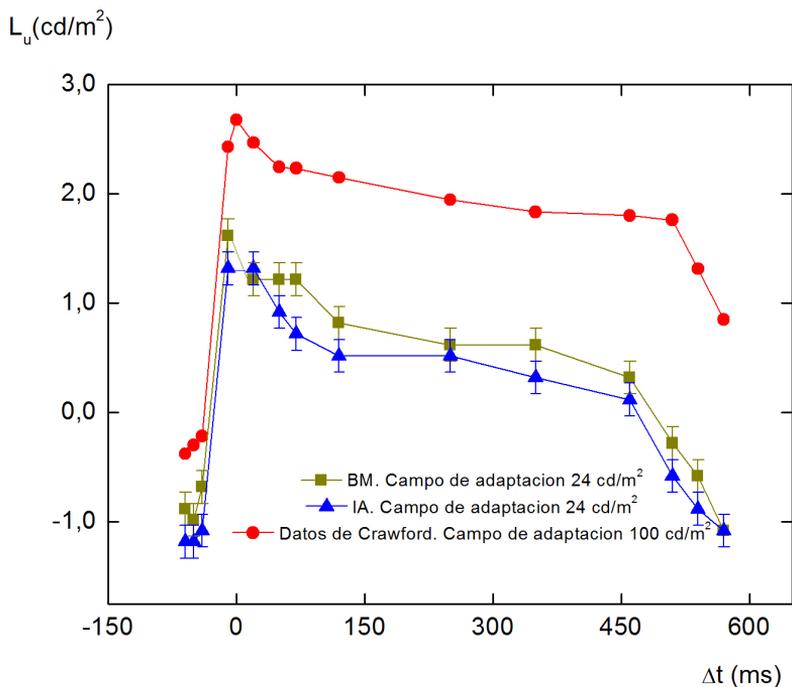


Figura 3.5. Evolución temporal de la luminancia umbral (L_u) para dos observadores (IA y BM) y para los datos obtenidos por Crawford en 1947. La evolución temporal realizada en el experimento de Crawford fue para un test de detección de 10 ms y $0,5^\circ$ y para un campo de adaptación de 524 ms y 12°

Ambos observadores muestran un ligero aumento del umbral en los 40 ms antes de la presentación del campo de adaptación, como también se observa en los datos de Crawford representados en la figura 3.5. También se produce un brusco incremento del umbral, para ambos observadores, 10 ms antes del inicio del haz de adaptación ($\Delta t = -10$), semejante al resultado del experimento de Crawford. Sin embargo, en la figura 1.8 del apartado 1.2.4.4, donde se representan de forma completa los resultados ofrecidos por Crawford se puede observar un pico brusco en la luminancia umbral incluso en 20 ms antes de la presentación del campo de adaptación.

Por otro lado, también se observa una disminución progresiva del umbral de detección durante la evolución temporal, tanto en los dos observadores como en los datos de Crawford. Los valores de la luminancia umbral disminuyen progresivamente

desde $\Delta t = 0$ ms hasta $\Delta t = 460$ ms, en todos los casos, apuntando a un proceso de adaptación a la luminancia de dicho campo de adaptación que parece estabilizarse hacia un $\Delta t = 200$ ms. Este resultado fue similar en el experimento de Boynton. A partir del apagado del campo de adaptación hay, en todos los casos, una clara disminución de la luminancia umbral, que parece exponencial, al menos durante los primeros 70 ms representados en la figura 3.5.

Como se ha podido observar la tendencia observada en los resultados obtenidos en el experimento realizado en esta memoria es similar a los resultados ya obtenidos por Crawford y Boynton. De hecho, es particularmente reseñable que en nuestros resultados la relación entre la luminancia del haz de adaptación y el pico de luminancia umbral es prácticamente la unidad, tal y como se observa en el trabajo de Boynton. Esta equivalencia de nuestros resultados con los de Boynton ofrece, de nuevo, una idea de la gran fiabilidad de los resultados de este trabajo y, por tanto, del dispositivo experimental desarrollado.

3.2.2 Conclusiones. Validación del sistema de medida

Se ha puesto a punto un dispositivo experimental orientado hacia la medida de la evolución temporal de la sensibilidad retiniana foveal, capaz de apreciar las variaciones que sufre la luminancia umbral detectable en los primeros momentos de la adaptación retiniana a un cambio de iluminación. Este dispositivo, complejo en su concepción, será capaz de analizar dichas variaciones con resolución retiniana de medio grado y con resolución temporal del orden del milisegundo. Este dispositivo ha permitido obtener, como aquí se ha descrito, primeros resultados completamente de acuerdo con lo descrito en la bibliografía clásica, pero también en la más actual y representará, a nuestro juicio, no sólo una herramienta muy útil para entender los mecanismos básicos de adaptación neuronal, sino también un potencial instrumento clínico en la detección precoz de patologías retinianas de polo posterior y en su evaluación en función del tiempo.

CAPITULO 4

Adaptación retiniana ante luminancia mesópica

Este último capítulo de la memoria representa la parte central de la misma, teniendo como objetivo evaluar el comportamiento espacio temporal de la retina ante campos de adaptación de luminancia mesópica. Este rango de luminancia es muy habitual en las tareas cotidianas, realizadas en horarios nocturnos, de forma que la respuesta espaciotemporal, en este rango de luminancia, requiere un estudio más detallado. En este capítulo se expondrá la situación actual así como los motivos que han llevado a efectuar este trabajo y se describirán los experimentos realizados así como un análisis exhaustivo de los resultados. También se incluyen los estudios llevados a cabo con un paciente con retinosis pigmentaria, ya que aporta, no sólo conclusiones a nivel de interés clínico, sino también de interés fundamental para una mejor comprensión del comportamiento retiniano en sujetos normales. Este capítulo 4 fue parcialmente presentado en el European Conference on Visual Perception (Germany 2009), en la 9ª Reunión Nacional de Óptica (Orense 2009) y en ARVO 2010, Fort Lauderdale, Florida. Además de ser parcialmente publicado en Perception 2009, Volumen 38, supplement, pages 131-132. La contribución de la doctoranda fue, junto con los demás autores de estos trabajos, la búsqueda bibliográfica, el diseño y montaje del dispositivo y del experimento, y la realización de las medidas e interpretación de los resultados

4.1 Adaptación retiniana. Estado del arte

Los estudios de la adaptación retiniana ante campos de adaptación estables o transitorios, tuvieron su origen con el fin de evaluar la dinámica de adaptación del sistema visual humano. Durante muchos años se ha evaluado este fenómeno para comprender mejor los mecanismos de adaptación tanto en los fotorreceptores como en los procesos postreceptores. Muchos han sido los autores que han trabajado en esta línea, ofreciendo resultados del mecanismo de adaptación, tanto para situaciones de adaptación directa (Crawford, 1947; Adelson, 1982) como indirecta (Boynton, 1954). Por su parte, Boynton (1954) demostró que ambos tipos de adaptación pueden equipararse produciendo una misma respuesta temporal.

Los umbrales de luminancia obtenidos en condiciones de adaptación transitoria han sido comparados con aquellos obtenidos con campos estables. Con estos estudios se ha observado que un campo transitorio o breve produce una mayor pérdida de sensibilidad retiniana que un campo estable o prolongado en el tiempo, tanto para visión extrafoveal (Adelson, 1982; Geisler, 1979b) como para visión foveal (Finkelstein, 1981; Hayhoe, 1987). Estos estudios han sido llevados a cabo para un amplio rango de luminancias. Además, aquellos estudios en retina periférica se han realizado aislando los fotorreceptores con el fin de comprobar el comportamiento únicamente de bastones. De esta forma sólo se han podido evaluar estos comportamientos para determinadas localizaciones periféricas y para un único tipo de fotorreceptor. El trabajo de Geisler (1979b) analizó las medidas a 6°, mientras que Adelson (1982) lo hizo a 12°. En el estudio de Geisler (1979b) se encontró que a una excentricidad de 6° la pérdida producida por un campo transitorio es semejante a la producida por uno estable siempre dentro del rango mesópico. Adelson (1982) en cambio, a 12° de excentricidad, encontró siempre mayor valor de luminancia umbral con un campo transitorio que con un campo estable dentro del rango mesópico. El trabajo realizado en esta memoria pretende aportar información nueva y complementaria a dichos trabajos clásicos, evaluando el comportamiento retiniano en otras zonas de la retina periférica, ante campos con luminancia mesópica y sin aislar ninguno de los dos fotorreceptores. Al no separarse los fotorreceptores se puede medir la respuesta integrada de ambos

sistemas y así conocer el comportamiento del sistema visual humano en condiciones normales y no de laboratorio. De esta forma se puede asociar la respuesta obtenida con tareas de la vida cotidiana.

En esta línea muchos trabajos han calculado la pérdida de sensibilidad mediante el cociente entre el umbral obtenido ante una condición transitoria y el umbral obtenido ante una condición estable. Bodmann (1991) evaluó los procesos rápidos de adaptación para varias zonas de la retina periférica, cuando se producía un cambio brusco de luminancia de 2000 cd/m² a 8 cd/m², midiendo la pérdida de sensibilidad en diferentes condiciones espaciales y temporales. Los resultados mostraron un comportamiento diferente según la zona de la retina estudiada, encontrando que hay una pérdida de sensibilidad alta en la fovea, que se reduce hacia los 5° y que aumenta para excentricidades mayores. Según esto, Bodmann concluyó que el proceso de adaptación retiniana era más rápido en la periferia que en la fovea. Siguiendo en esta línea, Bichao *et al* (1995) estudiaron el efecto de un deslumbramiento indirecto transitorio en el rango fotópico (140 cd/m²) sobre un estímulo foveal y para una excentricidad de 2.8°, concluyendo que los efectos del deslumbramiento transitorio son mayores en la periferia que en la fovea. Bichao *et al* mostraron una mayor pérdida de sensibilidad en periferia que en fovea. Aunque estos resultados parecen contradictorios con los de Bodmann, es importante resaltar no sólo que estos dos últimos trabajos utilizan diferentes condiciones experimentales y paradigmas de medición, sino que en el propio trabajo de Bichao la duración del estímulo fue diferente para la medida foveal que para la periférica. Ante esta situación, la comparación entre ambos estudios se hace muy difícil, siendo imposible predecir el comportamiento de la periferia en una condición de adaptación transitoria. El trabajo realizado en este capítulo intenta aclarar, entre otras cosas, estas contradicciones. Para ello evalúa el comportamiento en retina foveal y periférica exactamente en las mismas condiciones y para un amplio rango de excentricidades aportando información nueva y relevante en cuanto a la velocidad de adaptación en distintas zonas de la retina.

Este estudio de Bichao *et al* (1995) se ha centrado en valorar el comportamiento retiniano con luminancias dentro del rango del fotópico. Por otro lado, los trabajos que estudian los

comportamientos dentro del rango mesópico se limitan a estudiar la recuperación retiniana después de la presentación de fuentes de luz fuertemente deslumbrantes y procesos de adaptación lentos. Los procesos de adaptación lentos son aquellos procesos fotoquímicos generados dentro del propio fotorreceptor. Sin embargo, los procesos de adaptación rápidos son referidos como aquellos que se producen inmediatamente después de la presentación de un campo de adaptación y están más relacionados con los procesos neuronales que se desencadenan en el fotorreceptor y llegan al cerebro. En este sentido no se ha encontrado ningún trabajo que evalúe, en este rango de luminancia mesópica, los procesos rápidos de adaptación. Los experimentos desarrollados en esta memoria aportarán información nueva relevante a este respecto evaluando dichos procesos rápidos de adaptación.

Sin embargo hay un gran número de trabajos dirigidos a estudiar los aspectos visuales implicados en la tarea de la conducción y que valoran la adaptación retiniana dentro del rango de luminancia mesópica. Entre los estudios que valoran la adaptación visual dentro del rango mesópico destaca el trabajo de Plainis y Murray (2005). Estos autores, considerando distintas excentricidades, midieron los umbrales durante el proceso de recuperación retiniana en diferentes niveles de luminancia dentro del rango mesópico, después de una exposición de un minuto a un nivel muy alto de luminancia (3200 cd/m^2). Estos autores consideran varios niveles de luminancia dentro del mesópico distinguiendo una iluminación mesópica de 5 lux, con una dominancia importante de los conos, y una iluminación mesópica de 0.1 lux, donde los bastones juegan un papel predominante, aunque sin cambios sustanciales en la sensibilidad. Dado que midieron la velocidad de regeneración de los fotorpigmentos tras el blanqueo de los mismos, los resultados de su trabajo se orientan a explicar los procesos de adaptación lentos. Entre los aspectos más relevantes concluyeron que el tiempo de recuperación de los fotorpigmentos es mayor a niveles mesópicos más altos que a niveles mesópicos más bajos y que dicha velocidad de recuperación es menor a medida que aumenta la excentricidad. Estos hallazgos han sido justificados sobre la base de la mayor velocidad de recuperación de los conos en comparación con los bastones (Tachibanaki, 2007).

Desde el punto de vista fisiológico es conocido y está bien documentado que los conos tienen una sensibilidad a la luz distinta que la de los bastones y que ambos fotorreceptores se adaptan a la luz ambiental de manera dinámica, aunque diferente, en el tiempo (Kawamura, 2008). Algunos autores han estudiado la evolución temporal de los fotorreceptores, bien de conos o bien de bastones, desde la psicofísica (Adelson, 1982; Geisler, 1979b; Haygoe, 1987) y otros han realizado estudios de la fotoquímica de los fotorreceptores de animales observando, en todos los casos, como conos y bastones responden a la luz de manera diferente (Tachibanaki, 2007).

Sin embargo cuando se trabaja en condiciones mesópicas, los distintos niveles de saturación, las diferentes distribuciones espaciales, y las diferentes velocidades de adaptación de conos y bastones generan una interacción entre ambos sistemas que varía en todo el rango mesópico (Stockman, 2006). El sistema de fotorreceptores que predomina dependerá de la composición espectral del test y del campo de adaptación así como de la localización retiniana del estímulo. Además la variación de la densidad de fotorreceptores en diferentes zonas de la retina aporta aún más complejidad al proceso de adaptación en este rango mesópico. Frunke ya demostró en 1973 que las señales de los bastones interferían en la señal de los conos, indicando un fenómeno de interacción entre ambos fotorreceptores. Así los bastones no actúan en vías independientes sino que todas sus señales parecen converger en la ruta neuronal cuya transmisión ha sido iniciada por las señales de los conos (Buck, 2004). Parece que si bien la conexión fotorreceptor-bipolar es independiente, ninguna ganglionar lleva señales sólo de los bastones, y por tanto conos y bastones comparten estas vías, produciéndose así la interacción. Aunque se han descrito muchos mecanismos de interacción (Buck, 2004) algunos estudios actuales se han centrado en la interacción producida en las respuestas mediadas por los conos a altas frecuencias. En la adaptación a la oscuridad parece que los bastones circundantes inhiben la alta resolución temporal de los conos produciendo así una interacción entre ambos fotorreceptores. Estos estudios demuestran que las interacciones cono-bastón son fundamentales en el proceso temporal bajo condiciones de luminancia mesópica (Zele, 2008).

En base a lo aquí expuesto, surge la necesidad de estudiar la capacidad y velocidad de adaptación de la retina foveal y periférica cuando se tiene que detectar un estímulo ante un campo de adaptación de luminancia mesópica estable y transitorio. Esto sería con el fin de tener un conocimiento más completo de la adaptación en un rango de luminancia utilizado en la vida cotidiana. Los resultados obtenidos en esta memoria aportarán nuevos datos valorando, en este rango mesópico, la funcionalidad de conos y bastones en un mismo experimento.

Conviene recordar que estos estudios, realizados en sujetos normales, son relevantes para entender los procesos de adaptación del sistema visual en pacientes con degeneración de la retina. Comparando las medidas obtenidas para los sistemas normales con aquellas obtenidas para los sistemas patológicos se pueden establecer patrones de comportamiento que ayuden a comprender mejor los procesos de adaptación de ambos. Entre las patologías oculares para las cuales es más relevante el estudio de la adaptación visual a los cambios bruscos de iluminación se encuentran la retinosis pigmentaria. Evaluar el comportamiento con un sistema suficientemente sensible puede ser de gran utilidad para percibir cambios en los primeros estados de la patología, incluso antes de observarse cambios fundoscópicos o electroretinogramas anómalos. Este análisis sería muy relevante para su aplicación clínica. Por ejemplo, un paciente con retinosis pigmentaria que tiene una función de conos normal y una muerte funcional de bastones puede disfrutar de una agudeza visual normal e incluso un adecuado campo visual (Albert & Jakobiec's, 2008). Que un paciente con retinosis pigmentaria pueda presentar estas características se debe a que, aunque la densidad de conos en la fovea es mucho más alta, el 90% de los conos retinianos están entre la fovea y los 10° de excentricidad. En este caso si los conos no están afectados, es fácil que una retinosis pigmentaria pueda pasar desapercibida en sus primeros estados de la patología. Estos cambios retinianos de la patología, que afectan a los fotorreceptores, hacen necesario un estudio funcional de los mismos. Además, la mayoría de los síntomas que tiene un paciente con retinosis pigmentaria como la adaptación anormal a cambios de luz, ceguera nocturna o pérdida de campo están relacionados con la pérdida funcional de fotorreceptores. En esta memoria se realizarán experimentos psicofísicos que ayudarán a analizar el

comportamiento retiniano de un observador con retinosis pigmentaria ante diferentes condiciones de iluminación, y que pueden ser comparados con los de los sujetos ocularmente sanos. Los estudios a nivel histopatológico de la retina en pacientes con retinosis pigmentaria pueden ser complementarios para comprender los procesos de adaptación retiniana y reforzar de alguna forma los trabajos psicofísicos realizados (Bunt-Milam, 1983).

Los resultados de este trabajo pueden ser directamente aplicables a la tarea de la conducción. La utilización de los resultados obtenidos en esta memoria para valorar los problemas durante la conducción nocturna es de gran relevancia si se tiene cuenta que esta tarea es una de las actividades diarias más comunes en la vida moderna y contribuye al bienestar y a la independencia de las personas. Sin embargo, la conducción de vehículos supone una serie de tareas visuales diferentes y el sistema visual humano debe poder realizarlas eficientemente. Mientras que en condiciones fotópicas, tales como la luz del día, la iluminación es óptima para todas las localizaciones retinianas, hay condiciones donde la iluminación varía desde condiciones mesópicas a escotópicas, y dependiendo del área de la retina que esté implicada, del día y del tipo de carretera las condiciones pueden ser menos ventajosas (Mayeur, 2008). Por otro lado, las luces que viene de los vehículos de frente producen una luminancia de velo que reduce la visibilidad, afectando sobre todo a los objetos con bajo contraste, y reduciendo así la eficiencia del sistema visual humano. En la literatura los efectos de una fuente deslumbrante o deslumbramiento indirecto han sido ampliamente estudiados (Aslam, 2007) así como el deslumbramiento directo (Crawford, 1947). Esto cobra importancia ya que los efectos del deslumbramiento transitorio pueden ser aún más perjudiciales en sujetos de edad avanzada (Higgins, 2005; Abdel-Aty, 2000) o con patologías oculares (Owsley, 1999).

En base a esta situación actual se plantea, por tanto, aportar datos nuevos del comportamiento retiniano en niveles de luminancia mesópica alta, tanto foveal como extrafoveal. Para ello se expondrán los experimentos realizados con tres observadores ocularmente sanos y con un paciente con retinosis pigmentaria. En estos experimentos se ha medido la luminancia umbral ante distintas condiciones espaciales y temporales con un campo de luminancia mesópica de 5 cd/m². Con esto se pretende evaluar tanto la sensibilidad retiniana como la velocidad de adaptación ante dicha luminancia. A su vez se podrá comprobar que el dispositivo es útil para valorar la función visual de un paciente con retinosis pigmentaria. Los resultados obtenidos pueden proporcionar información sobre la funcionalidad de conos y bastones tanto en un sujeto normal como en un sujeto con retinosis pigmentaria. En base a esto se podrán perfilar patrones de comportamiento para estos pacientes así como diseñar pruebas capaces de detectar dicha patología en su primer estadio degenerativo, incluso antes de que aparezcan signos fundoscópicos.

En los siguientes apartados se describirá el método empleado, detallando los aspectos más relevantes de los sujetos que han participado, el procedimiento y los experimentos realizados. Se describirá un primer experimento encaminado a la determinación del umbral absoluto con el fin de obtener un valor de referencia, un experimento central realizado con luminancia mesópica alta y por último otros experimentos complementarios necesarios para explicar los resultados obtenidos y afianzar las conclusiones finales del trabajo.

4. 2 Método

4.2.1 Observadores

4.2.1.1 Observadores normales

En el experimento han participado tres sujetos, el autor de esta memoria (BM) y otros dos colaboradores (IA Y CR), de edades de 39, 36 y 24 años, en el momento del experimento. Las pautas

seguidas en los experimentos anteriores, descritas en el apartado 3.1.1.1, han sido las mismas que las que se han seguido en este experimento para los tres sujetos normales. Debido a que desde las primeras pruebas había transcurrido un año, a estos sujetos se les repitió el examen visual con el fin de comprobar que no había cambios significativos en su salud ocular, ni cambios en la refracción con la que consiguieron su mejor agudeza visual.

4.2.1.2 Observador con retinosis pigmentaria

En estos experimentos participó un paciente con retinosis pigmentaria. Por este motivo es adecuado recordar como es el proceso degenerativo que sufren estos pacientes, ya que puede ser importante para comprender los resultados obtenidos. Posteriormente se detallarán aquellos datos relevantes de este observador para la realización del experimento.

Afectación retiniana en pacientes con retinosis pigmentaria: En principio, un mal funcionamiento del epitelio pigmentario produce una degeneración y posterior desaparición de los fotorreceptores. Algunos estudios histopatológicos han encontrado, en retinosis pigmentarias avanzadas, una pérdida completa de bastones así como una reducción del número de conos (Szamier and Berson, 1977; Bunt-Milam, 1983). Estos conos muestran un segmento interno más corto y ancho y un segmento externo más corto y con los discos membranosos desorientados, e incluso en algunos casos existe la desaparición completa de dicho segmento externo. Este proceso sigue un orden de degeneración desde la perifovea, donde está siempre más avanzada, hacia la fovea. De esta forma se origina una pérdida progresiva de bastones y conos que empieza periféricamente y que progresa hacia la retina central.

Características del observador con retinosis pigmentaria que ha participado en el estudio: Un único observador de 39 años participó en el estudio. En todo momento se han seguido los principios de la declaración de Helsinki. Según los informes oftalmológicos dicho paciente presenta antecedentes personales y familiares. Además parecen existir sospechas, tras la evaluación de varios miembros de su familia, de que pudiera presentar síndrome de Wagner. El síndrome de Wagner es una degeneración

hereditaria caracterizada por cambios en el fondo periférico con vasos retinales estrechos y sin recubrimiento, pigmentación de la retina, membranas circulares en el humor vítreo unidas al ecuador retiniano y atrofia de la coroides. Es un desorden de carácter autosómico dominante.

Según el informe oftalmológico previo la agudeza visual decimal, en ambos ojos, fue de 0.8 y la presión intraocular fue de 21 mm Hg en el ojo derecho y 19 mm Hg en el ojo izquierdo. Mostraba cataratas incipientes y el fondo de ojo mostraba espículas pigmentarias en los 360°, con vasos muy finos y vítreo muy alterado. Sin embargo la mácula, en ambos ojos, presentaba buen aspecto. El campo visual, realizado mediante un campímetro Humphrey, presentaba un defecto absoluto a partir de los 12° centrales y defectos relativos dentro de los mismos. Dentro de estos 12° centrales se puede observar una disminución importante de la sensibilidad en todos los puntos de esta zona aún funcionalmente activa. A este paciente se le realizaron pruebas con el electroretinograma en condición escotópica y fotópica, mostrando una alteración clara en los bastones que producía una nictalopía de la cual se quejaba el paciente.

Antes de empezar con los experimentos se le realizó un examen optométrico al observador con retinosis pigmentaria. En dicho examen se examinó el fondo de ojo, se comprobó el campo visual con una pantalla tangente y se revisaron los medios oculares mediante una lámpara de hendidura. En este examen se comprobó que la refracción del sujeto fuera aquella con la que se consiguiera la mejor agudeza visual, que en este caso, fue en ambos ojos de 0.7, ligeramente menor a la presentada en el informe oftalmológico. Para realizar la refracción, como siempre, se utilizó una habitación adecuadamente iluminada y un test de agudeza visual diseñado por nuestro grupo de trabajo.

4.2.2 Procedimiento general

4.2.2.1 Preparación previa

Para la medida de la luminancia umbral se ha utilizado el dispositivo diseñado y explicado en el capítulo 2. En cualquier caso

el observador tuvo un período de adaptación a la oscuridad de 30 minutos antes de realizar la prueba. Antes de comenzar cada experimento se centró adecuadamente al sujeto, que estaba anclado en su propia impresión dental. Todos los experimentos fueron siempre monoculares, realizados en el ojo derecho, con su mejor compensación óptica y con el ojo izquierdo ocluido. Siempre se utilizó pupila natural. Para un correcto centrado se comprobaba que los filamentos de las lámparas estuvieran completamente solapados sobre el centro pupilar, tanto en la posición foveal como en la posición periférica, después de su correspondiente desplazamiento. También se comprobó la visión concéntrica del test de fijación foveal, del estímulo y del campo de adaptación por parte del observador. Las medidas se realizaron tanto en visión foveal como en distintas excentricidades de la retina temporal (3°, 6°, 9°, 12° y 15°).

En todos los casos el tamaño angular del estímulo subtendido desde el observador fue de 0.43°, evitando cualquier tipo de intrusión de los bastones cuando la medida era foveal (Curcio, 1990). En todos los casos el tamaño angular del campo de adaptación subtendido desde el observador fue de 1.05°. La duración del estímulo fue siempre de 40 ms. Los experimentos se realizaron con una luminancia del campo de adaptación de 5 cd/m². Según las medidas del tamaño pupilar para este campo de adaptación el usuario no requería de dilatación pupilar, ya que en ningún momento el tamaño de la pupila fue más pequeño que el tamaño del filamento, como se describió en el apartado 2.3.4 del capítulo 2.

4.2.2.2 Detección de umbrales

Si con las condiciones del haz de adaptación elegidas, el estímulo no era percibido por el observador, se incrementaba la luminancia del estímulo en pasos de 0.1 unidades logarítmicas, hasta llegar al valor umbral percibido. Una vez obtenida una primera aproximación de la luminancia umbral se utilizó el método de los límites, combinando límites ascendentes y descendentes y utilizando distintos estímulos para el comienzo de cada una de las medidas. La luminancia umbral se calculó mediante el promedio. Este valor estimado del umbral fue utilizado como punto de partida para calcular la luminancia umbral mediante el método de

los estímulos constantes. Para cada condición experimental, se escogieron dos valores por encima y dos valores por debajo del umbral estimado. Estos valores de luminancia se presentaron en pasos de 0.1 unidades logarítmicas para las medidas realizadas en fóvea y hasta 6° de excentricidad y de 0.2 unidades logarítmicas para las medidas a partir de 9° de excentricidad. Este procedimiento fue establecido así por la dificultad que suponía para el observador la detección del estímulo en la retina más periférica. De esta forma, un total de 5 luminancias fueron presentadas, 20 veces cada una, de forma aleatoria, mostrando así un total de 100 estímulos. El observador sólo debía responder SI percibía ó NO percibía el estímulo presentado. Se ajustaron las medidas al modelo logístico, explicado en el capítulo 3, mostrando una curva de tipo sigmoide. Siempre se tomó como valor de luminancia umbral el valor de luminancia percibido el 50% de las veces, y se acotó el umbral con los valores correspondientes a los valores de la luminancia percibida el 25% y el 75% de las veces. Los ajustes cuyo valor de χ^2 era significativamente alto (p -valor < 0.05) fueron desestimadas. En estos experimentos se ha podido comprobar que la diferencia entre el método de los límites y el método de estímulos constantes nunca era mayor de 0.15 unidades logarítmicas.

En el caso del sujeto con retinosis pigmentaria se realizó únicamente el método de los límites, calculando el valor de luminancia umbral mediante un promedio y su error mediante la desviación estándar. Es habitual usar el método de los límites en los estudios realizados con pacientes con retinosis pigmentaria (Greenstein, 1987). Dicho método siempre es aconsejable para observadores que participan en este tipo de pruebas y que son ajenos al proceso experimental, no sólo por la mayor rapidez de la medida sino por resultar más sencillo y más cercano a las experiencias de tipo clínico a las que están acostumbrados. Además, como la diferencia entre este método y el método de estímulos constantes no supone una diferencia mayor de 0.15 unidades logarítmicas, siempre dentro de los valores del error, se consideró este método suficiente para la estimación de las medidas. Las medidas realizadas con el sujeto con retinosis pigmentaria no superaron nunca más de 1 hora de duración.

En cuanto a los valores obtenidos de la luminancia umbral es adecuado recordar las posibles variaciones que puede sufrir dicha luminancia umbral con la excentricidad. Es bien conocido que la iluminación retiniana, obtenida mediante un sistema de visión maxwelliana, se mantiene constante desde 0° hasta los 15° de excentricidad (Bedell, 1982). Sin embargo, la sumación espacial parece jugar un papel importante a este respecto, de forma que, si el área del test es menor que el área de sumación completa sería, en principio, necesario emplear un factor de corrección. Así ocurre en los trabajos realizados en esta memoria, donde el estímulo utilizado (0.43°) es menor que el área de sumación espacial completa, que está en torno a 1° para excentricidades entre 6° y 15° (Zudeima, 1981). Una vez obtenidos los resultados valoraremos si es necesario emplear dicho factor de corrección.

4.3 Determinación del umbral absoluto (DA)

Este primer experimento fue realizado con la finalidad de encontrar el umbral absoluto para los distintos observadores en diferentes excentricidades retinianas. El umbral absoluto es el mínimo incremento de luminancia perceptible sobre un campo de adaptación de luminancia prácticamente cero y por tanto este valor puede ser utilizado como valor de referencia cuando se compara con los umbrales obtenidos en otras condiciones de luminancia (Adelson, 1982; Aguilar, 1954; Boynton, 1954). También es utilizado como valor de referencia para el cálculo del deslumbramiento incapacitante (Bichao, 1995).

El observador realiza las pruebas en completa oscuridad, en ausencia de cualquier tipo de fuente deslumbrante o luminosa, con una luminancia media percibida de 3.5×10^{-6} cd/m², y por tanto dentro de los valores del rango escotópico. Se midieron los valores de sensibilidad absoluta para fovea y para las distintas excentricidades retinianas. La figura 4.1 representa la secuencia temporal presentada al observador.

Los resultados de esta prueba se observan en la figura 4.2. En esta figura se representa el valor del logaritmo de la luminancia umbral absoluta ($\text{Log}L_u^a$) en función de la excentricidad para los

tres sujetos normales y para el sujeto con retinosis pigmentaria, en la condición de oscuridad.

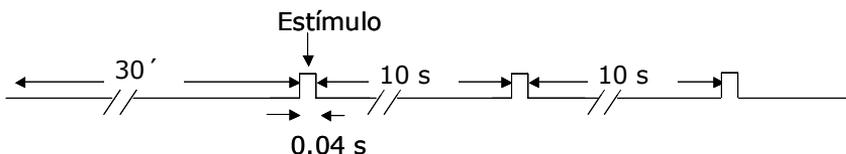


Figura 4.1 Presentación temporal de estímulos en la condición de oscuridad

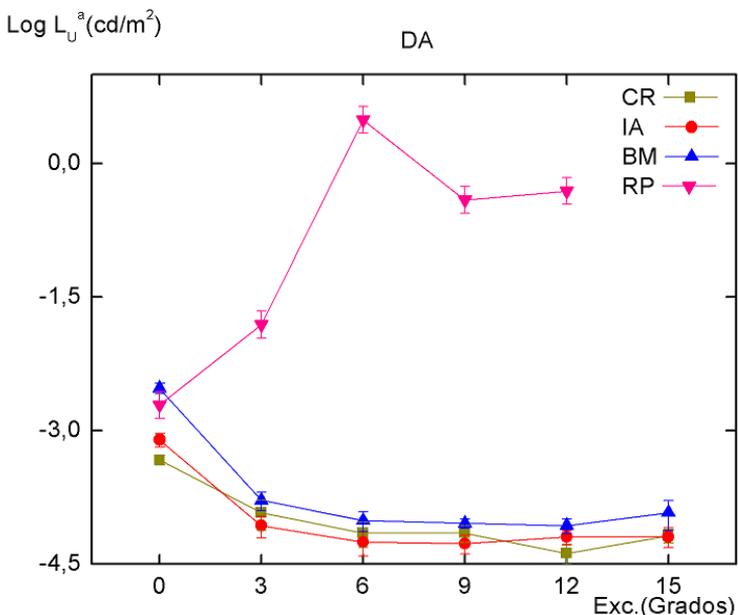


Figura 4.2 Logaritmo de luminancia umbral absoluta (cd/m^2) en función de la excentricidad retiniana (grados), para tres sujetos normales (CR, IA y BM) y para un paciente con retinosis pigmentaria (RP).

Los resultados muestran un comportamiento similar para los tres sujetos normales, donde la luminancia umbral tiene su máximo valor en fovea y va disminuyendo, bruscamente hacia los 3° de retina periférica, y más lentamente hacia los 6° desde donde parece que se mantiene más o menos constante. Si se estima la sensibilidad absoluta en términos del valor inverso de la luminancia umbral (apartado 1.2.3) se puede decir que es mayor en retina periférica. Este comportamiento es normal, debido a que los bastones, predominantes en la retina periférica, muestran mayor

sensibilidad en oscuridad (Riopelle y Bevan, 1954). Estos resultados indican un máximo de la sensibilidad a partir de los 6° de retina periférica, en la línea de estudios anteriores (Aulhorn y Harms, 1972). Un trabajo más actual de Lennie (1994) muestra resultados en esta línea aunque obtenidos a partir de pruebas de reconocimiento de letras y no de detección, como en nuestro experimento. En este estudio los autores miden la agudeza visual bajo condiciones escotópicas, observando la máxima agudeza escotópica hacia los 5° y manteniéndose más o menos constante hasta los 15°. Posteriormente Mills and Massey (1999) observaron, en la retina del mono, que en esa zona había mayor densidad de células amacrinas AII, y atribuyeron a estas células el límite de la agudeza visual escotópica, sugiriendo que a partir de 15° la agudeza escotópica estaba limitada por las células ganglionares medias. Aunque las pruebas de detección y de reconocimiento no son iguales, el mismo comportamiento demostrado para ambas sí puede ser debido a la misma causa. De esta forma se puede plantear que los valores de la sensibilidad retiniana absoluta podrían atribuirse tanto a sus interconexiones como a la densidad de fotorreceptores.

Por otro lado, la luminancia umbral en fóvea tiene un valor similar para todos los sujetos, incluso para el sujeto con retinosis pigmentaria. Esto es razonable ya que el estímulo utilizado subtiende sólo 0.43° y por tanto se está midiendo en una zona libre de bastones. Si la degeneración celular no ha alcanzado los conos foveales del sujeto con retinosis pigmentaria es de esperar que los umbrales sean similares a los de los sujetos normales. Sin embargo, el comportamiento de la retina periférica del sujeto con retinosis pigmentaria es opuesto al de los sujetos normales.

Los valores de luminancia umbral aumentan hacia un máximo en 6° de retina periférica, mostrando 4.5 unidades logarítmicas de diferencia con los sujetos normales, y luego disminuye hacia los 9° donde parece que se mantiene más o menos constante. Teniendo en cuenta que los bastones, para sujetos normales, aumentan la sensibilidad y que existe una reducción de la densidad de conos hacia la periferia, estos resultados pueden ser explicados por la degeneración de los bastones, que como ya se ha comentado anteriormente sufre este sujeto con retinosis pigmentaria.

En este caso, la curva mostrada en el experimento expondría el comportamiento funcional únicamente de los conos en su adaptación a la oscuridad (Stabell, 1981). Este comportamiento anómalo explica perfectamente la nictalopía del paciente con retinosis pigmentaria así como el resultado del electroretinograma presentado en el informe oftalmológico

Por tanto, todos los sujetos normales tiene mayor sensibilidad a la oscuridad en retina periférica que en retina foveal, ocurriendo lo contrario para el sujeto con retinosis pigmentaria. Además se ha podido comprobar la pérdida funcional de los bastones y la adecuada funcionalidad de los conos foveales en el sujeto con retinosis pigmentaria. Si en el experimento siguiente se calculan los umbrales de luminancia para un campo de adaptación mesópico se podrán realizar comparaciones con el valor de sensibilidad absoluta calculada en este experimento. Por otro lado, también se podrá calcular, a partir del umbral en oscuridad, el deslumbramiento incapacitante que puede producir un campo de distinta luminancia

4.4 Adaptación a campos de luminancia de 5 cd/m²

Este experimento pretende evaluar el comportamiento espacio temporal de distintas zonas de la retina ante un campo de adaptación mesópico de 5 cd/m². Para ello se medirá el comportamiento retiniano ante campos de adaptación estables y transitorios, tanto en fóvea como en distintas excentricidades. Para analizar más a fondo el comportamiento observado a 6° y 9° de excentricidad se evalúa la evolución temporal tanto en dichas excentricidades como en fóvea. Con un análisis de los resultados se podrá obtener información tanto del deslumbramiento incapacitante como de la velocidad de adaptación en las distintas zonas de la retina, que se irá mostrando a lo largo de este apartado.

4.4.1 Adaptación a un campo de adaptación estable y transitorio

4.4.1.1 Adaptación ante un campo estable (LA)

El observador realiza las pruebas ante un campo de adaptación estable siguiendo el procedimiento general explicado anteriormente. La prueba se realiza después de un período de preadaptación a la oscuridad de 30 min. Una vez que el observador está situado sobre la impresión dental, en la posición en la que va a ser medido, foveal o periférica, se somete durante un período de adaptación de 10 minutos a un campo de adaptación estable de 5 cd/m². Se han considerado 10 minutos como tiempo de adaptación según la bibliografía existente (Ferwerda, 1998). Después del período de adaptación se presenta el estímulo durante 40 ms.

Se ha considerado un tiempo de espera, entre las medidas, de 10 s para la recuperación de la retina. En este tiempo la proporción de fotorpigmento blanqueado, con dicho campo de adaptación es despreciable (Issolio, 2006a) y además es un tiempo suficiente para recuperar el diámetro pupilar (Issolio, 2006b). Por otro lado, se ha comprobado que en ese tiempo la postimagen percibida por el propio observador había desaparecido, y por tanto no repercutiría en la siguiente medida (Adelson, 1982). En la figura 4.3 se puede observar un esquema de la presentación temporal.

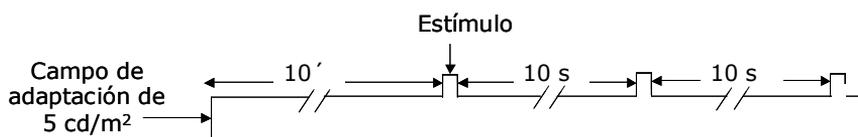


Figura 4.3 Presentación temporal en la condición de campo de adaptación estable

Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 4.4, donde se ha representado el logaritmo de la luminancia umbral ($\text{Log}L_u^{\text{LA}}$) en función de la excentricidad para los tres sujetos normales y para el sujeto con retinosis pigmentaria. El comportamiento para los tres sujetos normales es similar, mostrando un aumento de la luminancia umbral en la periferia con

respecto a la fovea. En la fovea, libre de bastones, se puede observar la máxima sensibilidad para todos los sujetos incluso para el sujeto con retinosis pigmentaria. Tanto los conos como los bastones contribuyen a la sensibilidad en proporciones desconocidas, sin embargo suponemos que los conos predominan en el rango mesópico más alto. La sensibilidad va disminuyendo hacia la periferia, porque a medida que nos alejamos de la fovea la densidad de conos disminuye. No obstante, esta respuesta también puede estar influenciada por la interacción entre ambos fotorreceptores (Stockman, 2006).

En los sujetos normales el incremento de la luminancia umbral es progresivo hasta un máximo en los 9° de excentricidad, con una diferencia promedio, con respecto al umbral en fovea, de 1.36 (± 0.06) unidades logarítmicas. Sin embargo, para el sujeto con retinosis pigmentaria este incremento es máximo en 12° con una diferencia con respecto a fovea de 2.7 unidades logarítmicas. A partir de los 9° el umbral de luminancia es más o menos estable para los observadores IA y BM, y algo más bajo para el observador CR, pero sin embargo se observa que sigue aumentado para el sujeto con retinosis pigmentaria, mostrando así un comportamiento distinto.

Es evidente por tanto, que el sujeto con retinosis pigmentaria muestra mayor luminancia umbral que los sujetos normales a partir de los 6° y que crece hasta los 12° de excentricidad. Para 6° y 9° de excentricidad este incremento es de 0.6 unidades logarítmicas, sobre la luminancia umbral de CR y BM y de 0.9 unidades logarítmicas sobre la luminancia umbral de IA. Para 12° de excentricidad el incremento es de 1 unidad logarítmica sobre la luminancia umbral de CR y BM y de 1.3 unidades logarítmicas sobre la luminancia umbral de IA. El aumento de la luminancia umbral experimentado por el sujeto con retinosis pigmentaria se hace, por tanto, más notable hacia la parte más periférica de la retina.

Dado que estamos ante un campo con luminancia mesópica, el comportamiento observado en los sujetos normales puede ser debido a una interacción entre conos y bastones. Ahora bien, aunque desconocemos el nivel de participación de cada uno de los fotorreceptores con esta luminancia, es posible que exista un

predominio de la función de los conos periféricos. Esto indicaría que el aumento de luminancia umbral que sufre el sujeto con retinosis pigmentaria pueda ser debido a algunas anomalías en dichos conos periféricos. De hecho, es sabido que los pacientes con retinosis pigmentaria también sufren degeneración de los conos y que esta empieza en retina periférica, explicando así el aumento de la luminancia umbral en los 12º de excentricidad.

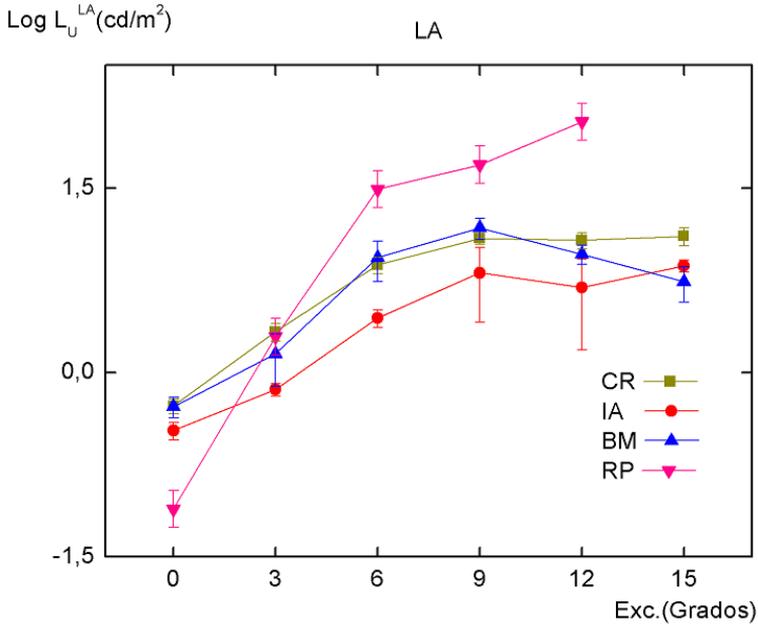


Figura 4.4 Logaritmo de luminancia umbral (cd/m²) en función de la excentricidad retiniana (grados), para tres sujetos normales (CR, IA y BM) y para un sujeto con retinosis pigmentaria (RP), para un campo de adaptación con luminancia estable (LA)

4.4.1.2 Adaptación a un campo transitorio (SOA)

El observador realiza las pruebas ante un campo de adaptación transitorio siguiendo el procedimiento general ya explicado. Después del período de adaptación a la oscuridad de 30 minutos, se le presenta al observador un campo de adaptación de 500 ms, y 300 ms después del encendido de dicho campo de adaptación se le presenta el estímulo de 40 ms. Esto significa que Δt o el encendido asincrónico del estímulo (SOA), explicado en el apartado 1.2.4.4, es de 300 ms. Se ha determinado este tiempo de 300 ms por ser este el tiempo de adaptación estimado por la CIE

para calcular la pérdida de sensibilidad ante campos transitorios. El tiempo de espera entre secuencias es de 10 s al igual que en la prueba anterior y por los mismos motivos. La secuencia de la presentación temporal se puede ver en la figura 4.5.

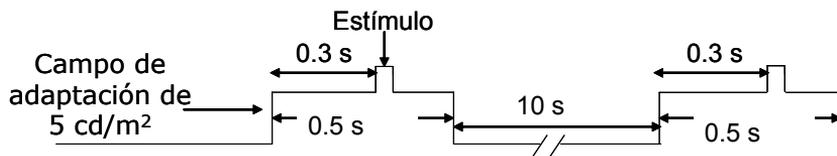


Figura 4.5 Presentación temporal en la condición de adaptación transitoria.

Los resultados se muestran en la figura 4.6, donde se representa el logaritmo de la luminancia umbral ($\text{Log}L_u^{\text{SOA}300}$), obtenido en esta condición, en función de la excentricidad. En esta figura se observa un comportamiento bastante similar para todos los sujetos, incluido el sujeto con retinosis pigmentaria, si se excluye el valor de luminancia umbral obtenido a 6° de la retina periférica. De hecho, este paciente presenta en su campimetría un aumento acusado del umbral en esos 6° de retina temporal, indicando en esta zona un comportamiento anómalo. En la fovea el umbral es similar al de los sujetos normales, afianzando la teoría de que los conos foveales están funcionalmente sanos.

4.4.1.3 Comparación entre adaptación estable y transitoria

Con el fin de observar más claramente los resultados para ambas condiciones se han representado los valores del logaritmo de luminancia medidos en condición estable (LA) y transitoria (SOA 300), para cada uno de los sujetos (IA, CR, BM y RP) en la figura 4.7a, b, c y d, respectivamente. Para los sujetos normales, en la condición transitoria la luminancia umbral aumenta progresivamente hacia los 15° de excentricidad, mientras que para la condición estable el aumento es progresivo hacia los 9° , pero a partir de aquí se mantiene constante o incluso disminuye. Sin embargo, el sujeto con retinosis pigmentaria, presenta un crecimiento progresivo de la luminancia umbral hacia la retina periférica para la condición estable mientras que para la condición transitoria parece que se mantiene estable a partir de los 6° . Este comportamiento es contrario al de los sujetos normales.

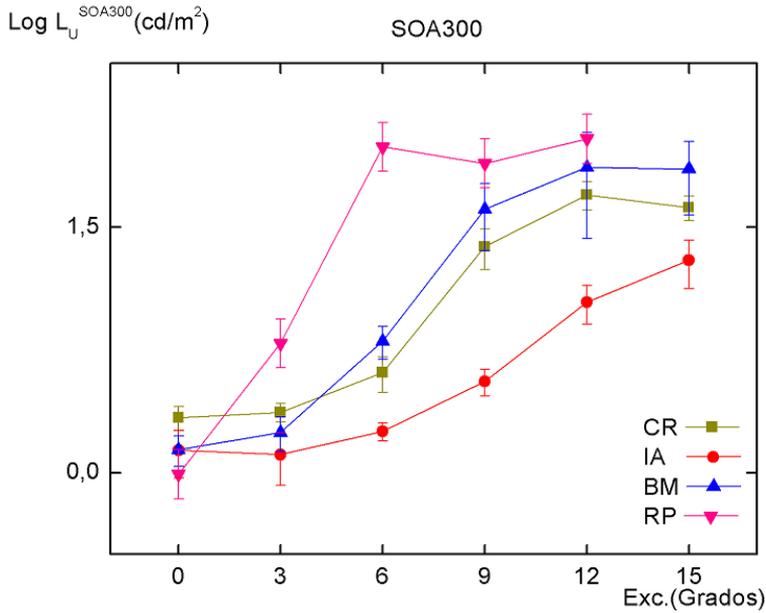


Figura 4.6. Logaritmo de luminancia umbral (cd/m²) en función de la excentricidad retiniana (grados), para tres sujetos normales (CR, IA y BM) y para un sujeto con retinosis pigmentaria (RP), para un campo de adaptación transitorio (SOA300)

Es relevante, como ya se vio en la figura 4.4, que el aumento del umbral para la condición estable no llega a 1.5 unidades logarítmicas para los sujetos normales mientras que para el sujeto con retinosis pigmentaria es de 2.7 unidades logarítmicas. Sin embargo, los valores de luminancia umbral foveal, para ambas condiciones, son semejantes para todos los observadores incluyendo el sujeto con retinosis pigmentaria, demostrando que los conos foveales no están afectados funcionalmente.

Por otro lado, en la figura 4.7 se aprecia una zona donde ambas condiciones, estable y transitoria, muestran valores similares de luminancia umbral. Cuando el umbral ante un campo transitorio alcanza el mismo valor de luminancia umbral que había alcanzado ante un campo estable el sistema ya se ha adaptado. Esto parece ocurrir así entre los 3° y 9° para los tres sujetos normales y en 12° para el sujeto con retinosis pigmentaria. Debido a la importancia de este resultado, estos datos se analizarán con mayor detenimiento en el apartado 4.4.3.2 dedicado al estudio de la velocidad de adaptación.

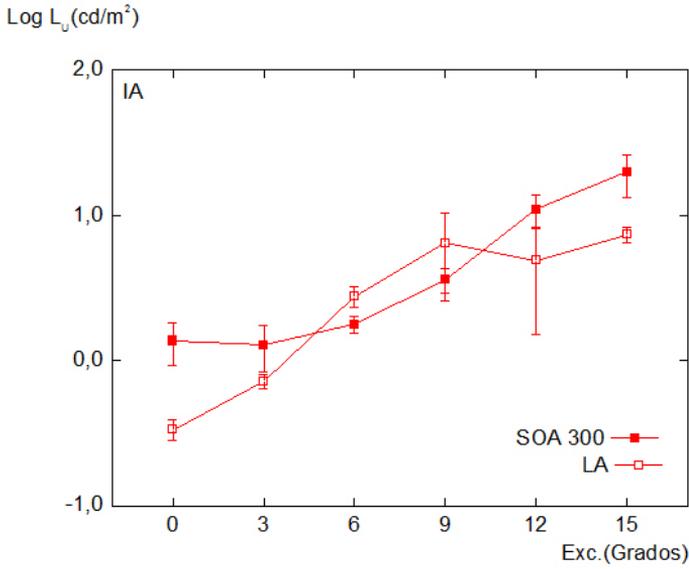


Figura 4.7a. Observador IA

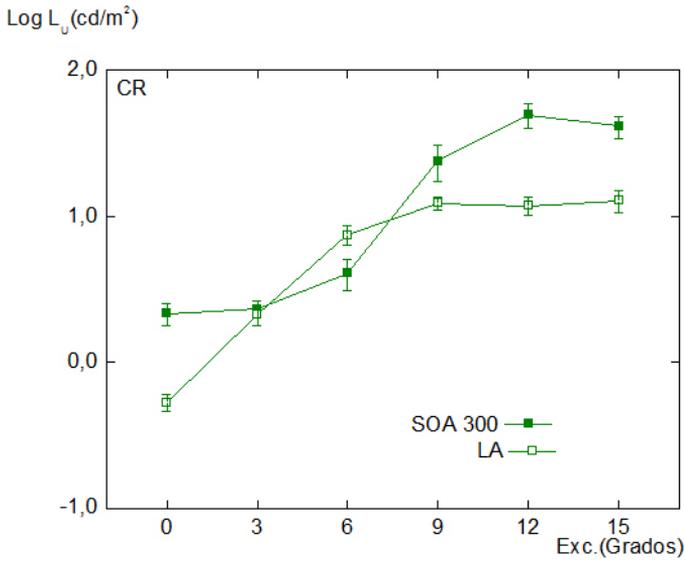


Figura 4.7b. Observador CR

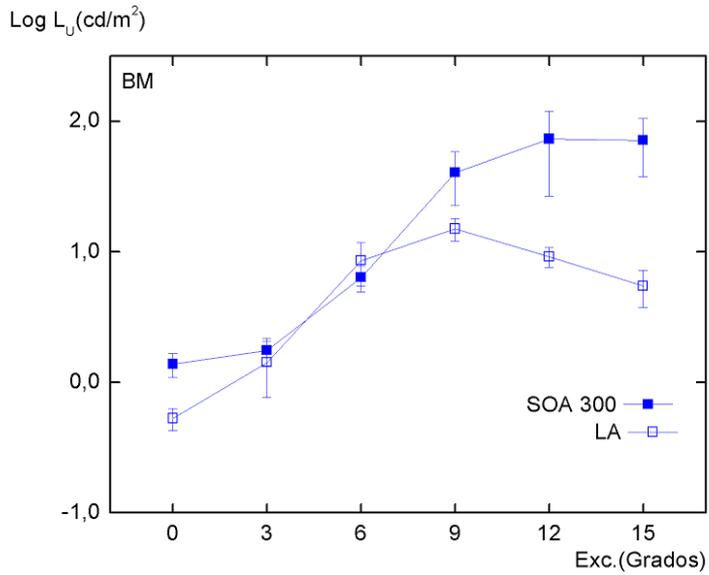


Figura 4.7c. Observador BM

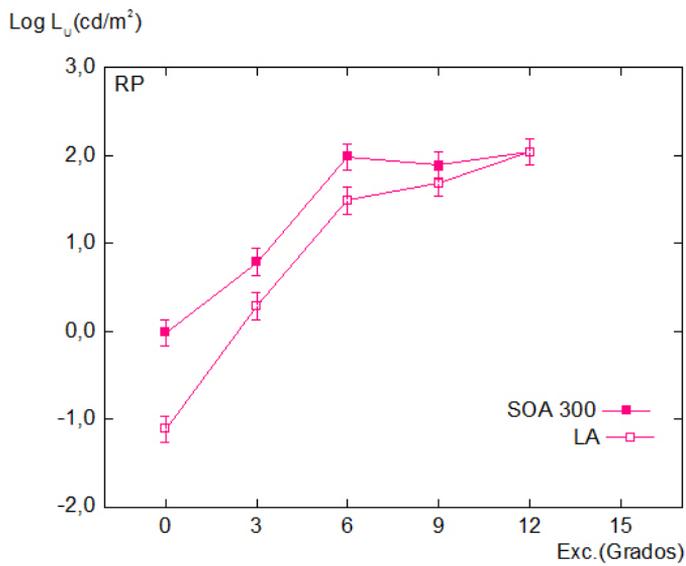


Figura 4.7d. Observador RP

Figura 4.7a, b, c y d. En cada una de la figuras se representa el logaritmo de la luminancia umbral para la condición estable (LA) y transitoria (SOA300) para cada uno de los observadores con un campo de adaptación de 5 cd/m²

4.4.2 Estudio de la evolución temporal de la adaptación en fóvea, 6° y 9°

Como consecuencias del comportamiento observado, sobre todo a 6° y 9° de retina periférica, parece adecuado analizar la adaptación temporal, tanto en fóvea como en dichas zonas de la retina. Para ello se ha estudiado la evolución temporal de la adaptación en fóvea, a 6° y a 9° de excentricidad. Este experimento fue realizado sólo para los tres sujetos normales. El procedimiento general ha sido el mismo, pero en este caso se ha medido la luminancia umbral para distintas presentaciones temporales del test con respecto al campo de adaptación (SOA = -25, 0, 50, 150 y 300 ms). La secuencia de la presentación puede verse en la figura 4.8.

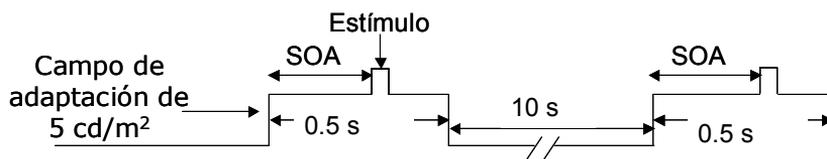


Figura 4.8. Secuencia de la presentación temporal del estímulo con respecto al campo de adaptación.

Los resultados se pueden observar en la figura 4.9a, b y c, donde se representa el logaritmo de la luminancia umbral en función de la presentación temporal del estímulo con respecto al campo de adaptación para fóvea, 6° y 9° de excentricidad, para cada uno de los sujetos, CR, BM e IA respectivamente. En esta figura se han incluido los valores del umbral absoluto (DA) y los valores del umbral para un campo estable (LA). Estas curvas nos informan no sólo de la sensibilidad en diferentes localizaciones retinianas sino también de la velocidad de adaptación.

Para los tres sujetos, la luminancia umbral cambia de forma muy similar, mostrando un incremento de la misma incluso en los primeros 25 ms antes del encendido del campo de adaptación (SOA = -25 ms). La pendiente, marcada con una línea discontinua entre DA y SOA = -25 ms, se muestra mucho mayor para 6° y 9° que para fóvea. Esto significa que el efecto de enmascaramiento es más marcado en 6° y 9° que en fóvea.

En todos los casos se observa la máxima pérdida de sensibilidad cuando el estímulo y el campo de adaptación se encienden simultáneamente ($SOA = 0$). Después de esta subida brusca, el umbral tiende a disminuir progresivamente a medida que el tiempo de presentación del estímulo se retrasa con respecto al inicio del campo de adaptación, con una tendencia a alcanzar el valor umbral conseguido con un campo estable (LA) es decir, cuando la retina está adaptada a dicho campo ($SOA = \infty$). En la figura 4.9 se ha dibujado una línea discontinua entre la condición $SOA = 300$ ms y LA. Para todos los sujetos, dicha línea muestra una pendiente negativa para la condición foveal, indicando que aún no hay adaptación. Sin embargo, todos los sujetos muestran una pendiente nula o incluso una pendiente positiva para 6° de excentricidad, indicando que el valor de la luminancia umbral es igual o menor que para la condición estable, y por tanto el proceso de adaptación ha finalizado. Esto significa que todos los sujetos tienen mayor velocidad de adaptación en 6°. Para 9°, en cambio, sólo el sujeto IA muestra terminada su adaptación, mientras que BM y CR aún no han completado este proceso. Por tanto el comportamiento, similar para todos los sujetos normales, presenta una velocidad de adaptación a un campo de adaptación con luminancia mesópica de 5 cd/m² diferente según la zona de la retina

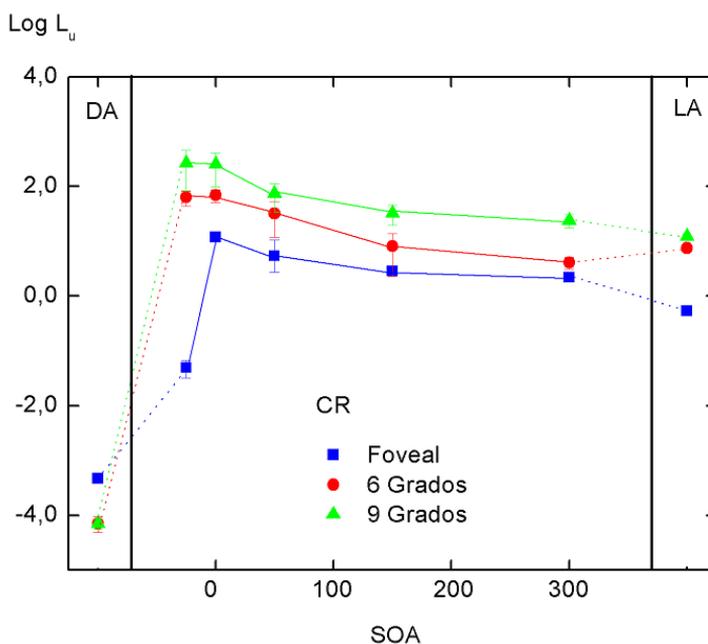


Figura 4.9a. Observador CR

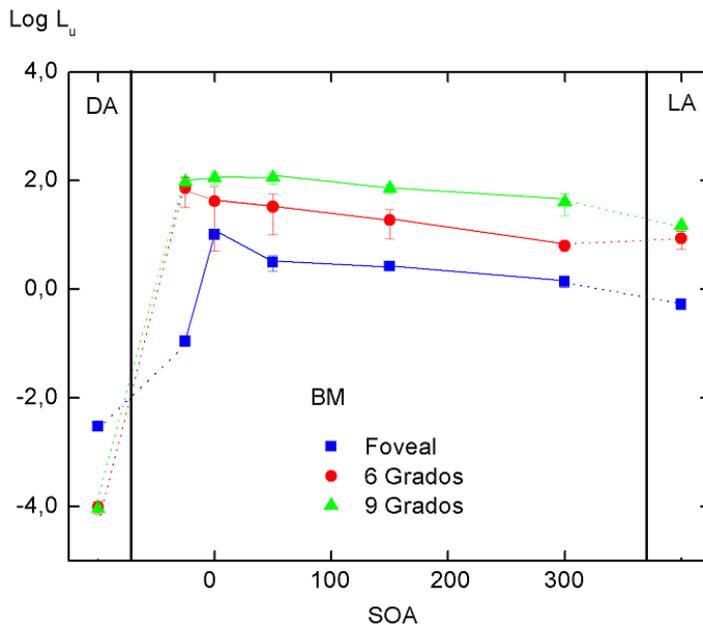


Figura 4.9b. Observador BM

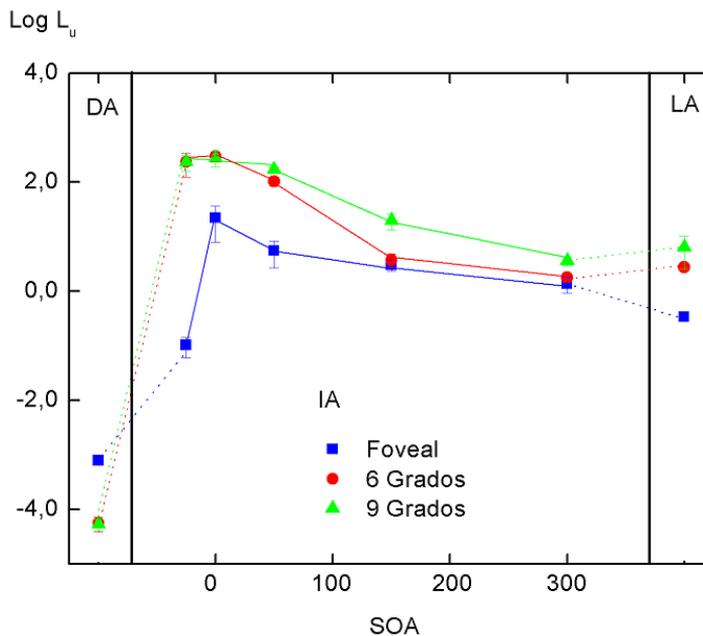


Figura 4.9c. Observador IA

Figura 4.9a, b y c. Representación de la adaptación temporal de la retina para los tres sujetos normales. En esta figura se representa el logaritmo del umbral para diferentes presentaciones temporales (SOA = -25; 0; 50; 150 y 300 ms), para la condición de oscuridad (DA) y para un campo de luminancia estable (LA).

4.4.3 Análisis de los resultados

Una vez expuestos los resultados obtenidos en este experimento, conviene realizar un análisis de los mismos con el fin de extraer conclusiones relevantes. A partir de los datos obtenidos se puede analizar el deslumbramiento incapacitante producido por campos estables y transitorios, con el fin de completar y afianzar algunos resultados ya expuestos en la literatura (Bichao, 1995). Por otro lado parece observarse una velocidad de adaptación diferente según la zona de la retina medida y por ello se realizará en este apartado un análisis más exhaustivo de este aspecto. Como ya se apuntó en el apartado 4.1, cuando el área del test es menor que el área de sumación completa sería necesario emplear un factor de corrección para los valores de la luminancia umbral obtenidos en retina periférica. En este caso el área del estímulo utilizado es de 0.43° y el área de sumación espacial completa está en torno a 1°, para excentricidades entre 6° y 15° (Zudeima, 1981). Esto indica que la relación estimada entre ambas áreas es de un factor 4, que expresado en unidades logarítmicas supone un factor de corrección de 0.6. Este factor de corrección, igual o menor de 0.6 unidades logarítmicas, tiene una mínima influencia en las medidas de la luminancia umbral. Por tanto, el efecto sobre los resultados encontrados no es significativo y por supuesto en ningún caso afecta a los resultados más concluyentes de este trabajo, obtenidos mediante la comparación de medidas a la misma excentricidad o a las comparaciones entre sujetos normales y el sujeto con retinosis pigmentaria, ya que las medidas están realizadas en las mismas condiciones. Es por estos motivos por lo que no se ha aplicado dicho factor de corrección.

4.4.3.1 Deslumbramiento incapacitante

Para realizar este análisis hemos recurrido a la nomenclatura típica utilizada en la bibliografía de deslumbramiento incapacitante transitorio [$\text{Log}(L_u^{\text{SOA}}/L_u^{\text{a}})$] y estable [$\text{Log}(L_u^{\text{LA}}/L_u^{\text{a}})$] (Bichao, 1995). Recordemos que $\text{Log}L_u^{\text{SOA}}$ es el umbral de luminancia calculado para la condición transitoria, $\text{Log}L_u^{\text{a}}$ es el umbral de luminancia absoluto y $\text{Log}L_u^{\text{LA}}$ es el umbral de luminancia calculado para la condición estable. Aunque el término de deslumbramiento incapacitante se utiliza para

condiciones de adaptación indirecta, Boynton (1954) concluyó que el efecto del encendido de un campo de adaptación en condición directa sobre la evolución temporal es el mismo que el producido por una condición indirecta de una cierta luminancia. Por este motivo, aunque en nuestro trabajo utilizamos adaptación directa, empleamos este término para analizar los resultados.

Los resultados se pueden ver en la figura 4.10, donde se ha representado, para cada sujeto, el deslumbramiento estable y transitorio en fóvea, 6° y 9° de excentricidad. El deslumbramiento transitorio se ha calculado para SOA = 0, es decir, cuando el encendido del estímulo fue simultáneo con el encendido del campo de adaptación. Los resultados muestran, para todos los sujetos, mayor deslumbramiento con la condición transitoria que con la condición estable, tanto en fóvea como en periferia. Por otro lado, ambos tipos de deslumbramiento son más acusados para la retina periférica que para la fóvea. Este comportamiento es, en parte, debido a que el umbral absoluto en fóvea es mucho mayor que en periferia, mientras que el umbral para SOA = 0 y para LA es menor en fóvea que en periferia, como se pudo ver en las gráficas de la figura 4.9.

Los resultados obtenidos en este experimento confirman los resultados obtenidos por Bichao *et al* (1995). Sin embargo, Bichao *et al* compararon medidas foveales y excéntricas a 2.8° realizadas en condiciones diferentes, mientras que en nuestro experimento hemos utilizado condiciones iguales tanto para fóvea como para periferia y además hemos ampliado la zona estudiada de la retina periférica. Es por ello que no sólo podemos confirmar los resultados de Bichao sino afianzarlos de forma más concluyente a zonas más periféricas de la retina.

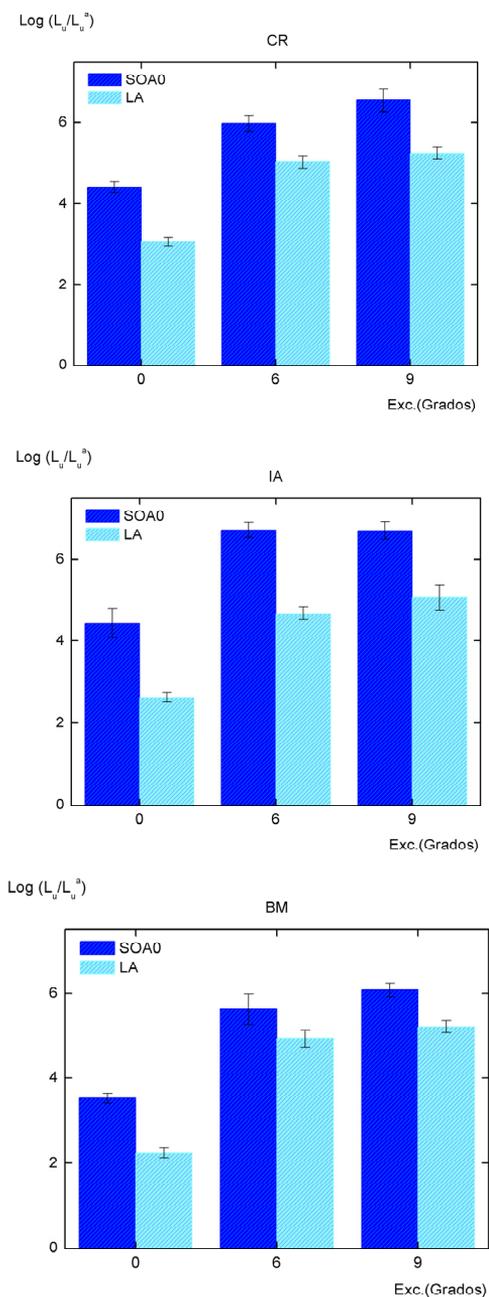


Figura 4.10. Deslumbramiento [$\text{Log}(L_u/L_u^a)$] transitorio (SOA = 0) y estable (LA) en función de fóvea, 6° y 9°, para cada uno de los observadores (BM, CR e IA). Las barras de error representa el error estadístico.

4.4.3.2 Velocidad de adaptación

Como pudimos ver en la figura 4.7, para los tres sujetos normales existe un intervalo, entre 3° y 9°, en que los valores de L_u^{SOA300} y L_u^{LA} presentan valores similares e incluso el valor de L_u^{LA} es mayor que el valor de L_u^{SOA300} . Sin embargo, para el resto de la retina, foveal y periférica, el valor de L_u^{SOA300} siempre está por encima del valor L_u^{LA} . En esta figura es relevante la diferencia de comportamiento entre el sujeto con retinosis pigmentaria y los sujetos normales. Para el sujeto con retinosis pigmentaria los valores de L_u^{SOA300} y L_u^{LA} tienden a aumentar con la excentricidad, disminuyendo su diferencia hasta coincidir en los 12° de retina periférica, la zona límite de su campo visual útil. Por tanto, se puede decir que los sujetos normales muestran una adaptación más rápida entre 6° y 9° que en fovea o que el resto de la periferia cuando se les presenta el estímulo 300 ms después del campo de adaptación mesópico de 5 cd /m², mientras que el sujeto con retinosis pigmentaria muestra una mayor velocidad de adaptación a 12° de excentricidad, en las mismas condiciones.

Para analizar la velocidad de adaptación se ha utilizado el índice ϕ ($\phi = L_u^{SOA300}/L_u^{LA}$) o pérdida de sensibilidad, según lo explicado en el apartado 1.2.4.4. Cuando este índice ϕ está cerca de la unidad ($\text{Log } \phi = 0$) indica que la adaptación de la retina ya se ha alcanzado y en este caso se habría conseguido la adaptación en un período de tiempo de 300 ms. Cuando el índice ϕ es mayor, quiere decir que la retina aún no se ha adaptado en 300 ms. Para analizar esta velocidad de adaptación en toda la retina, se ha calculado ϕ , no sólo a 6° y 9° sino en un rango más amplio, desde fovea hasta los 15° de excentricidad. Esto se ha representado en la figura 4.11 donde se observa el $\text{Log } \phi$ en función de la excentricidad.

En esta figura se pueden observar varios aspectos relevantes. En primer lugar, la figura muestra que el comportamiento de los tres sujetos normales es muy similar. En estos sujetos se observa una disminución de $\text{Log } \phi$ desde la fovea hasta los 6° o 9° desde donde vuelve a aumentar de nuevo hacia la periferia. Este comportamiento muestra una curva con forma de U, desde fovea hasta los 12°, para los tres sujetos normales. Esto muestra que la velocidad de adaptación aumenta desde la fovea hacia la periferia cercana, entre 3° y 9°, y vuelve a disminuir hacia

las zonas más periféricas. Sin embargo, el comportamiento del sujeto con retinosis pigmentaria es muy diferente, mostrando un aumento progresivo en la velocidad de adaptación desde la fóvea hacia los 12° de excentricidad. Se puede decir así que para el sujeto con retinosis pigmentaria en 12° es donde $\text{Log } \phi$ tiende a 0 y por tanto es la zona de la retina que se adapta más rápidamente a un campo de adaptación de 5 cd/m². Sin embargo, para un sujeto normal, la zona de la retina que se adapta más rápidamente está entre los 3° y 9°, mientras que para fóvea o retina más periférica se requiere más de 300 ms para conseguir la adaptación.

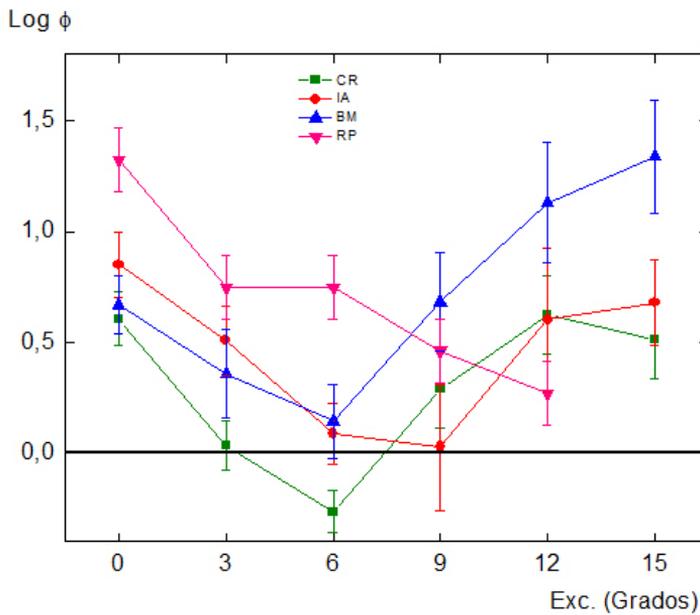


Figura 4.11. Logaritmo del índice ϕ ($\phi = L_u^{\text{SOA}300} / L_u^{\text{LA}}$) en función de la excentricidad, para los tres sujetos normales (CR, IA y BM) y para el sujeto con retinosis pigmentaria (RP). Las barras de error representa el error estadístico.

A la vista de estos datos y con el fin de obtener un valor más preciso de la velocidad de adaptación, se ha representado, en la figura 4.12a, b y c, el $\text{Log} (L_u^{\text{SOA}} / L_u^{\text{LA}})$ para distintos tiempos de presentación del estímulo (SOA) en fóvea, 6° y 9° respectivamente. En esta figura (4.12a) se puede observar como en fóvea a los 300 ms aún no se ha recuperado la sensibilidad retiniana inicial, y por tanto aún no se ha adaptado, y a 9° (4.12c) sólo uno de los sujetos (IA) parece haber alcanzado la adaptación. Sin embargo, en 6° (4.12b) todos los sujetos están adaptados incluso antes de los

300 ms, observándose en los 150 ms una adaptación completa para dos de los observadores (IA y CR) y prácticamente completa para el sujeto BM.

$$\text{Log} (L_u^{\text{SOA}} / L_u^{\text{LA}})$$

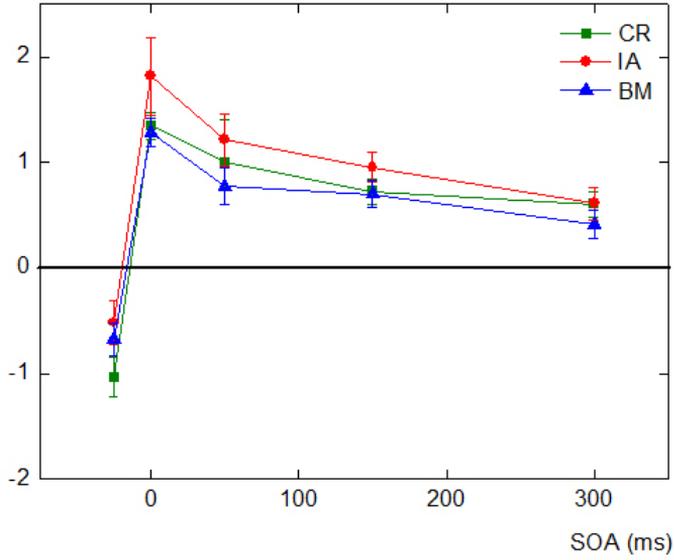


Figura 4.12a. Fóvea

$$\text{Log} (L_u^{\text{SOA}} / L_u^{\text{LA}})$$

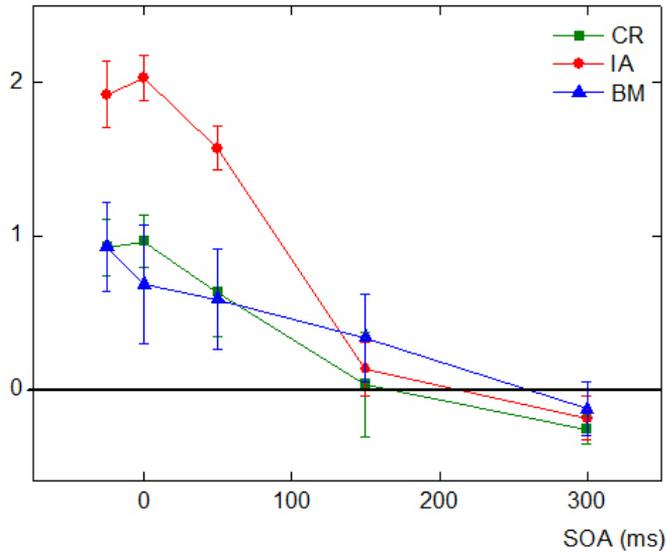


Figura 4.12b. 6° de excentricidad.

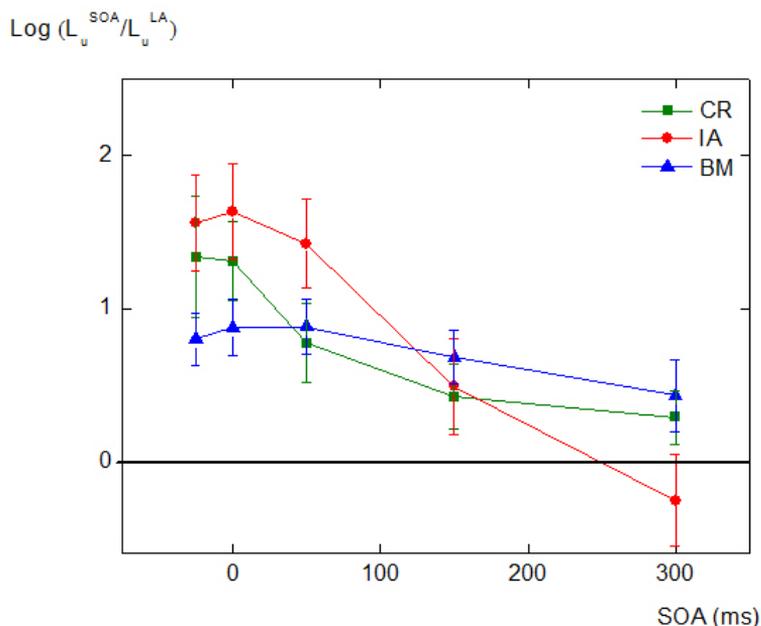


Figura 4.12c. 9° de excentricidad

Figura 4.12. a, b y c. $\text{Log}(L_u^{\text{SOA}}/L_u^{\text{LA}})$ en función del tiempo del encendido asincrónico del estímulo (SOA) para fóvea, 6° y 9° de retina periférica, respectivamente, para los tres sujetos normales.

4.4.4 Primeras conclusiones

A la vista de estos resultados, se pueden apuntar unas primeras conclusiones en cuanto a la adaptación retiniana ante campos con luminancia de 5 cd/m². Se ha podido comprobar que la sensibilidad retiniana es más alta en fóvea que en el resto de la retina periférica, pero sin embargo la velocidad de adaptación parece ser diferente según la zona de la retina estudiada. Además se han podido comparar los resultados obtenidos para sujetos normales y para un sujeto con retinosis pigmentaria, observando que la velocidad de adaptación para una misma zona de la retina periférica es diferente para sujetos normales que para el sujeto con retinosis pigmentaria. En principio, este comportamiento diferente puede ser atribuido a la diferente contribución de conos y bastones para sujetos normales y para el sujeto con retinosis pigmentaria.

Para analizar más detenidamente este aspecto, se han realizado pruebas complementarias con campos de luminancia fotópica con el fin de saturar completamente los bastones y valorar la contribución únicamente de los conos. Por otro lado, se compararán las medidas obtenidas con luminancia mesópica de 5 cd/m^2 con nuevas medidas realizadas con luminancia mesópica más baja. Esta comparación se realizará a causa de las diferencias de comportamiento entre ambas luminancias que señalan algunos autores (Plainis, 2005).

4.5 Experimentos complementarios

El estudio de la adaptación retiniana en distintas condiciones de luminancia es adecuado para evaluar la función de conos y bastones. Para realizar las medidas en niveles de luminancia más bajos se ha utilizado un campo de adaptación de 0.6 cd/m^2 . Con estas medidas se pueden establecer relaciones de la función de conos y bastones entre distintos niveles de luminancia mesópica. Por otro lado, se presentará un campo de adaptación fotópico de 100 cd/m^2 . Con este valor de luminancia los bastones están completamente saturados (Aguilar, 1954) y por tanto estas medidas son útiles para comprobar la función únicamente de los conos, sin intrusión de bastones, a cualquier excentricidad.

Los observadores que participaron en este experimento fueron los tres sujetos ocularmente sanos (CR, IA y BM) que han participado anteriormente. Las pautas que se han seguido en cuanto a los observadores han sido, por tanto, las mismas. En este experimento se utilizó el método de los límites, donde la luminancia umbral se ha calculado mediante el promedio y el error estimado mediante la desviación estándar. Se consideró suficiente el umbral obtenido con el método de los límites no sólo porque la diferencia, comprobada anteriormente, entre el método de los límites y el de los estímulos constantes es del orden del propio error de la medida, sino porque una estimación de los umbrales era suficiente para comprobar y completar los resultados observados en los experimentos anteriores.

4.5.1 Adaptación a campos de luminancia de 0.6 cd/m^2

En este caso se siguieron las pautas que se habían considerado en el experimento 1, tanto para la condición estable como para la condición transitoria. En el caso de la condición estable se presentó el campo de luminancia de 0.6 cd/m^2 durante 10 minutos, después de haber estado preadaptado durante 30 minutos a la oscuridad. En el caso de la condición transitoria, después del período de adaptación a la oscuridad, se le presentó un estímulo de 40 ms, 300 ms después del encendido del campo de adaptación. La secuencia, repetida cada 10 s, es por tanto la misma que se utilizó para los experimentos anteriores.

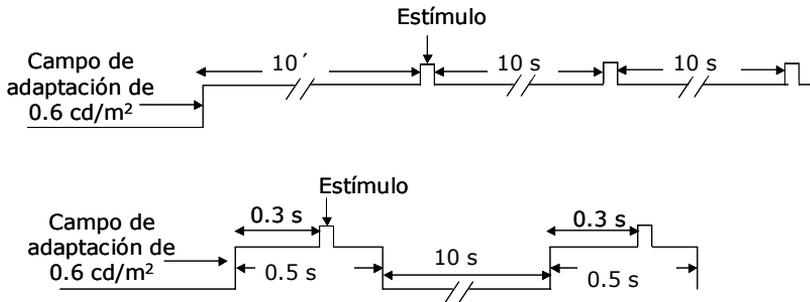


Figura 4.13. Secuencia de presentación del estímulo ante un campo de adaptación mesópico de 0.6 cd/m^2 .

En la figura 4.14a, b y c se representan los valores de $\text{Log } L_u^{\text{SOA}}$ y $\text{Log } L_u^{\text{LA}}$ para los tres observadores normales, CR, IA y BM respectivamente, en función de la excentricidad. En la figura se puede ver un acercamiento hacia los 6° de ambas curvas, y un mayor valor de luminancia umbral ante un campo transitorio para la fovea y para las demás excentricidades. Este comportamiento es similar al comportamiento que se observa ante un campo de luminancia mesópica de 5 cd/m^2 .

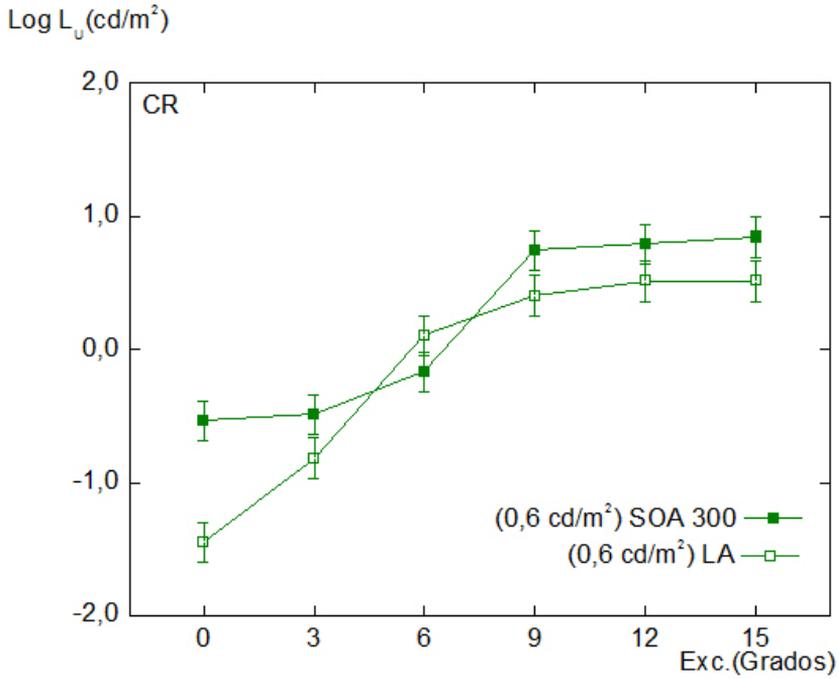


Figura 4.14a. Observador CR

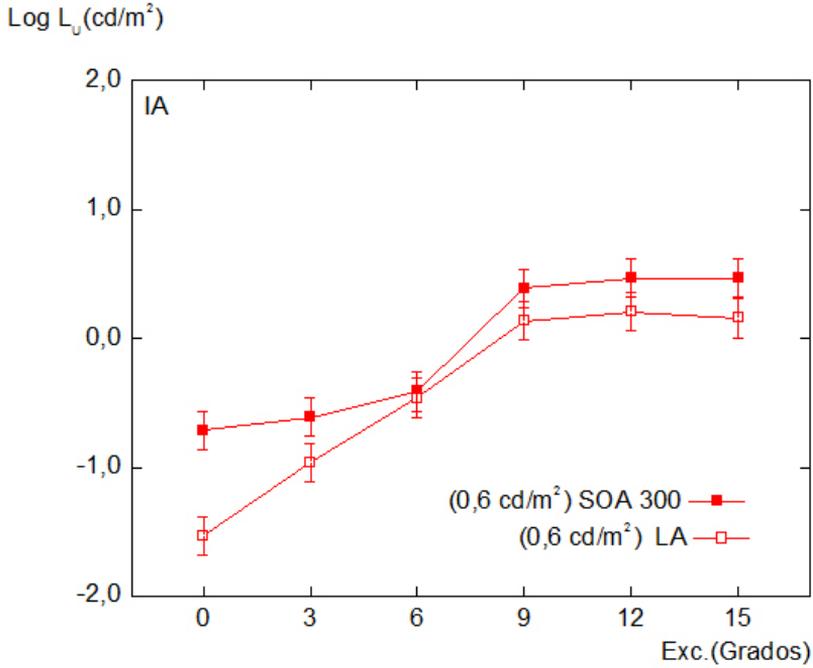


Figura 4.14b Observador IA

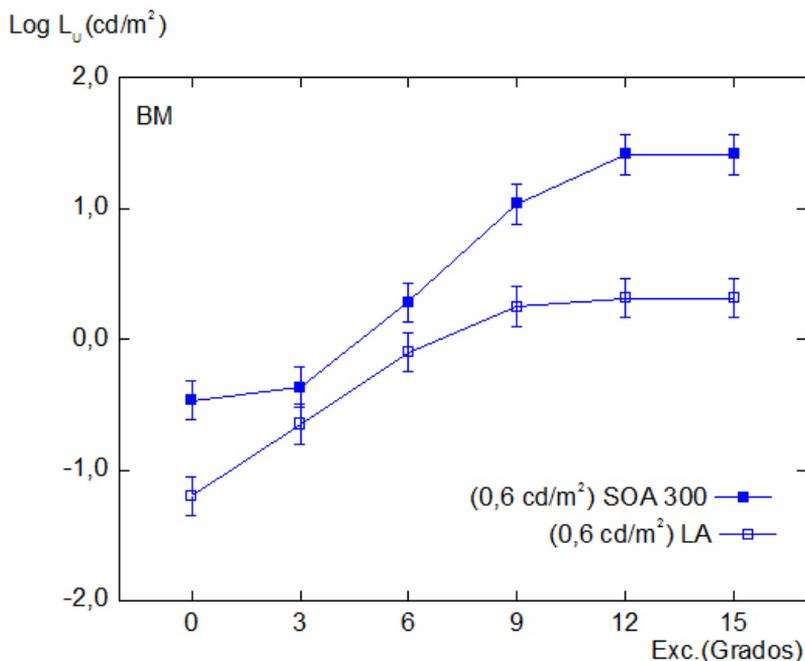
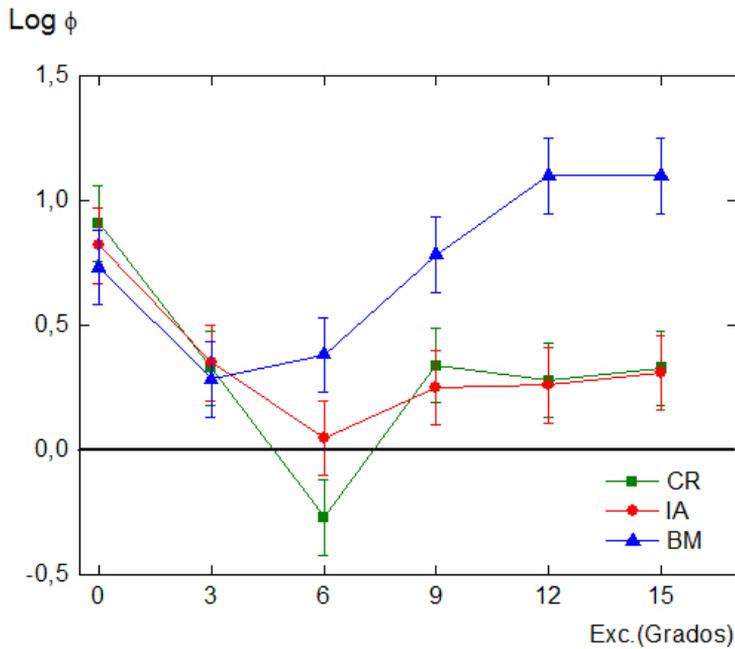


Figura 4.14 c Observador BM

Figura 4. 14 a, b y c. En cada una de la figuras se representa el logaritmo de la luminancia umbral para la condición estable (LA) y transitoria (SOA300) para cada uno de los observadores CR, IA y BM respectivamente, con un campo de adaptación de 0.6 cd/m².

En la figura 4.15 se representa Log ϕ , como un indicativo de la velocidad de adaptación, ante un campo de luminancia mesópica de 0.6 cd/m². Se puede observar como todos los sujetos presentan un comportamiento similar al que se observó ante un campo de luminancia mesópica de 5 cd/m². También se observa un aumento de la velocidad de adaptación hacia los 3° para BM y en los 6° para IA Y CR y una disminución hacia la retina más periférica. Este comportamiento muestra una forma de U similar a la mostrada para luminancia mesópica de 5 cd/m², aunque mucho menos pronunciada para CR e IA, ya que Log ϕ parece estabilizarse desde los 9° hasta los 15° de excentricidad.



4.15 Logaritmo del índice ϕ ($\phi = L_u^{SOA300} / L_u^{LA}$) en función de la excentricidad, para los tres sujetos normales (CR, IA y BM) y para un campo de adaptación de 0.6 cd/m^2 .

4.5.2 Adaptación a campos fotópicos

En el caso del campo de adaptación fotópico, de 100 cd/m^2 , se realizaron algunas modificaciones en el procedimiento general utilizado en los experimentos anteriores. En este caso, aunque el blanqueamiento de fotorreceptores era insignificante y la estabilización pupilar adecuada con 10 s de tiempo de espera entre las medidas, se esperó un tiempo de 30 s para eliminar la postimagen percibida por el observador. La secuencia de la presentación temporal se representa en la figura 4.16.

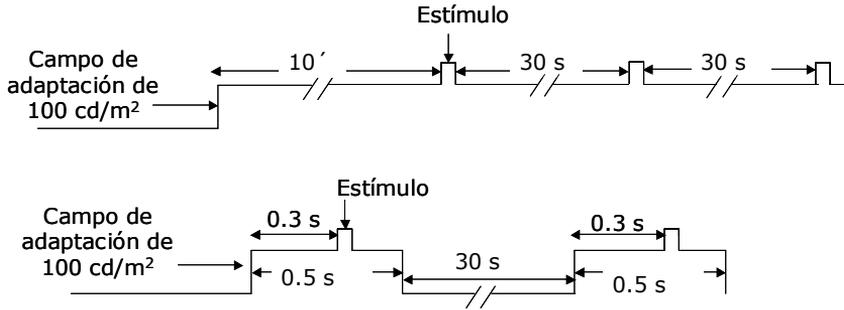


Figura 4.16. Secuencia de presentación del estímulo y del campo de adaptación fotópico

Por otro lado, en este experimento fue necesario dilatar la pupila, debido a que, en el instante del encendido, se producía una disminución del tamaño pupilar a un diámetro menor que el del filamento de la fuente. Esta situación, que ya ha sido explicada en el apartado 2.3.4.2, hizo necesaria la utilización de un midriático. El midriático utilizado, bajo prescripción oftalmológica, fue tropicamida al 1%. La tropicamida es un fármaco que bloquea las respuestas del músculo esfínter del iris y del músculo ciliar. La solución al 1% produce parálisis de la acomodación así como midriasis. Su acción comienza rápidamente, el efecto máximo se evidencia a los 20 a 40 minutos y la duración de la acción es corta con una midriasis residual de alrededor de 7 horas. Mediante un estudio previo, realizado para los tres observadores, se controló la instilación adecuada de dicho fármaco para mantener la dilatación el tiempo suficiente para realizar las pruebas. De esta forma se estableció que la posología utilizada debía ser de 1 gota instilada 30 minutos antes del experimento, y otra gota instilada 45 minutos después de comenzar el experimento, con el fin de estabilizar la midriasis durante dos horas hasta el final de la prueba.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 4.17a, b y c, donde se representan los valores de $\text{Log}L_u^{\text{SOA}}$ y $\text{Log}L_u^{\text{LA}}$ para los tres observadores normales, BM, IA y CR respectivamente, en función de la excentricidad. Se puede observar que ante campos de luminancia fotópica el comportamiento retiniano es diferente al que presentan los mismos observadores ante campos de luminancia mesópica. No obstante, es similar al que presentaba el sujeto con retinosis pigmentaria ante un campo de 5 cd/m², donde las curvas para $\text{Log}L_u^{\text{LA}}$ y para $\text{Log}L_u^{\text{SOA}}$ mostraban un crecimiento

progresivo hasta unirse en 12° de retina excéntrica. En estas figuras se puede observar como el $\text{Log}L_u^{\text{SOA}}$ muestra un pequeño aumento de 0 a 3°, pero en el resto de la periferia parece mantenerse más o menos estable, mientras que para $\text{Log}L_u^{\text{LA}}$ crece progresivamente hacia la periferia.

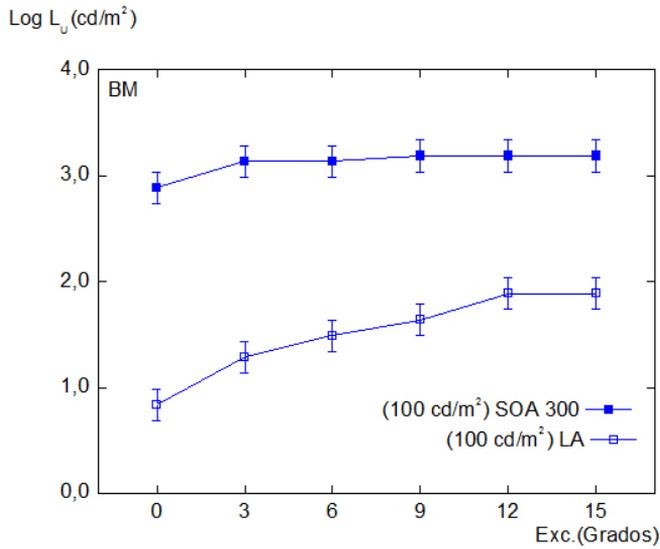


Figura 4.17a. Observador BM

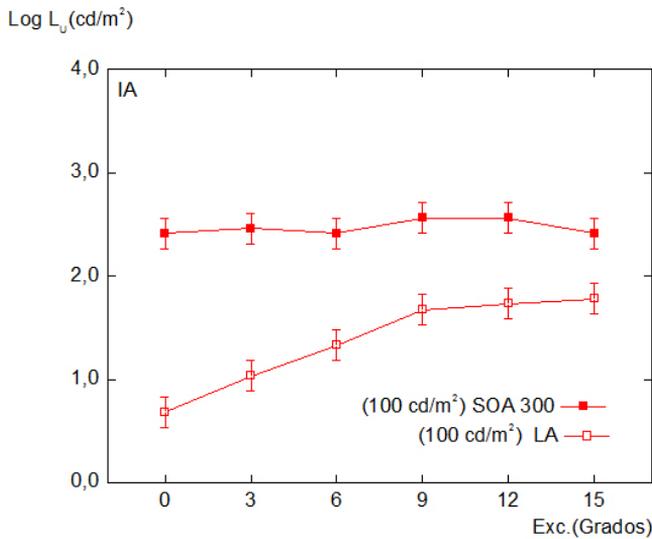


Figura 4.17b. Observador IA

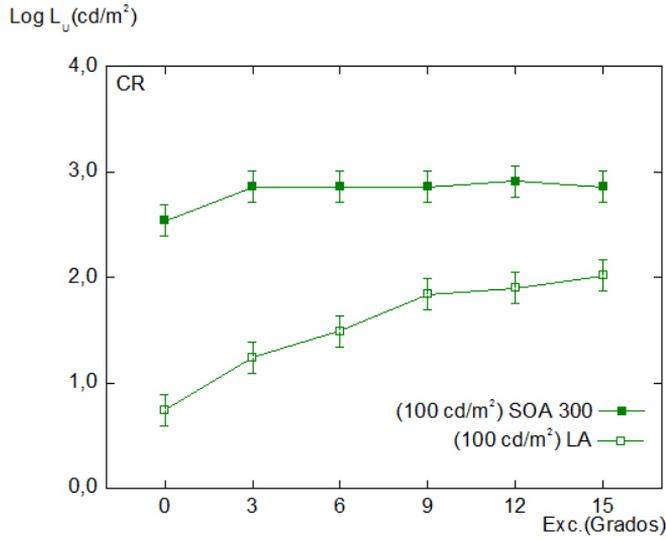


Figura 4.17c Observador CR

Figura 4.17a, b y c. En cada una de la figuras se representa el logaritmo de la luminancia umbral para la condición estable (LA) y transitoria (SOA300) para cada uno de los observadores, con un campo de adaptación de 100 cd/m².

En la figura 4.18 se representa $\text{Log } \phi$ para analizar la velocidad de adaptación ante un campo de luminancia fotópica. En este caso, $\text{Log } \phi$ presenta una tendencia progresivamente decreciente con la excentricidad, similar al comportamiento del sujeto con retinosis pigmentaria ante un campo de 5 cd/m². Estos resultados indican que si ante un campo de luminancia de 100 cd/m², los bastones están saturados y los conos predominan, presumiblemente en el sujeto con retinosis pigmentaria existe una dominancia de los conos en la periferia, confirmando de nuevo la pérdida funcional de los bastones. Se observa un valor de $\text{Log } \phi$ menor para el sujeto con retinosis pigmentaria que para los sujetos normales que puede ser debido a la menor luminancia del campo de adaptación o quizá a alguna deficiencia de funcionamiento de los conos periféricos, como ya se ha apuntado anteriormente. No obstante se puede decir que la velocidad de adaptación de los conos aumenta progresivamente con la excentricidad, al menos hasta los 15° de retina periférica para los sujetos normales con un campo de luminancia fotópico.

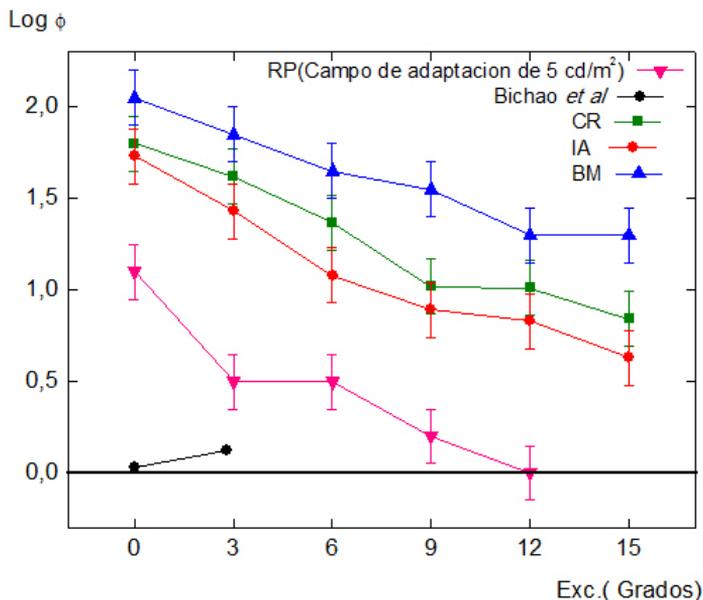
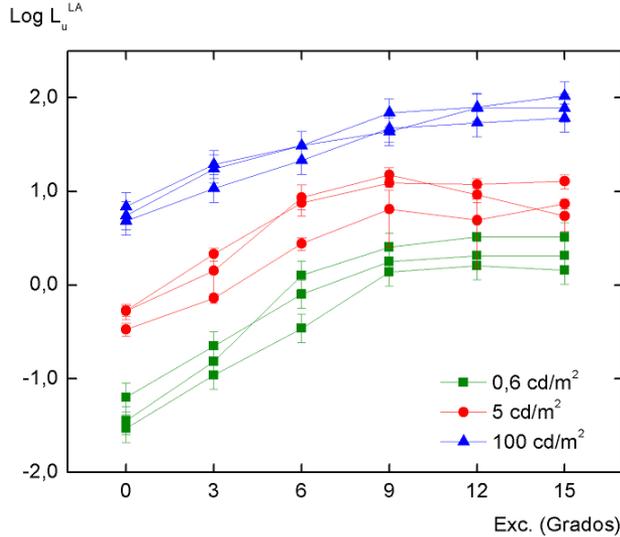


Figura 4.18 Logaritmo de ϕ ($\phi = L_u^{SOA300}/L_u^{LA}$) en función de la excentricidad, para los tres sujetos normales (CR, IA y BM) y para un campo de adaptación de 100 cd/m^2 . En la figura se han incluido los datos del sujeto con retinosis pigmentaria (RP) para 5 cd/m^2 y los resultados obtenidos por Bichao *et al* (1995). Las barras de error representa el error estadístico. Las barras de error de los datos de Bichao *et al* son de ± 0.03 para la medida foveal y de ± 0.02 para la medida a 2.8° .

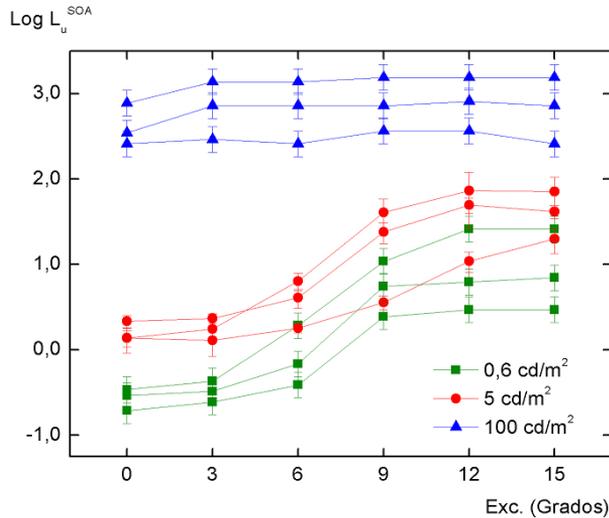
4.5.3 Comparación de la adaptación mesópica y fotópica

En la figura 4.19 se ha representado el logaritmo de la luminancia umbral para la condición estable (4.19a) y transitoria (4.19b) en función de la excentricidad, en las tres condiciones de luminancia empleadas en este trabajo, 0.6 cd/m^2 , 5 cd/m^2 y 100 cd/m^2 . En cada figura las curvas del mismo color corresponden a los tres sujetos normales. Como se puede observar, para la condición estable (Figura 4.19a) existe incremento de $\text{Log}L_u^{LA}$ con el aumento la luminancia del campo de adaptación, indicando una disminución de la sensibilidad retiniana. Por otro lado el $\text{Log}L_u^{LA}$, para todas las luminancias, aumenta con la excentricidad hasta aproximadamente los 9° , manteniéndose más o menos constante hasta los 15° .

En el caso de la condición transitoria (Figura 4.19b), el comportamiento para un campo de luminancia fotópica se muestra distinto que para el campo de luminancia mesópica. Se observa un incremento muy importante en la zona foveal y parafoveal hasta los 9°, en condiciones mesópicas y un valor de $\text{Log}L_u^{\text{SOA}}$ prácticamente constante en toda la retina en condiciones fotópicas.



4.19a Condición estable (LA)



4.19b. Condición transitoria (SOA300)

Figura 4.19a y b. Logaritmo de la luminancia umbral, para SOA 300 y para LA, en función de la excentricidad para las tres condiciones de luminancia: 0.6 cd/m² (color verde); 5 cd/m² (color rojo) y 100 cd/m² (color azul). Con el mismo color están representados los tres observadores ocularmente sanos.

4.6 Discusión y conclusiones

Velocidad de adaptación

Los resultados obtenidos en relación a la velocidad de adaptación son consistentes con los datos que obtuvieron Bodman *et al* (1991). Ellos encontraron que después de una importante pérdida de sensibilidad, causada por un repentino cambio de adaptación desde 2000 cd/m^2 a 8 cd/m^2 , la sensibilidad se recuperaba después de 500 ms, para zonas entre 5° y 20° , mientras que la fovea todavía no se había recuperado después de 900 ms. Sin embargo, en nuestro trabajo, aunque los resultados están en la misma línea, el tiempo de recuperación es más rápido. Esto puede ser debido a que en aquel experimento el campo de preadaptación fue de 2000 cd/m^2 mientras que en nuestro experimento fue de $3.5 \times 10^{-6} \text{ cd/m}^2$. Como la bibliografía clásica (Boynton 1970) ya ha demostrado, el tiempo de adaptación es mayor cuando hay un descenso de luminancia que cuando hay un incremento de la luminancia, pudiendo ser esto la causa principal de esa pequeña discrepancia en la velocidad de adaptación entre ambos experimentos.

Por otro lado, nuestros resultados sí son diferentes a los de Bichao *et al* (1995), ya que estos autores muestran que la adaptación es más rápida en fovea que en periferia (Figura 4.18). Sin embargo sus datos han sido obtenidos en condiciones diferentes, utilizando estímulos de distinta duración para las medidas foveales que para las extrafoveales, lo cual no permite compararlos de forma adecuada. Además, no son individuales sino la media de las medidas de 5 individuos, y por tanto no muestra si los comportamientos para todos los individuos son similares. Nosotros hemos calculado $\text{Log } \phi$ para estimar la velocidad de adaptación utilizado un SOA de 300 ms, mientras que Bichao *et al* utilizaron un SOA 500. Esto puede ser la explicación de que estos autores muestren en su experimento un $\text{Log } \phi$ menor, en fovea y a 2.8° , que la mostrada por nuestro experimento para las mismas zonas de la retina. En cuanto al deslumbramiento producido en fovea Bichao *et al* (1995) concluyeron que era menor que el producido en periferia igual que apunta nuestro experimento.

Los resultados de estos experimentos son avalados por los trabajos de Tyler and Hammer (1990, 1993), que realizaron una serie de estudios utilizando la frecuencia crítica de fusión de un estímulo (CFF) para comprobar la Ley de Ferry Porter en diferentes áreas de la retina, ofreciendo conclusiones relevantes para nuestro trabajo. Sus datos, obtenidos únicamente para los conos L, apuntan a que existe un aumento de la pendiente de la CFF en función de la iluminación retiniana desde la fovea hasta los 10° de retina periférica, sin embargo dicha pendiente se mantiene constante desde esos 10° hasta los 85° de excentricidad. El aumento de la pendiente nos informa de la velocidad de adaptación de los conos, indicando que para los conos a 10° y a 85° de excentricidad la velocidad de adaptación es mayor que para los conos foveales. Este aumento de la velocidad ha sido atribuido a las variaciones en el diámetro del segmento externo de los conos periféricos con respecto a los foveales (Tyler, 1985). En la figura 4.18, donde se han aislado los conos mediante la saturación de bastones, se observa como la velocidad retiniana de los conos periféricos aumenta hacia la periferia, confirmando los resultados de los trabajos citados. Además, en la misma figura, se observa que el sujeto con retinosis pigmentaria, ante un campo de luminancia mesópica, muestra también un aumento de la velocidad de adaptación a causa de la pérdida funcional de los bastones.

Sin embargo, nuestros resultados añaden nueva información, que no aportan los trabajos de Tyler y Hammer, en cuanto a la velocidad de adaptación en la zona de la retina entre 9° y 15° para luminancia mesópica. Nuestros resultados indican que en esa zona de la retina existe una disminución de la velocidad de adaptación y que esto puede ser debido a una intrusión de los bastones, que en esta zona empiezan a ser más numerosos.

Intrusión de los bastones

A la vista de estas primeras conclusiones se puede pensar que, ante luminancias mesópicas, el nivel de intrusión de los bastones podría producir una disminución de la velocidad de adaptación, algo que evidentemente no ocurre con luminancia fotópica o en el caso del sujeto con retinosis pigmentaria. Sin embargo, en cualquiera de estos casos se puede apreciar que los conos foveales no están afectados en el sujeto con retinosis

pigmentaria, ya que los valores obtenidos en fóvea son similares para todos los sujetos, incluido el sujeto con retinosis pigmentaria. En cuanto a las características fisiológicas, los bastones tienen peor resolución temporal que los conos (Tachibanky, 2007), siendo por tanto más lentos (Plainis, 2005). Este mecanismo puede influir si los bastones interfieren en la velocidad de adaptación de la retina más periférica.

Sensibilidad retiniana

Hay una parte de la retina temporal, entre los 3° y 9°, que se adapta más rápido que la fóvea, en luminancia mesópica. Sin embargo, a pesar de la rápida recuperación, la sensibilidad, en esa zona, no es alta ante la presencia del campo mesópico, pero sí lo es en fóvea, tanto para un campo estable como para un campo transitorio. La fóvea presenta, por tanto mayor sensibilidad ante un campo de adaptación mesópico que la retina periférica, y por tanto proporciona mejor información visual.

Aplicación a la conducción

Todas las situaciones planteadas en este trabajo están directamente implicadas en la tarea de la conducción nocturna. Las condiciones de luminancia mesópica utilizadas en este experimento, tanto a 0.6 cd/m² como a 5 cd/m², así como escotópicas pueden encontrarse durante la conducción nocturna. Por otro lado, las medidas están realizadas en retina periférica donde se valora la pérdida de la sensibilidad ante condiciones estables y transitorias. Como ya se sabe una situación típica de la conducción nocturna es cuando un vehículo viene de frente. Por ejemplo, un vehículo a 20 m con los faros encendidos, que crea una iluminación aproximadamente de 15 lux, pueden ocasionar una luminancia de velo de 5 cd/m² (Aslam *et al*, 2007). En este trabajo se ha valorado que para la luminancia mesópica, que puede encontrarse en una carretera de noche, la recuperación retiniana es más rápida en la retina parafoveal que en fóvea, pero sin embargo la sensibilidad disminuye. Esta situación puede afectar a la conducción, el sujeto tiene más dificultad para detectar el objeto en periferia, aunque su adaptación sea más rápida. Por otro lado, tiene gran interés saber cuál es la zona de la retina utilizada, ya que si usa la zona de la perifóvea, más allá de la 12° y 15°, tiene menor

sensibilidad y menor velocidad de adaptación. Esta última situación es especialmente relevante por ser la que más puede influir en la detección de peatones. Si bajo condiciones mesópicas la fóvea tiene mejor sensibilidad, en el caso de la conducción sería más fácil detectar un objeto en fóvea que en periferia. Sin embargo en muchas ocasiones, durante la conducción, primero se detectan los objetos periféricamente para después fijar fovealmente dicho objeto y así poder identificarlo.

Implicaciones de la retinosis pigmentaria

Los resultados obtenidos para el sujeto con retinosis pigmentaria muestran un comportamiento retiniano adecuado según lo esperado por las pruebas clínicas realizadas. Esto confirma la utilidad de este dispositivo para estudiar, desde la psicofísica, el comportamiento de retina en sujetos con patologías relacionadas con degeneraciones retinianas. Con estos resultados se ha podido confirmar la pérdida funcional de los bastones y el adecuado funcionamiento de los conos foveales. También se ha podido observar un aumento de los umbrales, tanto en condiciones escotópicas como mesópicas, con respecto a los valores de los sujetos normales. En algunos estudios recientes se ha llegado a relacionar un adelgazamiento de la retina en aquellos casos en que los umbrales de conos o bastones se ven incrementados sobre los valores normales, demostrando la utilidad de las pruebas psicofísicas como apoyo a las pruebas clínicas para estos pacientes (Apushkin, 2007). Por otro lado, los resultados obtenidos para el sujeto con retinosis pigmentaria han sido útiles para evaluar el comportamiento de los sujetos normales. El observador con retinosis pigmentaria en 9° todavía no se ha adaptado a un campo de adaptación de 5 cd/m², sin embargo sí parece haberse adaptado a 12°. Este resultado indica que para los sujetos con esta patología las zonas en las cuales cambia la velocidad de adaptación dependerá de la afectación de sus fotorreceptores.

Epílogo

Los datos obtenidos en fóvea muestran la funcionalidad únicamente de los conos y es por ello que aunque el campo de adaptación sea de 5 cd/m² se puede estar hablando de un comportamiento típicamente fotópico. Sin embargo, a la vista de

los resultados encontrados tanto en la retina parafoveal (6° a 9°) como en la periferia más alejada (12° y 15°), se muestra que los bastones están jugando un papel fundamental en el proceso de la adaptación, al menos en cuanto a velocidad de adaptación. Estos resultados muestran una visión diferente de los límites entre el rango mesópico y fotópico, donde pueden influir no sólo la luminancia del campo de adaptación, sino también la zona de la retina que es analizada. En base a nuestros resultados parecen existir tres zonas bien diferenciadas funcionalmente entre fóvea y 15° de retina temporal, una primera zona (0° a 3°) donde parece que la velocidad de adaptación es más lenta, una segunda zona (3° a 9°) donde aumenta la velocidad de adaptación y una tercera zona, (9° a 15°) donde vuelve a disminuir la velocidad de adaptación. Estas zonas tiene diferentes densidades de fotorreceptores y estos tienen distintas características anatómicas. Esto, por tanto parece indicar la relación entre la velocidad de adaptación con la densidad y las características anatómicas de dichos fotorreceptores. Sin embargo, la sensibilidad parece que no está muy relacionada con la densidad de fotorreceptores sino con las interconexiones de las células bipolares y ganglionares. Siguiendo esta línea de trabajo sería interesante analizar las interacciones entre conos y bastones en su contribución a la sensibilidad retiniana en distintas zonas de la retina y la interacción de los bastones en la resolución temporal de los conos (Zele, 2008).

Conclusiones

1. Se ha diseñado un dispositivo experimental con una resolución temporal del orden del milisegundo y una resolución espacial del orden del medio grado, que permite evaluar, de manera precisa, las evoluciones temporales del umbral de luz en distintas zonas de la retina y para muy diferentes valores de luminancia del campo de adaptación

2. La sensibilidad retiniana ante un campo de adaptación con luminancia mesópica es mayor en fóvea que en retina periférica. Sin embargo el deslumbramiento es mayor en retina periférica que en fóvea.

3. La velocidad de adaptación ante un campo con luminancia mesópica, aumenta desde la fóvea hacia los 3° ó 6° y disminuye desde los 6° ó 9° hacia la retina periférica más lejana.

4. Los límites de la visión mesópica deben ser establecidos no sólo en función de la luminancia del campo de adaptación sino también en función de la zona de la retina estimulada.

5. El paciente con retinosis pigmentaria sufre un aumento generalizado de la luminancia umbral con respecto a los sujetos normales y la velocidad de recuperación retiniana, ante un campo de 5 cd/m², es más rápida en zonas de la retina más periféricas que en los sujetos normales. Esto se puede explicar por el deterioro de los bastones dado que los sujetos normales en condiciones fotópicas, con los bastones saturados, presentan un comportamiento similar.

6. El hecho de que la velocidad de adaptación, entre 3° y 9° de la retina periférica sea menor, supone que la detección de objetos o peatones, con el contraste adecuado, sea más rápida en esa zona de la retina. Sin embargo, que la retina periférica muestre información visual más deficiente que la retina foveal supone un problema en la detección periférica de dichos objetos o peatones.

Líneas futuras

A partir del trabajo realizado en esta memoria, se plantean nuevas líneas de investigación. Una de las ventajas del dispositivo diseñado es que permite realizar investigación tanto de tipo básico como de tipo aplicado. Esta dualidad amplía las líneas futuras de trabajo.

Investigación básica

En cuanto a la investigación básica, trabajar dentro del rango mesópico implica, como ya se ha comentado, la interacción entre conos y bastones. Este tema es una línea de investigación de gran interés como demuestran los trabajos actuales. Algunas de las investigaciones realizadas al respecto indican cambios en las repuestas temporales de los conos a causa de su interacción con los bastones (Zelev, 2008). Es, por tanto, un tema enormemente relacionado con nuestro trabajo y que puede ser de gran utilidad para seguir aportando información en cuanto a la velocidad de adaptación. Sin embargo, la complejidad de su estudio conlleva lentos avances en su comprensión. Por otro lado, la zona de la retina donde se ha observado un aumento de la velocidad de adaptación puede ser evaluada más a fondo con el fin de conocer las causas exactas de este resultado. Los trabajos realizados en esta línea además podrían ser comparados con otros estudios de tipo fisiológico.

Investigación aplicada

En cuanto a la investigación de tipo aplicado que se puede llevar a cabo con el dispositivo desarrollado se pueden plantear trabajos relevantes en el ámbito clínico. Con este dispositivo se pueden realizar pruebas en sujetos susceptibles de cambios en su sensibilidad retiniana o en la velocidad de adaptación. Estos sujetos pueden ser aquellos con patologías, no sólo de polo posterior sino también de polo anterior, operados de cirugía refractiva, o incluso usuarios de lentes de contacto. A pesar de este amplio abanico de posibilidades, en base a los resultados obtenidos, el grupo proyecta

seguir midiendo los umbrales de luminancia en distintas condiciones para sujetos con retinosis pigmentaria. La gran sensibilidad del dispositivo es relevante para hacer pruebas en pacientes con posibilidades de desarrollar retinosis pigmentaria. Si se encuentran variaciones significativas de estos sujetos sobre los sujetos normales estas pueden indicar un diagnóstico precoz de la patología. Además estas diferencias serían útiles, principalmente, con la finalidad de utilizar este tipo de técnicas como método preventivo. Comparar los resultados obtenidos con el dispositivo desarrollado y descrito en esta memoria con resultados obtenidos mediante los sistemas clínicos más actuales, como el electroretinograma multifocal, sería de gran relevancia. De hecho, el grupo de trabajo está analizando esta posibilidad gracias a la colaboración de Topcon y del personal sanitario, tanto de la especialidad de oftalmología como de neurofisiología, del Hospital Universitario Río Hortega. El futuro de dichas técnicas de medida tendrían claramente una orientación clínica y permitirían ampliar las prestaciones de los dispositivos comerciales existentes.

Por otro lado, valorar estos comportamientos en personas mayores y compararlos con personas jóvenes, mediante la pérdida de sensibilidad, puede tener una gran relevancia, sobre todo si estos experimentos se aplican a la conducción nocturna.

Es evidente que las aplicaciones clínicas pueden ser muy numerosas y todas ellas importantes. El grupo de investigación seguirá en la línea en la que se ha comenzado con esta tesis, tanto en la investigación básica como en la investigación en patologías retinianas, dada la relevancia que esto puede tener en el diagnóstico clínico.

Bibliografía básica

Albert & Jakobiec's Principles & Practice of Ophthalmology, 3rd Edition. Saunders. Elsevier. Expert Consult: Online and Print. 2008.

Artigas J M, Capilla P, Felipe A, Pujol J. Óptica Fisiológica: psicofísica de la visión. Interamericana McGraw-Hill. 1995.

Chalupa L. M and Werner J. S (Editors). The visual neurosciences. Massachusetts Institute of Technology (MIT Press) Cambridge, Mass. Volume 2. 2004.

Finkelstein and Hood. Handbook of perception and human performance Vol 1. Wiley Interscience Publication. 1986.

Foley H. J and Martin M. W. Sensation & Perception. Skidmore College. Department of Psychology. Hug's Home (<http://www.skidmore.edu/~hfoley/Perc3.htm>)

Gescheider, G. A. Psychophysics: the fundamentals. Lawrence Erlbaum Associates. 1997.

Hart W. M. Visual Adaptation in Adler's Physiology of the Eye: Clinical Application. William M. Hart Editor. 1992.

Kandel E. R, Schwartz J. H, Jessell T. M. Principios de Neurociencia. 4ª Edición. McGraw-Hill. Interamericana. 2000.

Kolb H, Fernández E, Nelson R. Web Vision. The organization of the retina and visual system. John Moran Eye Center. University of Utah. Webmaster: Bryan W. Jones

Oyster C. W. The Human Eye. Structure and Function. Sinauer Associates, Inc. 1999.

Rodieck R.W. The first steps in seeing. Sinauer Associates, Inc. 1998.

Schwartz, S.H. Visual perception: A clinical orientation. McGraw-Hill. Third Edition. 2004.

Bibliografía

Abdel-Aty M. A and Radwan A. E. Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention* 32. 2000. 633-642.

Adelson, E. H. Saturation and Adpation in the rod system. *Vision Research*. 1982. 22, pp 1299-1312.

Aguilar, M. & Stiles, W.S. Saturation of rod mechanism of the retina at high levels of stimulation. *Óptica Acta*. 1954. 1, pp 59-65.

Apushkin M A, Fishman GA, Alexander KR, Shahidi M. Retinal thickness and visual thresholds measured in patients with retinitis pigmentosa. *Retina*. 2007. Mar;27 (3), pp 349-57.

Aslam T M. Haider D and Murray IJ. Principles of disability glare measurement: an ophthalmological perspective. *Acta Ophthalmologica Scandinavica* 2007. 85: 354-360

Aulhorn E. and Harms, H. "Visual perimetry," in *Handbook of Sensory Physiology*, Vol.VII/4, Visual Psychophysics, D. Jameson and L. M. Hurvich, eds. (Springer-Verlag, Berlin,1972, pp. 102-145

Baker H.D. The course of foveal light measured by the threshold intensity increment. *Journal of the Optical Society of America*. 1949. 43, 172-179.

Barlow H.B. Temporal and spatial summation in human vision at different background intensities. *Journal of Physiology*. 1958. 141. pp 337-350.

Beer R.D, Macleod D.I.A., and Miller T.P. The Extended Maxwellian View (BIGMAX): A high-intensity, high-saturation color display for clinical diagnosis and vision research *Behavior Research Methods*. 2005. 37 (3), pp 513-521

Bedell, H.E and Katz. On the necessity of correcting peripheral target luminance for pupillary area. *American Journal of Optometry and Physiological optics*. 1982. Vol 59 n° 10 pp 767-769

Bichao I. C. Yager D., Meng T, Disability glare: effects of temporal characteristics of the glare source and of the visual-field location of the test stimulus. *Journal of the Optical Society of America*. 1995. 12(10): 2252-2258

Blackwell, HR. Contrast threshold of human eye. *Journal of the Optical Society of America* 1946. 36, 624-643.

Blackwell, HR. Studies of Psychophysical Methods for Measuring Visual Thresholds. *Journal of the Optical Society of America* 1952 Volume 42, N° 9, pp 606-616

Blakemore C. B. And Rushton W. A. H.J. Dark Adaptation And Increment Threshold In A Rod Monochromat. *Journal of Physiology*. 1965, 181, pp. 612-628

Bodmann H. W, Kokoschka S., Greule R. Contrast thresholds at transient adaptation. *CIE Proc. 21st. Session, 1987, Venice Vol.1*, pp 50-53 .

Bodmann H. W, Greule R., Kokoschka S. Contrast thresholds at transient adaptation. *CIE Proc. 22nd. Session, 1991. Melbourne Vol.1*, pp 25-28.

Bootsma, S., Tahzib, N., Eggink, F., Brabander, J. and Nuijts, R. Comparison of two pupillometers in determining pupil size for refractive surgery. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 2007. 85(3):324-330.

Boynton, R.M., Bush, E., & Enoch, J. Rapid changes in foveal sensitivity resulting from direct and indirect adapting stimuli. *Journal of the Optical Society of America*. 1954. 44: 56-60.

Boynton RM, Corwin TR, Sternheim C. Visibility losses produced by flash adaptation. *Journal of Illuminating Engineering* 1970;64:259-66.

Brindley G.S. *Physiology of the retina and visual pathway*. Baltimore: Williams & Wilkins. 1970.

Bunt-Milam A H, Kalina R E, Pagon R A. Clinical-Ultrastructural Study of a Retinal Dystrophy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* . 1983. 24, pp 458-469.

Crawford, B. H.. Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli. *Proc. Roy. Soc. B*. 1947. 134: 283-302.

Charman, W.N. Vision and driving, a literature review and commentary. *Opthl. Phisio. Opt.* 1997; Vol 17, N° 5, pp 371-391

Colombo E., Comastri S., Issolio L. & Echarri R. Pupil light reflex produced by glare under mesopic adaptation.. *Journal of Light & Visual Environment*. 2007. Vol.31, No.2, pp 70-79.

Cornsweet, T.N. The staircase method in psychophysics. *American Journal of Psychology*. 1962, 75, pp 485-491.

Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE, Hendrickson AE. *J Comp Neurol*. 1990. Feb 22;292(4) pp 497-523.

Dagnelie G and Massof R. W. Foveal Cone Involvement in Retinitis Pigmentosa Progression Assessed Through Flash-on-Flash Parameters. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. January 1993. Vol. 34, No. 1 pp 231-242

Das, S. R. Foveal Increment Thresholds in Dark. *Adaptation Journal of the Optical Society of America*. 1964, Vol. 54, N° 4 pp 541-546.

Ferwerda, J. A. Fundamentals of spatial vision. In. V. Interrante (Ed.) *Applications of visual perception in computer graphics*, Course 32, SIGGRAPH. 1998. pp 1-27.

Finkelstein, M.A & Hood, D.C. Cone system saturation: More than one stage of sensitivity loss. *Vision Research*. 1981. 21, pp 319-328.

Finkelstein, M.A & Hood, D.C. Opponent-color cells can influence detection of small, brief lights. *Vision Research*. 1982. Vol. 22. pp. 89-95.

Frunkes T. E. Sekuler, M D. Barris, M. C. Reiss E. H and Chalupa L. M. Rod-cone interaction in human scotopic vision-I. Temporal analysis. *Vision Research* . 1973. Vol. 13, pp. 1269-1281.

Geisler, W.S. Evidence for the equivalent-backgrounds hypothesis in cones. *Vision Research*. 1979a, 19, pp 799-805.

Geisler, W.S. Initial-Image And Afterimage Discrimination In The Human Rod And Cone Systems. *Journal of Physiology*. 1979b, 294, pp 165-179

Goodman T, Forbes A, Walkey H, Eloholma M, Halonen L, Alferdinck J, Freiding A, Bodrogi P, Varady G, and Szalmas A. Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to night time driving and other applications. *Lighting Research Technolgy*. 2007. 39: pp 365–392.

Graham, C. H,& Margariathe, R. Area and intensity time relation in the peripheral retina. *Journal of Physiology*. 1935. 113, pp 299-305.

Graham N, Hood D. C. Modeling the dynamics of light adaptation: the merging of two traditions. *Vision Research*. 1992; 32, pp 1373-1393.

Greenstein V. C, Hood D. C, and Campbell C. J. The use of a flash-on-flash paradigm to assess sensitivity changes due to retinal disease. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 1982. 23, pp 102-112.

Greenstein V. C, Hood D. C, Siegel I. M and Carr R. E. Retinitis Pigmentosa: A Psychophysical Test of Explanations for Early Foveal Sensitivity Loss. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1984. Vol 25, N° 1, pp 118-120

Greenstein V. C, Hood D. C, and Carr R. E. Foveal sensitivity changes in retinitis pigmentosa. *Applied optics*. 1987. Vol 26, n 8, pp 1385-1389

Hayhoe MM, Benimoff NI Hood DC. The time-course of multiplicative and subtractive adaptation process. *Vision Research*. 1987. 27 pp 1981-96.

Hallett, P.E. Spatial summation. *Vision Research*. 1963. 3, pp 9-24.

Hetch S, Haig C, Chase A.M, The influence of light on subsequent dark-adaptation of the eye. *J. Gen. The Journal of General Physiology*. 1937. 20, pp 831

Higgins, K. E, White, J. M., Cades, D, Ciaccio, V & Liu, L. Effect of age on transient adaptation at low light levels. *Journal of Vision*. 2005. 5(12) pp 22.

Holopigian K, Seiple W, Greenstein V. C, Hood, D .C ,and Carr1 R. E. Local Cone and, Rod System Function in Patients with Retinitis Pigmentosa. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, March. 2001. Vol. 42, No. 3 pp 779-788

Hood D. C and Greenstein V.C. An approach to testing alternative hypotheses of changes in visual sensitivity due to retinal disease. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1982. Vol. 23, N° 1, pp 96-101

Hood D. C and Greenstein V.C. Models Of The Normal And Abnormal Rod System. *Vision Research*. 1990, Vol. 30, No. 1, pp. 51-68.

Hood D. C. and Birch D. G. Abnormalities of the retinal Cone System in Retinitis pigmentosa. *Vision Research*. 1996. Vol. 36, No. 11, pp. 1699-1709

Issolio L.A and Colombo E M. Brightness for different surround conditions: The effect of transient glare. *Perception & Psychophysics*. 2006a. 68 (4), 702-709

Issolio L. A, Barraza J. F, and Colombo E. M. Time course of brightness under transient glare condition. *Journal of the Optical Society of America*. 2006b. Vol. 23, No. 2 pp 233-238

Karn, H.W. Area and the intensity-time relation in the fovea. *Journal of General Physiology*. 1936. 14, pp 360-369.

Kawamura S,, Tachibanaki S. Rod and cone photoreceptors: Molecular basis of the difference in their physiology. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A* 150. 2008. pp 369–377

Keller,M. The relation between the critical duration and intensity in brightness discrimination. *Journal of Experimental Psychology.* 1941. 28, pp 407-418.

Lennie P, Fairchild M,D. Ganglion Cell Pathways For Rod Vision. *Vision Research.* 1994.Vol. 34, NO. 4, Pp. 477- 482,

Lovsund, P. and Hedin, A. Effects on driving performance of visual field defects. In *Vision in Vehicles.* (eds Glae, A. G. Freeman, M.H. Haslegrave, C.M., Smith, P. and Taylor, S.P) Elsevier, Amsterdam, 1986, pp 323-329

Mayeur A., Brémond R. and Bastien J.M.C. The effect of task and eccentricity of the target on detection thresholds in mesopic vision. Implications for road lighting, *Human Factors* 50. 2008. pp. 712–721

Mills S.L and Massey S.C. All Amacrine Cells Limit Scotopic Acuity in Central Macaque Retina: A Confocal Analysis of Calretinin Labeling. *The Journal Of Comparative Neurology* . 1999. 411 pp 19-34

Owsley C, Stalvey B, Wells J, Sloane ME. Older drivers and cataract: driving habits and crash risk. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 1999. 54(4) pp 203-11.

Plainis, S. and Murray, I. J. Neurophysiological interpretation of human visual reaction times: effect of contrast, spatial frequency and luminance. *Neuropsychologia.* 2000. 38, pp 1555–1564

Plainis S. and. Murray. I. J. Reaction times as an index of visual conspicuity when driving at night. *Ophthal. Physiol. Opt.* 2002. 22: 409–415.

Plainis S, Murray. I. J and Charman, W. N. The Role of Retinal Adaptation in Night Driving. *Optometry And Vision Science.* 2005. VOL. 82, NO. 8, pp. 682–688

Pokorny J, Sun V. C. W. and Smith V. C, Temporal dynamics of early light adaptation. *Journal of Vision*. 2003. 3, pp 423-431.

RACE. Visibilidad e iluminación en invierno. 2009. ([wttp://www.race.es/seguridad_vial/estudios_informes/informes/](http://www.race.es/seguridad_vial/estudios_informes/informes/)).

Riopelle, A. J, & Bevan, W, Jr. The distribution of scotopic sensitivity in human vision. *American Journal of Psychology*. 1953. 66, pp 73-80.

Ripps H. Night blindness and the retinal mechanisms of visual Adaptation. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*. 1976. vol 583.

Seiple W. H, Holopigian K, Greenstein V. C, and Hood D. C. Sites of Cone System Sensitivity Loss in Retinitis Pigmentosa. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. August 1993. Vol. 34, No. 9 pp 2638-2644

Scholtes, A. M. W. & Bouman, M. A. Psychophysical experiments on spatial summation at threshold level of the human peripheral retina. *Vision Research*. 1977. 17, pp 867-873.

Shapley R. and Enroth-Cugell C. Visual Adaptation and Retinal Gain Controls. *Prog Retinal Res*. 1984. 3, pp 263-346.

Simons, R. H. Road lighting and accidents. In: *Lightec'92*. Houldershaw Ltd, Essex. 1992, pp. 54-57.

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

Stabell B and Stabell U. absolute spectral sensitivity at different eccentricities. *Journal of the Optical Society of America*. 1981. Vol 71, n°7, July pp 836-840.

Stockman A and Sharpe L.T. Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 2006. 26, pp 225-239

Szamer R.B and Berson E.L. Retinal ultrastructure in advanced retinitis pigmentosa. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. October 1977. pp 497-962.

Tachibanaki. S, Shimauchi-Matsukawa. Y, Arinobu. D and Kawamura S. Molecular Mechanisms Characterizing Cone Photoresponses. *Photochemistry and Photobiology*, 2007, 83: 19-26

Taylor, J.F. Vision and driving. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 1987. Vol 7, N° 2 pp 187-189

Tyler C.W. Analysis of visual modulation sensitivity. II. Peripheral retina and the role of photoreceptor dimensions. *Journal of the Optical Society of America*. 1985. 2, pp 98.

Tyler C.W and Hamer R.D. Analysis of visual modulation sensitivity. IV. Validity of the Ferry-Porter law. *Journal of the Optical Society of America*. 1990. 7, pp 743-759.

Tyler C.W and Hamer R.D. Eccentricity and the Ferry-Porter law. *Journal of the Optical Society of America*. 1993. Vol. 10, No. 9, pp 2084-2087.

Urtubia, C y Garriga P. Nueva luz en Retinosis Pigmentaria: tipos de herencia y ayudas optométricas. *Gaceta Óptica*. 1999, N° 421 pp 22- 27

Wald G And Clark Ab. Visual Adaptation And Chemistry Of The Rods. *The Journal of General Physiology*. 1937. Pp 93- 105

Westheimer G. The Maxwellian View. *Vision Research*. 1966. 6, pp 669-62

Westheimer G. Spatial interaction in human cone vision. *Journal of Physiology*, 1967. 190, pp 139-154.

Wood, J.M, and Troubeck, R. Elderly drivers and simulated visual impairment. *Optometry And Vision Science*. 1995. 72, pp 115-124

Zuidema P Verschuure, H, Bouman, M. A and Koenderink J. J. Spatial and temporal summation in the human dark-adapted retina *Journal of the Optical Society of America*. 1981. Vol. 71, No. 12, pp 1472-1480

Zele A J. Cao D, and Pokorn J Rod-cone interactions and the temporal impulse response of the cone pathway. *Vision Research*. 2008. November ; 48(26) pp 2593-2598

ANEXO I

Tabla de la posición y combinación de los filtros utilizados en el dispositivo experimental. Valores de densidad real total.

DENSIDAD TOTAL	DENSIDAD NOMINAL POR FILTRO			DENSIDAD REAL POR FILTRO			DENSIDAD REAL TOTAL
	F4	F3	F5	T01	T05	T10	
0.1	1	0	0	0.1	0	0	0.1
0.2	2	0	0	0.2	0	0	0.2
0.3	3	0	0	0.3	0	0	0.3
0.4	4	0	0	0.4	0	0	0.4
0.5	5	0	0	0.53	0	0	0.53
0	1	1	0	0.1	0.53	0	0.03
0.7	2	1	0	0.2	0.53	0	0.73
0.8	3	1	0	0.3	0.53	0	0.83
0.9	4	1	0	0.4	0.53	0	0.93
1	0	2	0	0	1	0	1
1.1	1	2	0	0.1	1	0	1.1
1.2	2	2	0	0.2	1	0	1.2
1.3	3	2	0	0.3	1	0	1.3
1.4	4	2	0	0.4	1	0	1.4
1.5	0	3	0	0	1.49	0	1.49
1	1	3	0	0.1	1.49	0	1.59
1.7	2	3	0	0.2	1.49	0	1.09
1.8	3	3	0	0.3	1.49	0	1.79
1.9	4	3	0	0.4	1.49	0	1.89
2	0	4	0	0	2.03	0	2.03
2.1	1	4	0	0.1	2.03	0	2.13
2.2	2	4	0	0.2	2.03	0	2.23
2.3	3	4	0	0.3	2.03	0	2.33
2.4	3	2	1	0.3	1	1.1	2.4
2.5	4	2	1	0.4	1	1.1	2.5
2	0	3	1	0	1.49	1.1	2.59
2.7	1	3	1	0.1	1.49	1.1	2.09
2.8	2	3	1	0.2	1.49	1.1	2.79
2.9	3	3	1	0.3	1.49	1.1	2.89
3	4	3	1	0.4	1.49	1.1	2.99
3.1	5	3	1	0.53	1.49	1.1	3.12
3.2	1	4	1	0.1	2.03	1.1	3.23
3.3	2	4	1	0.2	2.03	1.1	3.33
3.4	3	4	1	0.3	2.03	1.1	3.43
3.5	4	4	1	0.4	2.03	1.1	3.53
3	2	3	2	0.2	1.49	1.91	3
3.7	3	3	2	0.3	1.49	1.91	3.7
3.8	4	3	2	0.4	1.49	1.91	3.8
3.9	2	5	1	0.2	2.57	1.1	3.87
4	1	2	3	0.1	1	2.92	4.02
4.1	2	2	3	0.2	1	2.92	4.12
4.2	3	2	3	0.3	1	2.92	4.22
4.3	4	2	3	0.4	1	2.92	4.32
4.4	0	3	3	0	1.49	2.92	4.41
4.5	1	3	3	0.1	1.49	2.92	4.51
4	2	3	3	0.2	1.49	2.92	4.01
4.7	3	3	3	0.3	1.49	2.92	4.71
4.8	4	3	3	0.4	1.49	2.92	4.81
4.9	4	5	2	0.4	2.57	1.91	4.88
5	5	5	2	0.53	2.57	1.91	5.01
5.1	1	0	4	0.1	0	4.98	5.08
5.2	2	0	4	0.2	0	4.98	5.18
5.3	3	0	4	0.3	0	4.98	5.28
5.4	4	0	4	0.4	0	4.98	5.38
5.5	0	5	3	0	2.57	2.92	5.49
5	1	5	3	0.1	2.57	2.92	5.59
5.7	2	5	3	0.2	2.57	2.92	5.09
5.8	3	5	3	0.3	2.57	2.92	5.79
5.9	4	5	3	0.4	2.57	2.92	5.89
0	5	5	3	0.53	2.57	2.92	0.02
0.1	1	2	4	0.1	1	4.98	0.08
0.2	2	2	4	0.2	1	4.98	0.18
0.3	3	2	4	0.3	1	4.98	0.28
0.4	4	2	4	0.4	1	4.98	0.38
0.5	5	2	4	0.53	1	4.98	0.51
0	1	3	4	0.1	1.49	4.98	0.57
0.7	2	3	4	0.2	1.49	4.98	0.07
0.8	3	3	4	0.3	1.49	4.98	0.77
0.9	4	3	4	0.4	1.49	4.98	0.87
7	0	4	4	0	2.03	4.98	7.01
7.1	1	4	4	0.1	2.03	4.98	7.11
7.2	2	4	4	0.2	2.03	4.98	7.21
7.3	3	4	4	0.3	2.03	4.98	7.31

ANEXO II

CONSENTIMIENTO INFORMADO

El grupo de Óptica de la Visión (GOV) del Departamento de Óptica de la Universidad de Valladolid está realizando un estudio sobre los procesos de adaptación retiniana en sujetos con retinosis pigmentaria. 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 las siguientes preguntas que por supuesto **son confidenciales**.

CUESTIONARIO

DATOS DE FILIACIÓN _____

Apellidos

Nombre

DNI

Fecha de nacimiento

Fecha

Tfno de contacto

Patología Ocular _____

Aporta informa oftalmológico actualizado SI NO

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

Sistema renal

El sistema locomotor

Sistema respiratorio

El sistema cardiovascular

Alteraciones metabólicas y endocrinas

Trastornos hematológicos

Trastornos mentales

Alteraciones del sistema

Otras. Indique cual:

nerviosos y muscular

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

Hoja de información para el participante al estudio

Titulo del trabajo:

“Efectos de un campo de adaptación estable y transitorio en función de la excentricidad para pacientes con retinosis pigmentaria”

El presente trabajo pretende determinar, de forma precisa y para distintas localizaciones retinianas, la evolución temporal de la sensibilidad retiniana antes, durante y después de una variación brusca de la luminancia a la que está adaptado un sujeto normal y un sujeto con retinosis pigmentaria. A partir de dichas medidas podremos comparar el comportamiento de los sujetos normales con aquellos con retinosis pigmentaria. Para llevar a cabo este estudio, se realizarán las medidas sobre un dispositivo experimental, actualmente operativo, que permitan valorar de forma rápida y precisa dicha sensibilidad con resolución retiniana suficiente. Este estudio permitirá profundizar en el conocimiento que tenemos sobre los mecanismos de adaptación visual que están especialmente afectados en las patologías de origen retiniano. Es relevante su aplicación a pacientes con patologías oculares para determinar, entre otras cosas, el potencial preventivo de dichas técnicas.

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Titulo del estudio:

Efectos de un campo de adaptación estable y transitorio en función de la excentricidad para pacientes con retinosis pigmentaria

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
