

DEPARTAMENTO DE ÓPTICA

DESARROLLO DE UN NUEVO MODELO DE VISIÓN DEL
COLOR BASADO EN LA FISIOLÓGÍA DEL SISTEMA
VISUAL

JUAN GÓMEZ CHOVA

UNIVERSITAT DE VALENCIA
Servei de Publicacions
2004

Aquesta Tesi Doctoral va ser presentada a València el dia 13 de Febrer de 2004 davant un tribunal format per:

- D. Enrique Hita Villaverde
- D^a. Adelina Felipe Marcet
- D. José Antonio García García
- D. Jaume Pujol Ramo
- D. Francisco Martínez Verdú

Va ser dirigida per:

D. Pascual Capilla Perea

D. José María Artigas Verde

©Copyright: Servei de Publicacions
Juan Gómez Chova

Depòsit legal:

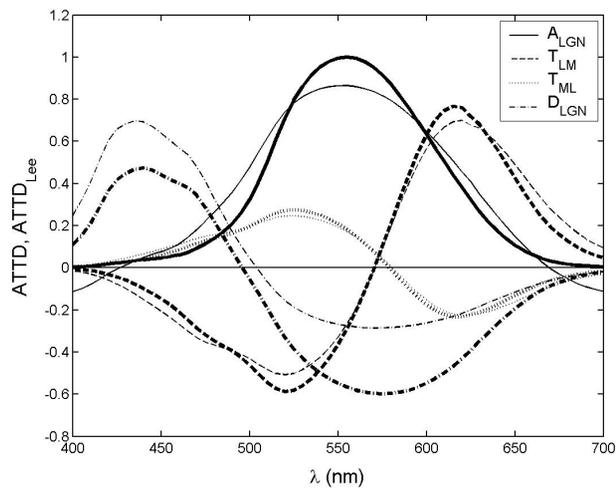
I.S.B.N.:84-370-5462-1

Edita: Universitat de València
Servei de Publicacions
C/ Artes Gráficas, 13 bajo
46010 València
Spain
Telèfon: 963864115



VNIVERSITAT D VALÈNCIA

Desarrollo de un nuevo modelo de visión del color basado en la fisiología del sistema visual



Memoria de investigación para optar al grado de Doctor en Física

Juan Gómez Chova

Burjassot, 24 de octubre de 2003

PASCUAL CAPILLA PEREA, Titular de Universidad del Departamento de Óptica de la Universitat de València, y

JOSÉ MARÍA ARTIGAS VERDE, Catedrático de Universidad del Departamento de Óptica de la Universitat de València

CERTIFICAN

que la presente memoria, DESARROLLO DE UN NUEVO MODELO DE VISIÓN DEL COLOR BASADO EN LA FISIOLÓGIA DEL SISTEMA VISUAL, ha sido realizada bajo su dirección en la Facultad de Física de la Universitat de València por JUAN GÓMEZ CHOVA, y constituye su Tesis para optar al título de Doctor en Física.

Y para que conste a los efectos oportunos, autorizan la presentación de la referida memoria.

Firmado:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Capilla', enclosed within a hand-drawn oval shape.

Pascual Capilla Perea

Firmado:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Artigas', written in a cursive style.

José María Artigas Verde

Burjassot, 24 de octubre de 2003

What is real? How do you define real?
If you're talking about your senses,
what you feel, taste, smell, or see,
then all you're talking about are
electrical signals interpreted by your
brain...

Andy & Larry Wachowski. The Matrix (1999).

A mi familia

Agradecimientos:

A Pascual y José María, por su inestimable guía a lo largo de todos estos años. A María José, por su valiosa colaboración. A Mara, Jesús y el resto de compañeros del grupo de investigación, por su agradable compañía.

La investigación realizada para la elaboración de la presente memoria ha sido parcialmente financiada por una beca de Formación de Profesorado Universitario del Ministerio de Educación y Cultura.

Índice

1. Introducción	1
2. Nociones de psicofísica	7
2.1. Descriptores perceptuales del color	7
2.2. Comportamiento de los descriptores de colores no relacionados en función de los parámetros colorimétricos	9
2.2.1. Luminosidad	9
2.2.1.1. Escala de luminosidad	9
2.2.1.2. Luminosidad espectral de igual luminancia	10
2.2.1.3. Luminosidad vs. pureza colorimétrica	13
2.2.1.4. Efecto Helmholtz-Kohlrausch. Loci de igual luminosidad	14
2.2.2. Tono	15
2.2.2.1. Variaciones del tono con la luminancia: Efecto Bezold-Brücke	15
2.2.2.2. Variaciones del tono con la pureza colorimétrica: Efecto Aubert-Abney y tonos únicos	17
2.2.3. Colorido	18
2.2.3.1. Colorido vs. longitud de onda	18
2.2.3.2. Colorido vs. pureza colorimétrica y luminancia	19
2.3. Adaptación cromática	20
2.4. Umbrales de detección y discriminación	24
2.4.1. Umbral de detección	24
2.4.2. Umbrales de discriminación	26
3. Fundamentos neurofisiológicos de la visión del color	29
3.1. Arquitectura de la percepción visual	29

3.2. Sobre la especialización funcional de los caminos hasta y más allá del córtex estriado	35
3.3. Propiedades de las células en la retina y el LGN	35
3.3.1. Evolución temporal de la respuesta de una célula. Excitación e inhibición	35
3.3.2. Índice de transitoriedad y latencias	37
3.3.3. Sensibilidad espacial del campo receptivo. Células de centro on y centro off	37
3.3.4. Respuesta del campo receptivo a un estímulo. Células tipo X y tipo Y	40
3.3.5. Células oponentes y células no oponentes. Punto neutro	40
3.3.6. Mapa de inputs	42
3.3.7. Sensibilidad al contraste espacial	42
3.4. Propiedades de las células en el córtex estriado	45
3.4.1. Células con campos receptivos centro-periferia	45
3.4.2. Células con campos receptivos rectangulares	46
3.5. Reflexiones sobre la naturaleza de los canales cromático y acromático	49
4. Teorías y modelos de la visión del color	51
4.1. La teoría tricromática, la teoría de los colores oponentes y los modelos de zonas anteriores a 1955	52
4.1.1. La teoría tricromática de Young-Helmholtz	52
4.1.2. La teoría de los colores oponentes: las ideas de Hering	53
4.1.3. Los modelos de zonas: la teoría de Müller-Judd	55
4.2. El experimento de cancelación de tono y el modelo de Hurvich y Jameson	58
4.2.1. El experimento de cancelación de tono	58
4.2.2. Sensibilidad espectral de los mecanismos oponentes	61
4.2.3. El modelo de Hurvich y Jameson	65
4.3. Modelos lineales con una transformación oponente	67
4.3.1. El modelo de Ingling y Tsou	67
4.3.2. El modelo de Guth, Massof y Benzschawel	69
4.3.3. El modelo de Boynton	70

4.4. Modelos lineales con más de una transformación oponente: el modelo de DeValois y DeValois	72
4.5. Modelos no lineales con una transformación oponente: CIELAB	78
4.6. Modelos no lineales con más de una transformación oponente	80
4.6.1. El modelo de Valberg et al.	81
4.6.2. El modelo ATD de Guth	88
4.7. Descriptores perceptuales en un modelo de zonas	88
4.8. Modelos de apariencia del color	90
5. Estructura del modelo ATTD y correlaciones con la fisiología	93
5.1. Mecanismos precorticales	94
5.1.1. Fotorreceptores	94
5.1.2. Células ganglionares y del núcleo geniculado lateral	99
5.2. Mecanismos corticales	107
5.2.1. Segunda transformación oponente	107
5.2.2. Tercera transformación oponente	111
5.2.3. Descriptores perceptuales	118
5.3. Consideraciones de carácter general	120
6. Determinación de los parámetros de ATTD	123
6.1. Procedimiento	123
6.1.1. Parámetros libres del modelo	123
6.1.2. Datos de referencia y predicciones del modelo	124
6.1.2.1. Respuestas de células del LGN	125
6.1.2.2. Canales perceptuales con adaptación blanca	126
6.1.2.3. Canales perceptuales con adaptación de color	126
6.1.2.4. Luminosidad espectral de luminancia constante	127
6.1.2.5. Estabilidad del blanco perceptual	128
6.1.3. Coeficiente de ajuste	129
6.2. Resultados	130
6.2.1. Parámetros óptimos del modelo	130

6.2.2. Predicciones óptimas del modelo	132
6.2.3. Coeficientes de ajuste mínimos	136
7. Análisis de diversos aspectos del modelo	139
7.1. Evolución de la señal en las distintas etapas del modelo	139
7.2. Estabilidad del modelo	146
7.2.1. Estabilidad de las sensibilidades espectrales	146
7.2.2. Estabilidad del blanco perceptual	147
8. Testeo del modelo	149
8.1. Espectros de acción	150
8.2. Descriptores perceptuales vs. parámetros colorimétricos	152
8.2.1. Luminosidad	152
8.2.1.1. Ley de Stevens (dependencia con Y_t)	152
8.2.1.2. Gráficas de Q vs $\log Y_b$ (Inducción Acromática)	158
8.2.1.3. Efecto Helmholtz-Kohlrausch. Curvas de nivel de luminosidad en un plano equiluminante	162
8.2.2. Tono	172
8.2.2.1. Gráficas de H vs. λ	172
8.2.2.2. Curvas de nivel de tono en un plano equiluminante. Tonos únicos. Efecto Aubert-Abney (dependencia con p_c)	173
8.2.2.3. Efecto Bezold-Brücke (dependencia con Y_t)	182
8.2.3. Colorido y saturación	184
8.2.3.1. Gráficas de M vs. p_c	184
8.2.3.2. Gráficas de M vs. λ_d	188
8.2.3.3. Curvas de nivel de colorido en un plano equiluminante	192
8.2.3.4. Gráficas de M vs. $\log Y_t$ (Efecto Hunt)	196
8.2.3.5. Gráficas de s vs. $\log Y_t$	200
8.3. Uniformidad del plano perceptual	204
8.4. Inducción cromática	214
8.4.1. Percepción de un test blanco en función de la cromaticidad del inductor	214

8.4.2. Estímulo percibido acromático con fondos de color en función de las luminancias de fondo y test	219
8.5. Umbrales de detección y discriminación	225
9. Conclusiones	233
10. Perspectivas	237
Apéndice A. El modelo de visión del color ATD95	241
Apéndice B. El modelo de apariencia del color de Hunt	247
Apéndice C. Definiciones de términos de color	255
Bibliografía	261

Capítulo 1. Introducción

Uno de los experimentos más importantes llevados a cabo en el campo de la visión del color es aquél en el que Sir Isaac Newton descompuso, con ayuda de un prisma, la luz solar en sus distintas longitudes de onda, en 1666. Desde entonces y durante mucho tiempo se le atribuyó al color una base puramente física, haciéndose una asociación biunívoca entre el color de un objeto y la composición de longitudes de onda emitidas por el mismo.

Poco a poco, sin embargo, se le fue atribuyendo a la retina (y más tarde al cerebro) una mayor importancia en la determinación del color de los objetos. Thomas Young propuso en 1802, en una conferencia ante la Royal Society en Londres, que la visión del color se derivaba de la estimulación relativa de tres tipos de receptores de la retina, rojo, amarillo y azul, que respondían a distintas longitudes de onda; es la llamada teoría tricromática. Esta idea de Young fue ignorada durante años, hasta que Maxwell demostró, por medio de experiencias con discos giratorios, que se podía reproducir un gran número de colores mediante mezclas aditivas de tan sólo tres primarios en diferentes proporciones (1859).

Herrmann Von Helmholtz, fundador de la disciplina de la psicofísica, rechazó inicialmente la teoría de Young porque no conseguía obtener todos los colores espectrales a partir de mezclas tricromáticas. Más tarde, sin embargo, se dio cuenta de que este hecho podía explicarse con tres receptores de sensibilidades espectrales anchas y solapadas entre sí, pero con respuesta máxima en tres longitudes de onda distintas. El científico alemán se dedicó entonces a desarrollar las ideas de Young, dando lugar a lo que se conoce como la teoría tricromática de Young-Helmholtz (1852).

En una línea de trabajo enfrentada a la anterior, Ewald Hering propuso que la visión del color se debía a unos mecanismos rojo-verde y azul-amarillo que daban respuesta de distinto signo en función de la longitud de onda que los estimulara, siendo antagonistas los dos primarios de cada mecanismo. Combinados con unos primarios blanco y negro, estos mecanismos permitían comprender una serie de fenómenos que la teoría tricromática era incapaz de explicar. Las ideas de Hering se conocen como teoría oponente de la visión del color (1878).

Donders propuso en 1881 su teoría de zonas, en la que combinaba las ideas de Young-Helmholtz y de Hering. Esta teoría consistía en suponer que el sistema visual tenía una primera fase de tipo tricromático y una fase posterior de tipo oponente, y permitía explicar satisfactoriamente una gran cantidad de fenómenos experimentales. La teoría de Müller (1930) también seguía esta línea. Con el paso de los años esta propuesta fue adquiriendo mayor importancia, y surgieron una serie de modelos de zonas con la siguiente estructura: a nivel de los fotorreceptores la visión es tricromática y mediada por tres tipos de conos, cuyas respuestas son transformadas por la compleja red neuronal de la retina de forma que a nivel de las células ganglionares la información sobre el color está codificada en dos canales oponentes (rojo-verde y azul-amarillo) y un canal acromático. Dorothea Jameson y Leo M. Hurvich realizaron en 1955 un experimento psicofísico de cancelación del tono a partir de cuyos resultados se pudieron derivar las sensibilidades espectrales de los dos canales perceptuales oponentes.

En la década de los sesenta hubo una serie de descubrimientos que confirmaron la validez de los modelos de zonas. Por una parte, los avances técnicos en fotoquímica permitieron que Brown y Wald confirmaran en 1964 (un siglo después de que Helmholtz propusiera su teoría tricromática) la existencia de tres tipos de fotopigmentos en los conos de la retina. Y por otro lado, DeValois, Abramov y Jacobs demostraron en 1966 que en el núcleo geniculado lateral (LGN) del mono había neuronas que mostraban oponencia cromática. Con el paso del tiempo fueron apareciendo una serie de modelos con la misma estructura del de Hurvich y Jameson, y que

incorporaban a su fase tricromática los nuevos hallazgos sobre la forma de las curvas de absorción de los conos. Ejemplos de éstos son el modelo de Ingling y Tsou (1977), el de Guth, Massof y Benzschawel (1980) y el de Boynton (1986).

A medida que se realizaban nuevos descubrimientos en el campo de la neurofisiología, se fue haciendo patente que las sensibilidades espectrales de las células del LGN no coincidían con los canales psicofísicos de Jameson y Hurvich, lo cual ha motivado que algunos investigadores, como por ejemplo DeValois y DeValois en 1993, se hayan planteado la necesidad de añadir a sus modelos una segunda etapa oponente que tenga en cuenta la transformación entre el LGN y la percepción final del color, localizada al parecer en una fase posterior del proceso visual, en el córtex. Asimismo, la existencia de más de dos tipos de células oponentes en el LGN ha originado la aparición de modelos con más de dos canales oponentes, y el hallazgo de que las respuestas de algunas células no tienen un comportamiento lineal ha inducido a algunos autores a introducir operaciones no lineales en sus modelos. Estos nuevos modelos con estructuras cada vez más complejas, como el de Valberg y colaboradores (1986) o el de Guth (1991), han conseguido explicar satisfactoriamente un número creciente de fenómenos psicofísicos de diversa índole.

Existen también los llamados modelos de apariencia del color, más complejos aún que los anteriores. Aunque algunas de sus etapas tienen cierta inspiración fisiológica, la mayoría de ellas no pretenden reproducir el funcionamiento real del sistema visual, sino conseguir mejores predicciones de los distintos fenómenos psicofísicos, y por tanto no se les puede considerar modelos de visión del color. Uno de los modelos de apariencia más completos y utilizados es el propuesto por Robert W.G. Hunt en 1991.

A pesar de los continuos avances en el campo de los modelos de visión del color, todavía queda mucho trabajo por hacer hasta conseguir un modelo que consiga explicar todos los fenómenos estudiados en psicofísica. Es tal la complejidad del problema que todavía no se ha logrado explicar satisfactoriamente ni tan siquiera la

percepción de estímulos de color uniforme colocados sobre fondos de un color diferente. Día tras día van apareciendo nuevas bases de datos psicofísicos y se van conociendo nuevos descubrimientos acerca de la fisiología del sistema visual, y las últimas etapas del proceso de la percepción son aún un enigma.

Por tanto, el objetivo de esta memoria consistirá en proponer y analizar un nuevo modelo de visión del color, combinando algunas ideas de otros autores con contribuciones originales en varios aspectos, con la finalidad de reproducir lo más fielmente posible un conjunto básico de datos psicofísicos, intentando al mismo tiempo aproximarse al verdadero funcionamiento del sistema visual en cada una de las etapas de procesado de la información. Su estructura presenta elementos inspirados en los modelos de Guth, de DeValois y DeValois y de Valberg et al., entre otros. Además de las transformaciones lineales, hemos incluido mecanismos multiplicativos y sustractivos de adaptación cromática, así como no linealidades de tipo Naka-Rushton.

El punto de partida del modelo son los valores triestímulo XYZ del test cuya sensación se quiere estimar y el fondo sobre el que se observa. Consta, a grandes rasgos, de una etapa tricromática y tres etapas oponentes: una precortical asociada a las células ganglionares y del núcleo geniculado lateral, otra en el córtex estriado y una tercera en niveles superiores del córtex visual. Las respuestas de la etapa tricromática se recombinan generando un canal acromático Magno (llamado A) y tres canales oponentes Parvo, de los cuales dos son del tipo rojo-verde (llamados T, de “tritanópicos”) asimétricos entre sí y el tercero es del tipo azul-amarillo (llamado D, de “deuteranópico”). Esta característica es la que ha dado nombre a nuestro modelo, al que llamaremos ATTD. Los tres canales oponentes Parvo citados darán lugar a la construcción a nivel cortical de los canales perceptuales acromático, rojo-verde y azul-amarillo, a partir de los cuales se pueden obtener los descriptores perceptuales del test: luminosidad, tono, colorido y saturación.

La explicación detallada de las etapas de ATTD y de las correlaciones entre cada etapa y la fisiología conocida del sistema

visual se incluye en el capítulo 5 de la presente memoria. Previamente se hará un repaso de los fenómenos psicofísicos relacionados con la visión del color (capítulo 2), de la fisiología del sistema visual humano (capítulo 3) y de las teorías y modelos de visión del color de mayor relevancia (capítulo 4).

Una vez determinada la estructura del modelo, habrá que especificar cuál es el valor más adecuado de cada uno de sus parámetros. Para ello definiremos un coeficiente que exprese el grado de divergencia entre una base de datos experimentales neurofisiológicas y psicofísicas y las predicciones de ATTD de dichos datos para unos valores cualesquiera de los parámetros. Trabajando con la implementación del modelo en entorno MATLAB, trataremos de minimizar este coeficiente de ajuste, escogiendo los valores numéricos de los parámetros asociados al coeficiente más bajo. Esta fase de entrenamiento del modelo se describe en el capítulo 6.

En el capítulo 7 realizaremos un análisis de diversos aspectos básicos del funcionamiento de ATTD, estudiando paso a paso la evolución de la señal introducida a lo largo de las distintas etapas y analizando la estabilidad del modelo con las variaciones de energía. En el capítulo 8 se estimarán las prestaciones de ATTD comparando sus predicciones con las del modelo de visión del color ATD95 de Guth, con las del modelo de apariencia del color de Hunt y con diversas colecciones de datos experimentales no incluidas en el conjunto de entrenamiento. Se analizarán los espectros de acción, el comportamiento de los descriptores perceptuales en función de los distintos parámetros colorimétricos, la uniformidad del plano perceptual, los fenómenos de inducción cromática y las sensibilidades espectrales determinadas mediante umbrales de detección y discriminación.

Por último, en el capítulo 9 se resumirán las conclusiones del estudio y en el capítulo 10 se expondrán las perspectivas de futuro en la presente línea de investigación.

Capítulo 2. Nociones de psicofísica

Empezaremos el presente capítulo definiendo los distintos descriptores perceptuales de colores relacionados y no relacionados. A continuación procederemos a analizar el conjunto de fenómenos psicofísicos que todo buen modelo de visión de colores no relacionados debería ser capaz de predecir, describiendo las relaciones entre descriptores y parámetros colorimétricos y los fenómenos de adaptación cromática.

2.1. Descriptores perceptuales del color

El objeto de cualquier modelo de visión del color es cuantificar la apariencia del color. Cabe pues comenzar planteándonos cuál es la mejor manera de describir completamente el color percibido. Una descripción elemental de un color aislado (o según la terminología de Hunt [Hunt (1977)], color no relacionado) pasa por asignar al mismo una luminosidad (esto es, sensación luminosa), un tono (es decir: el color es rojo, o verde, o azul...) y una saturación (dícese de la mayor o menor sensación cromática juzgada respecto a un blanco perfecto de la misma luminosidad). Utilizamos una letra Q para referirnos a la luminosidad, una H para el tono y una s para la saturación. Físicamente, un estímulo luminoso está descrito por un conjunto de parámetros colorimétricos, a saber, la luminancia, la longitud de onda dominante y la pureza colorimétrica. En primer orden, cada uno de los descriptores perceptuales está relacionado con uno de estos parámetros colorimétricos: la luminosidad con la luminancia, el tono con la longitud de onda dominante y la saturación con la pureza colorimétrica. Como veremos en el próximo apartado, éstas son en realidad las dependencias de primer orden, ya que cada descriptor perceptual está relacionado en mayor o menor medida con cualquiera de los parámetros colorimétricos.

Actualmente se distingue entre los conceptos de colorido y saturación: se entiende por colorido (M) un juicio de la sensación cromática que produce el estímulo en términos absolutos. La necesidad de esta distinción se debe a que el juicio absoluto de la sensación cromática depende en gran medida de la luminancia; por consiguiente, un estímulo con mayor pureza colorimétrica que otro, de la misma longitud de onda dominante, no tendría necesariamente mayor colorido, a menos que los dos estímulos tuvieran la misma luminancia. La definición de saturación propuesta es un intento de que el juicio del colorido sea independiente de la luminosidad del objeto. De los cuatro descriptores propuestos, tres son suficientes para especificar la apariencia de un color aislado, ya que se puede considerar como una buena aproximación el expresar la saturación como cociente del colorido y la luminosidad. Por último, es importante hacer notar que el concepto de colorido aquí introducido corresponde a lo que tradicionalmente se ha llamado saturación; en la presente memoria utilizaremos las definiciones modernas de ambos descriptores, sacadas del vocabulario de la CIE sobre términos colorimétricos [CIE (1987)] (para más detalles, ver apéndice C).

Los descriptores perceptuales que hemos discutido hasta el momento no son suficientes para caracterizar la apariencia de un color que forma parte de una escena (o color relacionado, según la terminología de Hunt). La luminosidad de un objeto en un entorno está determinada por su propia luminancia y por las luminancias de todos los elementos de dicho entorno. Obviamente, la luminancia depende de la reflectancia (o factor de luminancia) y de la iluminación. Por consiguiente, la luminosidad no es una propiedad del objeto. Si queremos una característica que sea intrínseca del objeto y que no dependa del entorno ni de la iluminación, lo que debemos hacer es un juicio perceptual de su reflectancia, al que se denomina claridad (J). Para hacer este juicio hay que comparar la luminosidad del objeto respecto de la de una referencia de apariencia blanca que forma parte de la misma escena. Un razonamiento similar se puede hacer para el colorido del objeto, ya que éste también depende del entorno y la iluminación. En este caso, el descriptor perceptual intrínseco del objeto se denomina croma (C). Para hacer el juicio del croma, hay que estimar el colorido del objeto en relación con una referencia de la

misma escena, igual que con la claridad. La definición de croma propuesta es un intento de que el juicio del colorido sea independiente del nivel de iluminación. Los descriptores de la saturación y el tono para colores relacionados tienen el mismo significado que se estableció para colores no relacionados. En definitiva, son seis los descriptores propuestos, de los cuales cuatro son suficientes para caracterizar la apariencia de un color relacionado, si admitimos que el croma es igual al colorido dividido por la luminosidad del blanco de referencia.

2.2. Comportamiento de los descriptores de colores no relacionados en función de los parámetros colorimétricos

2.2.1. Luminosidad

2.2.1.1. Escala de luminosidad

Para determinar la relación entre luminosidad y luminancia se construye lo que se conoce con el nombre de escala de luminosidad, es decir, una ordenación de objetos por luminosidad creciente. En la bibliografía se pueden encontrar referencias a escalas obtenidas para diferentes condiciones de observación [Stevens y Stevens (1960), Aiba y Stevens (1964), Stevens y Diamond (1965), Jameson y Hurvich (1964), Bartleson y Breneman (1967), Jameson (1970)]. Una de estas escalas es la obtenida por Bodmann et al. [Bodmann et al. (1980)], que se muestra en la figura 2.1. Estas medidas de la luminosidad de un estímulo colocado sobre un fondo se realizaron de dos modos distintos: con un fondo oscuro y con un fondo de luminancia 300 cd/m², bajo condiciones específicas de observación. En ambos casos el test subtendía un ángulo de 2° y el fondo 180°, siendo tanto el test como el fondo acromáticos. Como se puede observar, la relación entre luminancia y luminosidad no es lineal en ninguno de los dos casos. Dicha relación sigue la forma general de la Ley de Stevens [Stevens (1975)]:

$$\varphi(x) = bx^p \quad (2.1)$$

donde x es una magnitud física y $\varphi(x)$ es la magnitud del atributo perceptual correspondiente. En este caso particular la ley se puede expresar como:

$$Q = aY^p - Q_0 \quad (2.2)$$

donde Y hace referencia al valor de la luminancia del test y Q es la luminosidad. El parámetro p tiene un valor aproximado de $1/3$. Para el caso de fondo nulo, p representa la pendiente de la recta que se obtiene en una gráfica log-log. Los valores de Q_0 dependerán de las condiciones de observación [Bodmann et al. (1980)] y se pueden interpretar como la corrección de la respuesta, causada por un proceso neural de inducción, cuando el test se ve sobre un fondo de luminancia no nula.

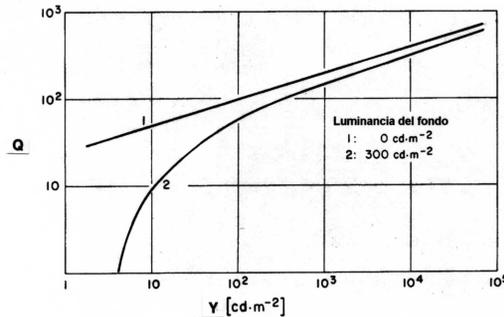


Figura 2.1. Escala de luminosidad obtenida para dos valores diferentes de la luminancia del fondo [Bodmann et al. (1980)].

2.2.1.2. Luminosidad espectral de igual luminancia

La curva de sensibilidad espectral, curva de visibilidad o curva de eficiencia luminosa relativa es la inversa de la energía necesaria para conseguir una igualación de luminosidades entre un blanco fijo de referencia y un estímulo monocromático, en función de la longitud de onda. Se representa mediante el símbolo $V(\lambda)$. Su determinación es importante porque indica qué energía debe tener un estímulo monocromático para poder obtener una determinada sensación de luminosidad.

Esta curva se puede determinar mediante muy diversos procedimientos de medida [Artigas et al. (1995), Wyszecki y Stiles (1982) p. 392], tales como: comparación heterocromática directa con una referencia fija (blanca o monocromática), paso a paso, mínimo parpadeo o fotometría de parpadeo, mínimo borde distinguible, método del umbral absoluto, agudeza visual, frecuencia crítica de fusión, etc. La tarea a realizar consiste en hacer una igualación de luminosidades. Los resultados obtenidos no son los mismos en cada caso, ya que llevan asociados distintos criterios de igualación. En la figura 2.2 se representan las $V(\lambda)$ obtenidas por Wagner y Boynton [Wagner y Boynton (1972)] siguiendo cuatro de los procedimientos citados anteriormente. Dichos resultados también dependen en gran parte de las condiciones de observación en las que se haya medido la curva. En la figura 2.3 se muestran $V(\lambda)$ obtenidas por comparación directa [Wagner y Boynton (1972), Bedford y Wyszecki (1958), Comerford y Kaiser (1975), Guth y Lodge (1973), Kinney (1964), Sperling (1958), Sperling y Lewis (1959)] con diferentes tamaños de test, diferentes referencias, etc.

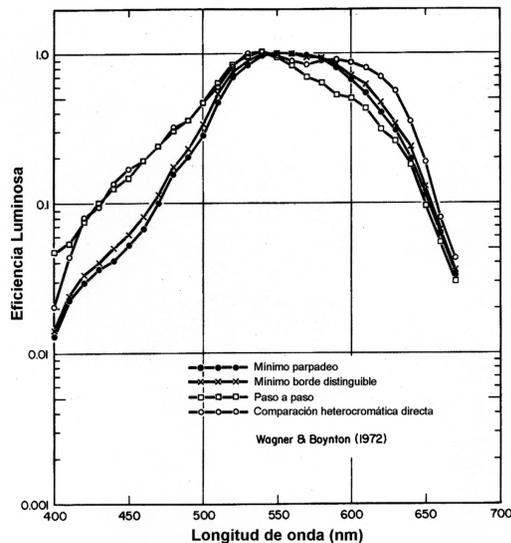


Figura 2.2. Curva de visibilidad espectral relativa obtenida por Wagner y Boynton [Wagner y Boynton (1972)] en cuatro observadores con diferentes criterios de igualación.

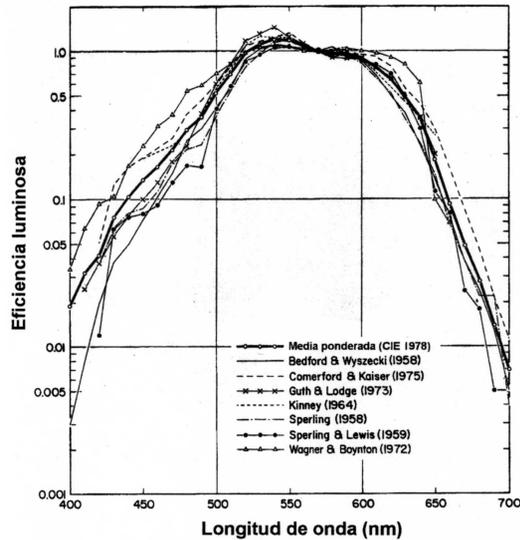


Figura 2.3. Curva de visibilidad espectral relativa obtenida por varios autores mediante el método de comparación heterocromática directa, con distintas condiciones de observación [Wyszecki y Stiles (1982)].

Consideremos el siguiente experimento: en la mitad de un test bipartito se coloca un blanco de referencia y en el otro lado un color espectral cualquiera, comprobando que sean de igual luminancia con ayuda de un fotómetro. En principio se podría pensar que ambos colores, al tener la misma luminancia, deberían tener también la misma luminosidad, pero no es esto lo que se observa. El valor de la luminancia del blanco necesaria para igualar las luminosidades nos da una estimación de la luminosidad del estímulo monocromático. Este proceso se repite para los distintos estímulos espectrales, obteniendo así la curva de luminosidad en función de la longitud de onda a luminancia constante. Dicha curva no es, en realidad, más que el cociente entre la función de sensibilidad espectral $V_{cd}(\lambda)$ medida por comparación directa y la $V_{fp}(\lambda)$ obtenida por fotometría de parpadeo, que coincide con el Observador Patrón CIE-1924 incluyendo la modificación de Judd [Judd (1951)]:

$$Q(\lambda) = \frac{V_{cd}(\lambda)}{V_{fp}(\lambda)} \quad (2.3)$$

Representando este cociente se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 2.4. El único caso en el que igual luminancia implica aproximadamente igual luminosidad es para una longitud de onda de 570 nm. También se pueden observar en la gráfica máximos locales en los extremos azul y rojo, alcanzando para el azul los valores más altos. Esto significa que, a igual luminancia, un azul espectral se percibe más luminoso que un rojo, y éste a su vez más luminoso que un verde o un amarillo. También se aprecian dos mínimos locales en ambos extremos del espectro. Esta variación de la luminosidad con la longitud de onda, para estímulos de igual luminancia, se denomina efecto Helmholtz-Kohlrausch espectral [Sanders y Wyszecki (1964)].

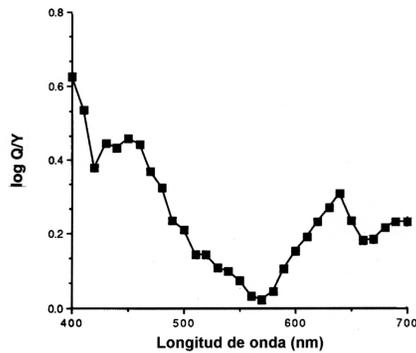


Figura 2.4. Logaritmo del cociente entre luminosidad y luminancia, obtenido a partir de la curva de sensibilidad espectral medida por comparación directa [C.I.E. TC 1-4 Publ. 41 (1978)] y el Observador Patrón modificado por Judd [Judd (1951)].

2.2.1.3. Luminosidad vs. pureza colorimétrica

En el experimento de Burns y colaboradores [Burns et al. (1982)] se realizó, para un conjunto de tests de pureza colorimétrica creciente, una igualación con un blanco de referencia por comparación directa (Q) y por fotometría de parpadeo (Y). Las gráficas de la figura 2.5 muestran el valor del cociente Q/Y, que puede interpretarse como luminosidad a luminancia constante. De las curvas puede deducirse que, como ya es sabido, a igual luminancia los rojos y azules son más luminosos que los verdes y amarillos, ya que presentan mayores valores de Q/Y. También se observa que la luminosidad aumenta con

la pureza colorimétrica, aunque no de forma lineal, ni del mismo modo para las distintas longitudes de onda dominantes. Los fenómenos de subaditividad y superaditividad de luminosidades corresponden a valores de Q/Y inferiores y superiores, respectivamente, a los predichos por la ley de Abney (rectas discontinuas).

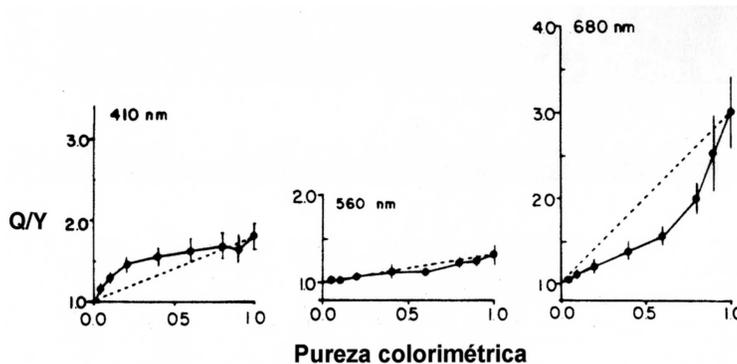


Figura 2.5. Valor del cociente Q/Y en función de la pureza colorimétrica, para tres longitudes de onda dominantes, medido por Burns y colaboradores [Burns et al. (1982)]. Las rectas discontinuas muestran las predicciones para un comportamiento aditivo de las luminosidades.

2.2.1.4. Efecto Helmholtz-Kohlrausch. Loci de igual luminosidad

Anteriormente se ha estudiado el efecto Helmholtz-Kohlrausch espectral, o curva de luminosidad espectral a luminancia constante. Este mismo efecto aparece también con colores no espectrales [Sanders y Wyszecki (1964), Burns et al. (1982)]. Cuando se iguala, mediante el método de comparación directa, la luminosidad de un estímulo de referencia blanco y la de un estímulo de distribución espectral ancha cualquiera, la luminancia de este último es menor y depende de su cromaticidad, de manera que cuanto más desaturado es el estímulo, más parecidas son ambas luminancias.

En el experimento de Sanders y Wyszecki [Sanders y Wyszecki (1964)] al observador se le presentaba un campo bipartito de 10° con un blanco de referencia de luminancia Q variable y un test de luminancia Y constante de 20 cd/m^2 . La cantidad Q es una medida de

la luminosidad del test. El observador debía igualar en cada caso las luminosidades de ambas mitades. En la figura 2.6 se representan las curvas que unen los puntos de igual valor del cociente Q/Y , esto es, los loci de luminosidad constante con luminancia de 20 cd/m^2 .

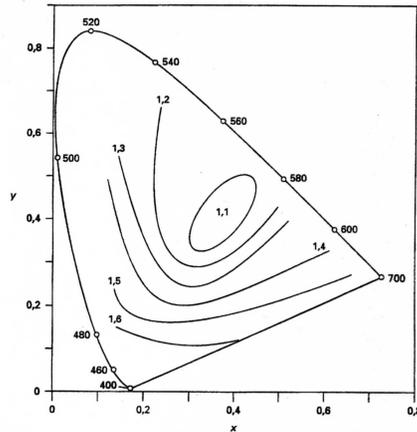


Figura 2.6. Resultados de Sanders y Wyszecki [Sanders y Wyszecki (1964)] en relación con el efecto Helmholtz-Kohlrausch. Las curvas representan los loci de luminosidad constante en un diagrama de cromaticidad de luminancia 20 cd/m^2 .

Podría pensarse que el efecto Helmholtz-Kohlrausch no espectral se justifica con el mismo argumento que el espectral, esto es, que la sensibilidad espectral del fotómetro (Observador Patrón) no es la misma que la sensibilidad espectral para la tarea de comparación directa que se realiza en el experimento. Sin embargo, aun haciendo uso de un fotómetro cuya sensibilidad espectral fuera la de comparación directa, seguiría habiendo efecto Helmholtz-Kohlrausch no espectral debido al no cumplimiento de la ley de Abney.

2.2.2. Tono

2.2.2.1. Variaciones del tono con la luminancia: Efecto Bezold-Brücke

Considérese el siguiente experimento [Purdy (1931a)]: en un campo bipartito se dispone de un estímulo monocromático de una longitud de onda conocida, con una iluminación retiniana de 100

trolands. En la otra parte del campo bipartito se coloca la misma longitud de onda pero con 1000 td. A pesar de tener la misma longitud de onda, no se perciben con el mismo tono. Para conocer la diferencia de tono se varía la longitud de onda de iluminación retiniana 100 td hasta conseguir una igualación en el tono percibido. Los resultados obtenidos se representan en la figura 2.7. En ella se observa que para los colores percibidos a 1000 td los violetas, verde-azulados y azules se desplazan hacia el azul, y los verdes y rojos se desplazan hacia el amarillo, respecto de la muestra de 100 td. Existen tres puntos singulares, de longitudes de onda de 474, 506 y 571 nm, en los cuales el tono es invariante al modificar la luminancia. Estos puntos se conocen como tonos únicos.

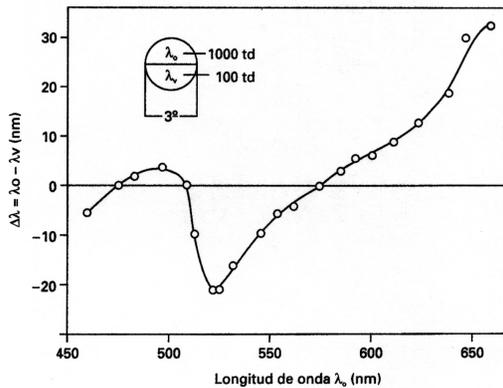


Figura 2.7. Resultados obtenidos por Purdy [Purdy (1931a)] en relación con el efecto Bezold-Brücke: cambio aparente de tono asociado a una luminancia (λ_0 : longitud de onda del estímulo cuasimonocromático de iluminación retiniana 1000 td; λ_v : longitud de onda del estímulo de iluminación retiniana 100 td). $\Delta\lambda$ evalúa el desplazamiento necesario para igualar el tono de ambos estímulos para cada λ_0 .

Un efecto similar también es observable cuando se comparan los tonos percibidos al reducir sensiblemente, en vez de la luminancia, otros factores como el tiempo de exposición [Nagy (1980)], o el tamaño del test [Wildt y Bouman (1968)], lo que indica la participación de algún mecanismo fisiológico singular en la detección de estímulos breves y/o pequeños [Artigas et al. (1995)].

2.2.2.2. Variaciones del tono con la pureza colorimétrica: Efecto Aubert-Abney y tonos únicos

Los loci de tono constante en un diagrama xy no son, como cabría esperar, líneas rectas que van desde el blanco al espectro; esto es, no coinciden con los loci de longitud de onda dominante constante. Aubert [Aubert (1865)] y Abney [Abney (1910)], observaron por separado que si se añadía luz blanca a una radiación monocromática o un estímulo púrpura, el estímulo cromático se desaturaba y además sufría un cambio de tono. En la figura 2.8 se muestran los resultados obtenidos por Newhall, Nickerson y Judd [Newhall et al. (1943)] iluminando muestras Munsell con dos factores de luminancia distintos. Se puede observar que las líneas de tono constante están ligeramente curvadas. Solamente existen dos direcciones para las cuales este hecho no se produce: las que se obtienen al unir el punto del iluminante C con el punto de longitud de onda de 572 nm y con el púrpura de coordenadas $x=0.240$, $y=0.035$, cuya longitud de onda complementaria es 559 nm. Estas dos direcciones dividen el diagrama cromático en dos regiones caracterizadas por distintas curvaturas de los loci de tono constante. La diferente curvatura obtenida para cada factor de luminancia representa el cambio de tono por efecto Bezold-Brücke, dado que una variación en el factor de luminancia es en definitiva un cambio en la luminancia si todas las muestras se observan con el mismo iluminante y la misma iluminación.

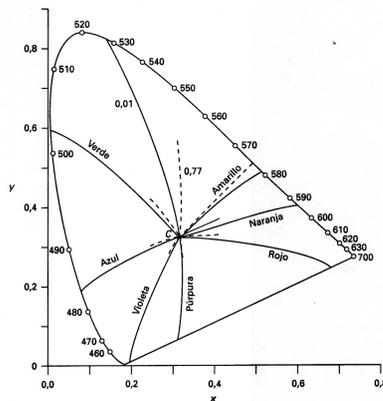


Figura 2.8. Resultados obtenidos por Newhall, Nickerson y Judd [Newhall et al. (1943)] al iluminar las muestras Munsell de igual tono con iluminante C, a dos niveles de luminancia (factor de luminancia 0.01 para las líneas continuas y 0.77 para las discontinuas).

También se dispone de datos experimentales sobre el efecto Aubert-Abney gracias a Burns y colaboradores [Burns et al. (1984)], que incluyen entre los distintos tonos constantes determinados los cuatro tonos únicos. Según sus conclusiones, en el diagrama cromático xy el locus del azul único aparece curvado de manera similar a los loci de tono constante de las regiones cercanas. El locus del amarillo único es recto y colineal con el azul único, presentando en general todos los loci de la zona de los amarillos escasa curvatura. También los loci de verdes constantes y del verde único son bastante rectos, al contrario de lo que establecen las conclusiones de Newhall et al.. El locus del rojo único es recto y está rodeado por loci de tono constante curvados en direcciones opuestas. Además, el rojo único no es colineal con el verde único, sino que se quiebran en el blanco. El rojo único de $p_c=1$ está localizado en la recta de los púrpuras, muy cerca del extremo rojo del locus espectral. Todas estas conclusiones se ven reflejadas en la figura 2.9.

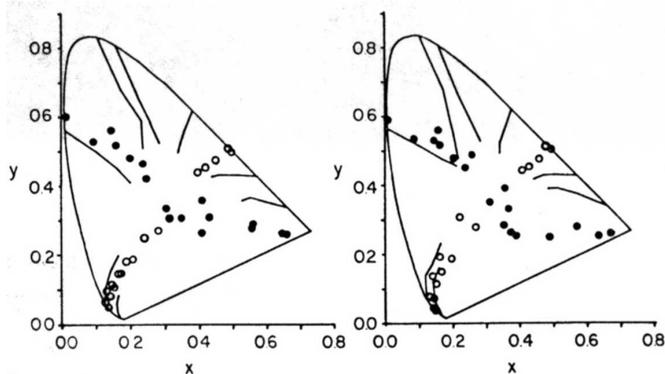


Figura 2.9. Resultados experimentales de tonos constantes (líneas), tonos únicos azul y amarillo (círculos blancos) y tonos únicos rojo y verde (círculos negros) obtenidos para dos observadores por Burns et al..

2.2.3. Colorido

2.2.3.1. Colorido vs. longitud de onda

A pesar de tener la misma pureza colorimétrica, de valor unidad, los estímulos espectrales producen una mayor o menor sensación de color (colorido) dependiendo de la longitud de onda. La

función que proporciona el colorido de los colores espectrales en un plano de luminancia constante se puede obtener por distintos métodos, ya sea por igualación heterocromática [Indow y Stevens (1966)] o por estimación de magnitud de los coloridos de las distintas muestras disponibles. En la figura 2.10 se muestran los resultados obtenidos por Jacobs [Jacobs (1967)] siguiendo este último procedimiento. Obsérvese que el punto de menor colorido corresponde a los 580 nm, con un mínimo secundario entre 490-500 nm. Esto implica que los amarillos espectrales tienen por lo general menos colorido que los rojos y los azules de la misma luminancia.

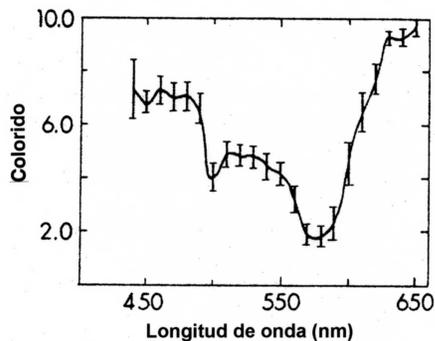


Figura 2.10. Valor medio del colorido percibido para estímulos espectrales en función de la longitud de onda, según datos de Jacobs [Jacobs (1967)]. Las barras verticales representan la desviación estándar. La gráfica corresponde al observador MR.

2.2.3.2. Colorido vs. pureza colorimétrica y luminancia

Se puede demostrar que la relación entre la pureza colorimétrica y el colorido para una longitud de onda dominante y una luminancia determinadas es en general de tipo potencial, esto es, sigue la Ley de Stevens [Stevens (1975)] citada anteriormente. Medidas al respecto han sido realizadas por Onley et al. [Onley et al. (1963)] y por Indow y Stevens [Indow y Stevens (1966)]. De especial interés son los datos experimentales obtenidos por Guirao y DeMattiello, que muestran la variación del exponente (pendiente en log-log) con la longitud de onda dominante [Guirao y DeMattiello (1974)] y la reflectancia [Guirao y DeMattiello (1977)] de la muestra. De estos datos se deduce que para las cuatro longitudes de onda

dominantes utilizadas (rojo de 620 nm, amarillo de 580 nm, verde de 510 nm y azul de 460 nm), el colorido crece más rápido en función de la pureza colorimétrica en valores intermedios de la reflectancia.

Cuando se analiza la variación del colorido con la luminancia, se encuentra que en general existe un valor de la luminancia que proporciona un máximo de colorido si la pureza colorimétrica es alta. La luminancia para la que se alcanza el óptimo depende del tono. Según Purdy [Purdy (1931b)], tiene un valor bajo para las cortas longitudes de onda (10 td), intermedio para el rojo (40 td) y máximo para un verde amarillento de 565 nm (200 td). Conclusiones similares se pueden derivar de los datos experimentales obtenidos por Hunt [Hunt (1952, 1953)] haciendo uso del método de igualación. Este comportamiento se encuentra asimismo cuando se analiza la variación del colorido con la reflectancia de muestras difusoras, que es proporcional a la luminancia si se mantiene constante la iluminación. En la figura 2.11 se muestran curvas de este tipo para diferentes valores de tono y pureza, según datos de Guirao y DeMattiello [Guirao y DeMattiello (1977)]. Nótese que cuando la pureza colorimétrica es baja, el máximo se transforma en un mínimo, encontrándose siempre un valor intermedio de la pureza, diferente para cada tono, en el cual el colorido permanece constante ante cualquier variación de la reflectancia.

En la figura 2.12 se muestran los loci de igual colorido a luminancia constante, en los que se observa la dependencia combinada del colorido en función de λ_d y p_c .

2.3. Adaptación cromática

La adaptación cromática es la influencia que tienen en la percepción de un estímulo los colores vistos anteriormente a éste y los percibidos en el resto del campo visual. Si los conos reciben durante un tiempo prolongado un estímulo de adaptación determinado, pueden quedar modificadas las tres curvas de sensibilidad espectral L, M y S de forma que si a continuación se presenta un test, su color percibido será diferente dependiendo del estímulo de adaptación, aunque físicamente la distribución espectral de energía del test sea la misma.

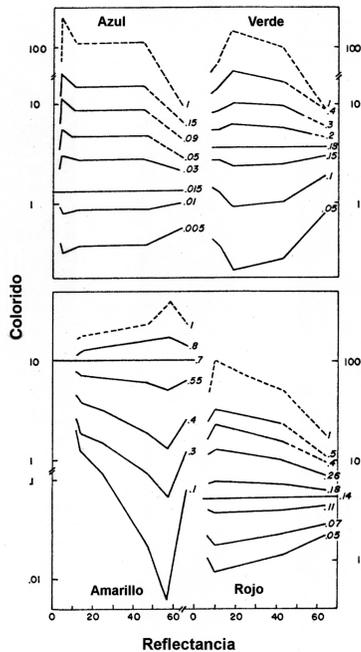


Figura 2.11. Representación del colorido en función de la reflectancia para diversos valores de pureza colorimétrica, según Guirao y DeMattiello [Guirao y DeMattiello (1977)]. Las partes discontinuas de las curvas se han extrapolado a partir de los datos experimentales. Las curvas para pureza colorimétrica unidad se han idealizado.

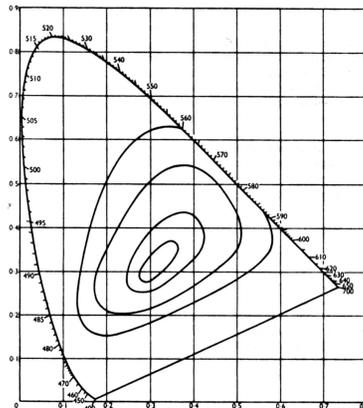


Figura 2.12. Loci de colorido constante obtenidos por Newhall, Nickerson y Judd [Newhall et al. (1943)] utilizando muestras Munsell.

Los pares de cromaticidades que bajo distintas condiciones de adaptación se perciben igual y sin embargo tienen distribuciones espectrales diferentes reciben el nombre de pares correspondientes. Cada par de condiciones de adaptación tiene asociada una serie de pares correspondientes determinados.

Así como se dan efectos de tipo temporal (habitación cromática), también tienen lugar en la visión del color efectos de carácter espacial (inducción cromática), en virtud de los cuales el color percibido en una zona dada del campo visual se ve alterado por las cromaticidades presentes en el resto del campo. Por ejemplo, una muestra de color de reflectancia espectral bien determinada, y observada bajo un mismo iluminante, cambia su color percibido dependiendo de la cromaticidad del fondo que la rodea.

Según las conclusiones generales de diversos estudios de adaptación cromática [Werner y Walraven (1982), Ware y Cowan (1982), Luo et al. (1995), Krauskopf et al. (1986), Valberg (1974)], la percepción del test se desplaza, en primera aproximación, alejándose de la posición del color del inductor. En los casos de adaptación de tipo espacial este fenómeno recibe el nombre de contraste simultáneo. Se pueden particularizar las conclusiones generales a ciertos casos concretos: por ejemplo, cuando el test considerado es físicamente blanco, se observa que el tono percibido inducido es el complementario al del fondo inductor utilizado, y el colorido inducido aumenta a medida que crece la pureza colorimétrica del inductor. Si por el contrario lo que se busca es el estímulo que se percibe acromático (el blanco perceptual) para distintas cromaticidades del fondo, se observan experimentalmente las siguientes características descritas por Werner y Walraven [Werner y Walraven (1982)]: el desplazamiento del blanco perceptual es hacia la longitud de onda del fondo, desde la posición del blanco perceptual con fondo neutro, y la amplitud de dicho desplazamiento es directamente proporcional a la luminancia del fondo e inversamente proporcional al contraste test-fondo, y por tanto inversamente proporcional a la luminancia del test (ver figura 2.13).

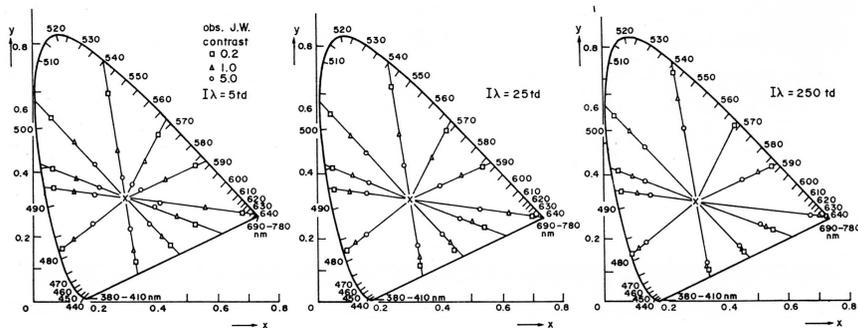


Figura 2.13. Resultados de Werner y Walraven sobre el efecto de la adaptación cromática en el locus acromático: coordenadas xy de los estímulos que se perciben acromáticos para distintas condiciones de adaptación. Cada diagrama muestra uno de los tres valores de luminancia del fondo inductor. Los diferentes contrastes test-fondo se representan con distintos símbolos. Las líneas unen el punto acromático bajo adaptación neutra con las coordenadas cromáticas de cada fondo utilizado.

Ware y Cowan [Ware y Cowan (1982)] llevaron a cabo un estudio sobre adaptación cromática en el que obtuvieron datos experimentales de 15 pares correspondientes bajo cambio de adaptación, para 5 adaptaciones distintas. Utilizaban un estímulo en el que alternaban bandas paralelas estrechas del color test con bandas más anchas del color inductor. Los desplazamientos cromáticos observados cumplían las reglas generales anteriormente descritas. Con estímulos inductores rojo y verde, por ejemplo, la apariencia del test se desplazaba con respecto a las coordenadas cromáticas del estímulo de forma que al situar en el diagrama cromático las coordenadas originales del test y las coordenadas del color inducido (medidas por igualación de un estímulo de referencia) las parejas test-referencia se situaban sobre líneas que convergían a un mismo punto para el mismo estímulo inductor.

Con determinadas características espaciales de los tests (tests en damero, tests de tamaño inferior a $1/3^\circ$) la adaptación no se produce en forma de contraste simultáneo, sino en forma de asimilación, y en estos casos la percepción del test se acerca a la cromaticidad del adaptador, en lugar de alejarse.

Otro fenómeno de especial relevancia es la constancia del color que tiene el ojo humano, capaz de identificar una misma reflectancia bajo muy distintos tipos de iluminación. Este tema ha sido estudiado por Land [Land y McCann (1971), Land (1974, 1983)] y se dispone de datos experimentales gracias al trabajo de McCann, McKee y Taylor [McCann et al. (1976)]. El descuento del iluminante lo realiza el sistema visual en función de los colores del entorno. Sin embargo, dicha constancia no se verifica si modificamos muy sensiblemente la intensidad o la cromaticidad del iluminante. Aparte de este descuento del iluminante de origen neural, hay otros mecanismos de constancia del color de orden superior, denominados cognitivos, que implican un procesado a nivel más consciente: así, por ejemplo, el sistema visual es capaz de asignar el color amarillo a un plátano pintado de un color ligeramente distinto, sólo por el mero hecho de que sabemos que los plátanos son amarillos.

2.4. Umbrales de detección y discriminación

El modelo de visión del color que se propondrá en la presente memoria trata de reproducir fenómenos de apariencia del color, pero no es un modelo de discriminación. Aun así, en el apartado de testeo del modelo se emplearán también datos sobre umbrales de detección y discriminación de energía, por lo cual es aconsejable describir en el presente capítulo los datos experimentales de que se dispone al respecto.

2.4.1. Umbral de detección

Se define el umbral de detección como la mínima cantidad de energía de un estímulo cualquiera que se debe colocar sobre fondo negro para poder ser detectada. El umbral es inversamente proporcional a la sensibilidad del sistema visual. Así pues, puede obtenerse una curva de sensibilidad espectral $V(\lambda)$ medida mediante umbrales [Wyszecki y Stiles (1982) p. 392, CIE (1978), Guth y Lodge (1973), Hsia y Graham (1952), Hurvich y Jameson (1953), Sperling y Hsia (1957) Sperling y Lewis (1959)]. El valor del umbral absoluto viene determinado por las condiciones de observación [Artigas et al. (1995)], como por ejemplo: el tamaño del test [LeGrand (1972)], el

tiempo de exposición [Barthley (1951), Barlow (1958)], la excentricidad del test [Stiles y Crawford (1937), Stiles (1949)] o el tiempo de adaptación a la oscuridad previo a las medidas [Hecht et al. (1937), Hetch y Hsia (1945), Arden y Weale (1954)]. En general, un aumento en el valor de cualquiera de estos parámetros mejora el umbral, esto es, lo hace más pequeño.

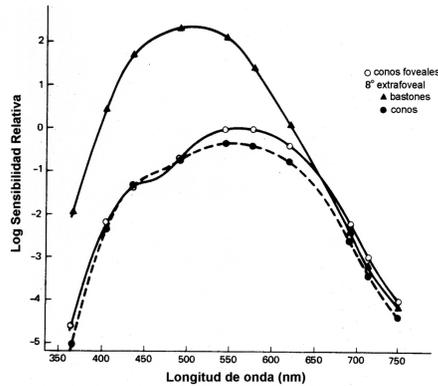


Figura 2.14. Variación con la longitud de onda de la sensibilidad, obtenida mediante el método del umbral absoluto, para un test de 1° en visión foveal y extrafoveal a 8° (conos y bastones) [Wald (1945)].

La longitud de onda del estímulo también influirá en el valor del umbral [Sperling y Jolliffe (1965)], y es de hecho nuestro parámetro de interés. En la figura 2.14 se representa la variación de la sensibilidad con la longitud de onda obtenida mediante un test de tamaño de 1° en posición extrafoveal a 8° , para conos y bastones, y para el mismo test en posición foveal [Uttal (1981)]. La curva de los bastones coincide con la curva de eficiencia luminosa a nivel escotópico [Wald (1945), Crawford (1949)] y la curva de los conos foveales también se corresponde con la curva de visibilidad a nivel fotópico, excepto en el entorno de los 450 nm, donde aparece una depresión debido a la absorción del pigmento macular [CIE (1926), Judd (1951)]. Es fácil apreciar que los bastones son más sensibles que los conos en la retina excepto en el extremo rojo del espectro visible. Asimismo, los conos foveales son ligeramente más sensibles que los extrafoveales, excepto en la depresión anteriormente citada. Nuestro modelo de visión del color deberá ser capaz de predecir la sensibilidad espectral umbral cuando las detecciones estén mediadas por los conos.

2.4.2. Umbrales de discriminación

Se denomina umbral de discriminación o umbral incremental al umbral de detección sobre un fondo dado de luminancia no nula. Medidas de este tipo han sido hechas por diversos autores [King-Smith y Carden (1976), Kimura (1991), Schwartz (1993), Sperling y Harwerth (1971), Sperling et al. (1967), Kalloniatis y Harwerth (1990, 1991)]. En la figura 2.15 se aprecia que, para un fondo blanco de luminancia suficientemente alta, y salvo para tamaños y tiempos de exposición del test muy pequeños, la curva de sensibilidad espectral suele presentar tres picos, en torno a 440, 530 y 610 nm, y dos mínimos locales en torno a 480 y 570 nm. La discriminación sobre el fondo se realiza con reconocimiento del color del test en todo el espectro excepto tal vez en un entorno alrededor de los 570 nm (amarillos). Con estímulos muy breves [King-Smith y Carden (1976)], del orden de 10 ms, o si se usan tests de muy pequeño tamaño, como por ejemplo 0.05° , aumenta el rango de longitudes de onda en el que la detección es sin color, y la curva de sensibilidad pasa a tener un solo pico, en forma de $V(\lambda)$ y con un máximo en torno a 555 nm. Esta tendencia es favorecida también cuando se reduce la luminancia del fondo, aproximándose al caso límite de 0 td, que correspondería al umbral de detección o umbral absoluto.

Considérese ahora el caso en el que el fondo no sea blanco [Kalloniatis y Harwerth (1991)]: por ejemplo, si se mide el umbral incremental sobre un fondo cuasimonocromático amarillo de 580 nm, el pico de 440 nm aumenta su altura con respecto a los otros dos, tanto más cuanto mayor es la luminancia del fondo. Para valores elevados de luminancia, el pico de las longitudes de onda medias se junta con el de bajas longitudes de onda y deja de apreciarse, quedando un máximo en 450 nm y otro pico secundario en torno a los 610 nm, con un mínimo local en 580 nm. Si el fondo utilizado es verde de 500 nm la curva obtenida presenta dos máximos, aproximadamente en 450 y 570 nm, y un mínimo local en 500 nm. De igual forma, si se usan fondos monocromáticos de distintas longitudes de onda, las curvas resultantes suelen presentar dos picos y un mínimo local en el valor de la longitud de onda correspondiente al fondo.

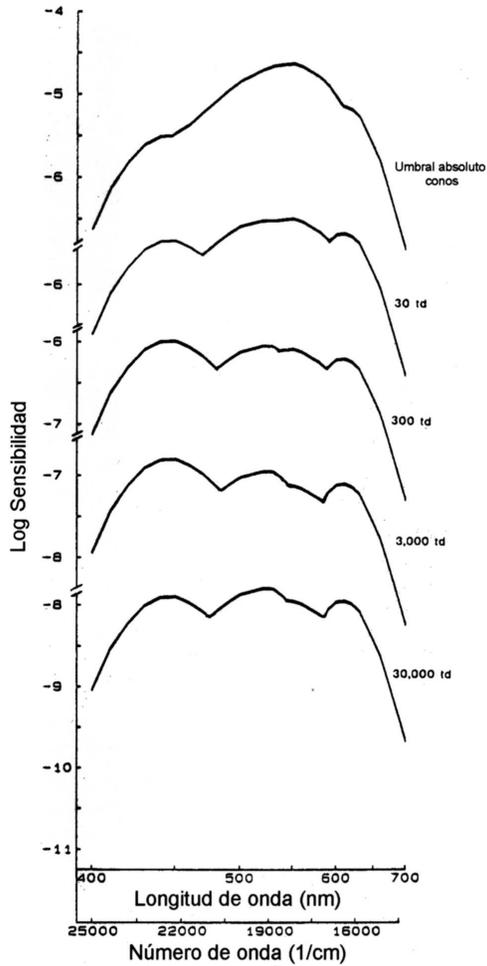


Figura 2.15. Representación esquemática de los umbrales de discriminación sobre fondo blanco obtenidos con distintos niveles de luminancia del fondo. Las curvas se han desplazado verticalmente para evitar un excesivo solapamiento [según Kalloniatis y Harwerth (1990)].

Capítulo 3. Fundamentos neurofisiológicos de la visión del color

3.1. Arquitectura de la percepción visual

En el presente trabajo la atención se centra de manera especial en las fases de la vía visual posteriores a la retina (núcleo geniculado lateral y córtex visual), a las cuales corresponde la práctica totalidad de los contenidos de este capítulo. Sobre la anatomía y fisiología de la retina, de sobra conocidas, baste decir que la conversión de la luz en impulsos eléctricos por medio de procesos fotoquímicos se produce en los conos y bastones, que comunican estos impulsos a las células bipolares, pasando después a las células ganglionares. Existen también en la retina las llamadas células horizontales, que permiten conexiones transversales a la altura de las sinapsis entre receptores y bipolares, y las células amacrinas, que permiten conexiones transversales en las sinapsis entre bipolares y ganglionares. La figura 3.1 muestra los diferentes tipos de células citados.

La información visual contenida en la imagen retiniana viaja desde la retina al córtex visual primario o estriado (área V1), vía núcleo geniculado lateral (LGN), a través de dos caminos visuales paralelos denominados Magno y Parvocelular. Ambos caminos tienen su origen en las células ganglionares, donde existen dos tipos principales de células, denominadas X e Y en el gato [Enroth-Cugel y Robson (1966)], M y P en el mono [Shapley y Perry (1986)]. Las células ganglionares M proyectan sus axones sobre los sustratos ventrales del LGN, donde se encuentran células de tamaño grande (Magno), en tanto que las células ganglionares P proyectan sobre los sustratos dorsales, donde hay células pequeñas (Parvo).

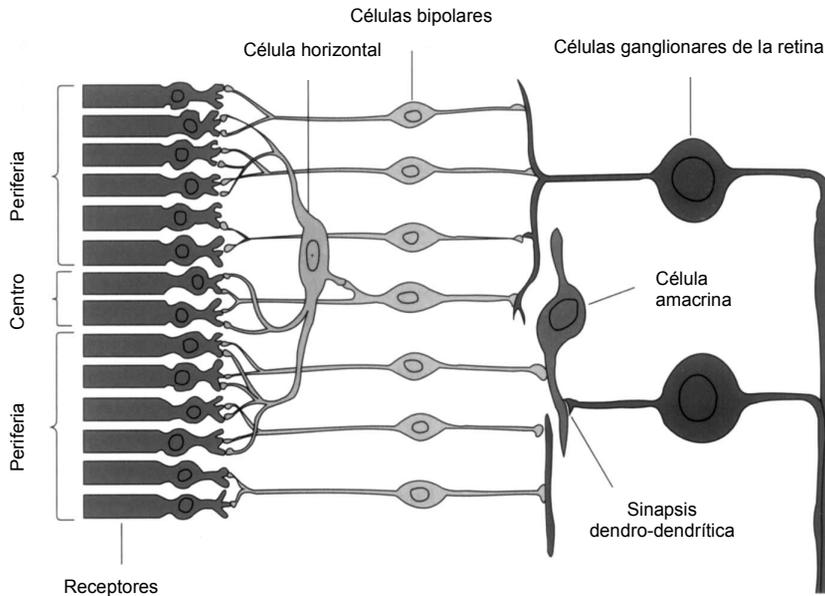


Figura 3.1. Sección transversal de la retina. La luz llega a los conos y bastones desde el lado derecho, atravesando las capas de células ganglionares y bipolares. La anchura del dibujo equivale aproximadamente a un cuarto de milímetro. Se observa cómo la célula horizontal mostrada permite la creación de un campo receptivo con centro y periferia para la célula bipolar del centro del dibujo [De Hubel, "Ojo, cerebro y visión"].

Existen dos sustratos ventrales, uno que recibe información del ojo derecho y otro que recibe del ojo izquierdo; y cuatro sustratos dorsales, dos que reciben del ojo derecho y dos del izquierdo. Cada hemisferio cerebral recibe información de ambos ojos. El córtex del hemisferio derecho (izquierdo) recibe las señales de los semicampos situados en el espacio objeto a la izquierda (derecha) del punto de fijación donde están dirigidas las líneas de mirada de nuestros ojos (ver figura 3.2).

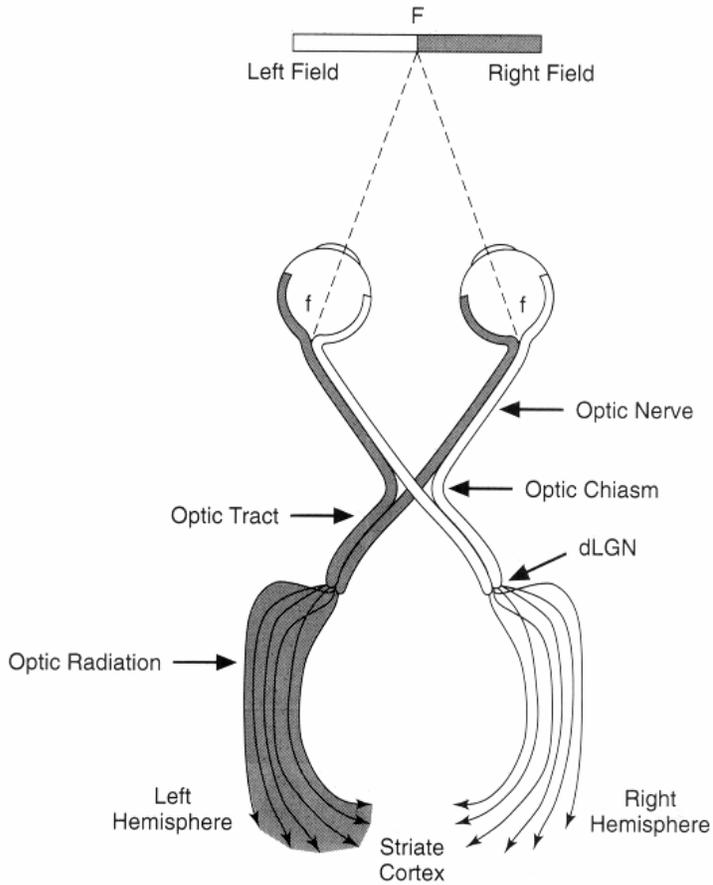


Figura 3.2. Esquema de las vías visuales [de *Visual perception: a clinical orientation*. Schwartz S.H. McGraw-Hill (1999)].

El córtex primario está estratificado en diferentes capas y subcapas. Cada camino tiene una capa de entrada distinta en el córtex. La puerta de entrada del Magno está en la subcapa $4C\alpha$, mientras que la del Parvo está en la $4C\beta$. En la figura 3.3 se muestra un modelo de córtex primario, frecuentemente denominado modelo del cubito de hielo [Hubel y Wiesel (1977)]. Realizando un corte transversal del cubito, se encuentra que la información del ojo derecho entra por puntos distintos que la información del ojo izquierdo, de forma espacialmente alterna, y fluye hacia las capas más superficiales del córtex, formándose las denominadas “columnas de dominancia ocular”. Perpendiculares a estas columnas se disponen las denominadas “columnas de orientación”, cada una de las cuales contiene células que son selectivas para una orientación diferente (en realidad, para una banda de orientaciones), cubriendo con la totalidad de las columnas todas las orientaciones posibles. Una unidad funcional, denominada “hipercolumna”, está constituida por un par de columnas de dominancia ocular y un conjunto completo de columnas de orientación. La dimensión de una hipercolumna es de aproximadamente 1×1 mm. En las subcapas más superficiales del córtex primario (1, 2 y 3) se encuentran distribuidos de manera irregular grupúsculos de células que, cuando el córtex es teñido con el enzima citocromo-oxidasa, semejan manchas o lunares, denominados blobs por Hubel y Wiesel. Las proyecciones Parvo desde $4C\beta$ en dirección al área V2 pueden atravesar estos blobs o bien pasar entre ellos, por la región que se conoce como interblobs. Una hipercolumna contiene 4 blobs, dos en cada columna de dominancia ocular.

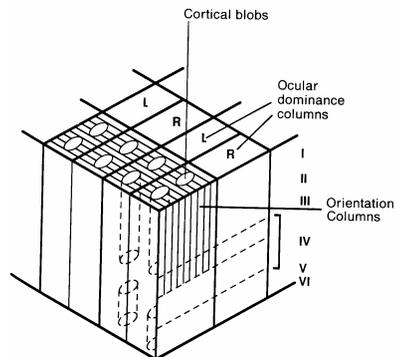


Figura 3.3. Modelo del cubito de hielo [de *An introduction to the visual system*. Tovee M.J. Cambridge (1996)].

Pero lo que es realmente importante es la idea de que cada uno de estos caminos conduce diferente clase de información sobre los objetos, o en otras palabras, está especializado en ciertas facetas de la percepción visual [Lennie (1980), Livingstone y Hubel (1988), Shapley (1990), Schiller et al. (1990), Merigan (1991)]. Estas facetas son, en visión monocular, básicamente tres: la forma, el color y el movimiento. En visión binocular, una cuarta dimensión es esencial en la percepción: la visión en profundidad o estereopsis. Muchas de las neuronas del córtex primario son binoculares, es decir, reciben señales de los dos ojos, y median probablemente la estereopsis.

Describamos brevemente cuáles son las principales etapas que constituyen el proceso visual. Para empezar necesitamos tener información sobre el estímulo visual. Un estímulo visual se puede definir como una distribución espacial de luminancias, que, obviamente, puede variar en el tiempo si se trata de una escena en movimiento. En la imagen retiniana tenemos todavía una distribución de luminancias del objeto, porque el sistema óptico del ojo no ha hecho más que formar una imagen. Sin embargo, a partir del plano de los fotorreceptores, una imagen como tal deja de existir. La información de la misma se va reorganizando capa de células a capa de células en la retina hasta alcanzar el plano de las células ganglionares.

Como apuntamos anteriormente, aquí es donde ya comienza la especialización funcional de las células, especialización que, según el punto de vista moderno, continúa aun más allá del córtex visual primario. Así, parece que la información transmitida por el camino Magnocelular acaba proyectándose sobre el área V5, también denominada MT, (de córtex medio temporal), bien directamente o bien a través del área V2. Por otra parte, la información transmitida por el camino Parvocelular se proyecta sobre V4 a través de V2 y continúa hacia IT, (de córtex inferotemporal). Un esquema simplificado de este "circuito neural" se muestra en la figura 3.4.

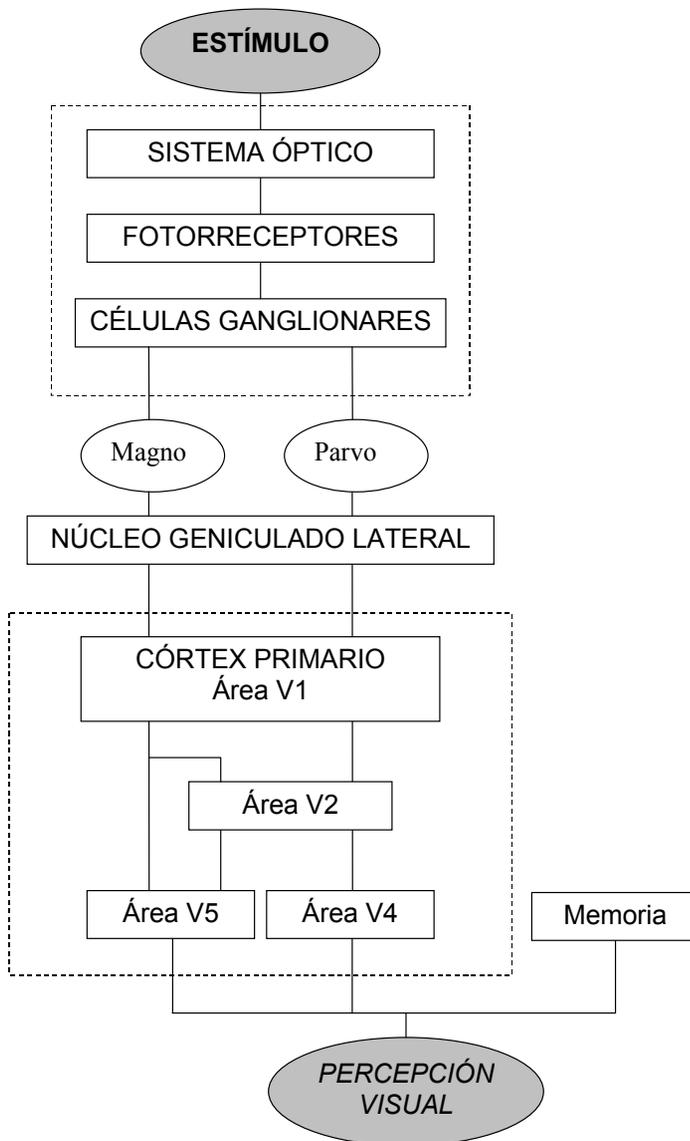


Figura 3.4. Circuito simplificado del proceso visual.

3.2. Sobre la especialización funcional de los caminos hasta y más allá del córtex estriado

Los experimentos realizados con monos antes y después de practicarles pequeñas lesiones localizadas en el Magno o el Parvo a nivel del LGN demuestran que el Magno tiene un papel esencial en la detección de parpadeos de alta frecuencia y en la detección y discriminación de movimientos, mientras que el Parvo es el soporte fisiológico para las tareas relacionadas con el color, la detección y discriminación de patrones espaciales y formas en general, y la estereopsis con altas frecuencias espaciales [Schiller et al. (1990)].

Como hemos dicho antes, la especialización funcional continúa más allá del córtex estriado [Maunsell y Newsome (1987), Maunsell (1995)]. Esta especialización está apoyada por el hecho de que las personas con algún tipo de agnosia visual (déficit específico para la realización de ciertas tareas) suelen tener alguna lesión en el área presuntamente relacionada con su problema particular, mientras que una lesión en el córtex primario produce un simple escotoma. Es un hecho admitido hoy en día que la vía visual que va desde V1 a MT constituye un camino específico para el procesamiento de la información sobre el movimiento [Simoncelli y Heeger (1998)]. Por otra parte, los problemas que presentan las personas con lesiones de V4 en experimentos de denominación del tono, a pesar de mantener una capacidad de discriminación cromática aceptable, evidencian la importancia que esta área tiene en el procesamiento de la información sobre el color [Zeki (1990)]. Sin embargo, existen todavía numerosos interrogantes acerca del papel específico que V4 juega en la visión del color. En el capítulo 5 seguiremos reflexionando sobre esta cuestión.

3.3. Propiedades de las células en la retina y el LGN

3.3.1. Evolución temporal de la respuesta de una célula. Excitación e inhibición

Supongamos que tenemos pinchada una cierta célula, por ejemplo, una célula ganglionar. Supongamos que en un momento dado encendemos un estímulo y registramos el potencial de acción

que se ha producido en la célula. La respuesta a un estímulo de luminancia constante encendido entre los instantes t_1 y t_2 (en adelante, estímulo cuadrado) tiene, en general, una de las formas ilustradas en la figura 3.5. Concentrémonos por el momento en la parte izquierda. Nótese cómo tras el encendido del estímulo se produce un aumento brusco en la frecuencia del potencial de acción (o densidad de picos) y un tiempo después se estabiliza. Esta respuesta puede entenderse como la suma de dos respuestas a las que se denomina componente transitorio y componente sostenido (véase figura 3.6). Se llama excitación a un incremento en la frecuencia del potencial de acción, e inhibición a una reducción de la misma. Se dice que una célula es de respuesta on, o excitatoria, cuando responde con excitación al encendido del estímulo, tal como ocurre en la parte izquierda de la figura 3.5. Como se puede ver, la respuesta al apagado del estímulo es una inhibición. Se dice que una célula es de respuesta off, o inhibitoria, cuando hace exactamente lo contrario, o sea, responder con inhibición al encendido y con excitación al apagado, como se aprecia en la parte derecha de la figura 3.5. Así pues, el nombre asignado a la célula está determinado por lo que ocurre en el encendido del estímulo.

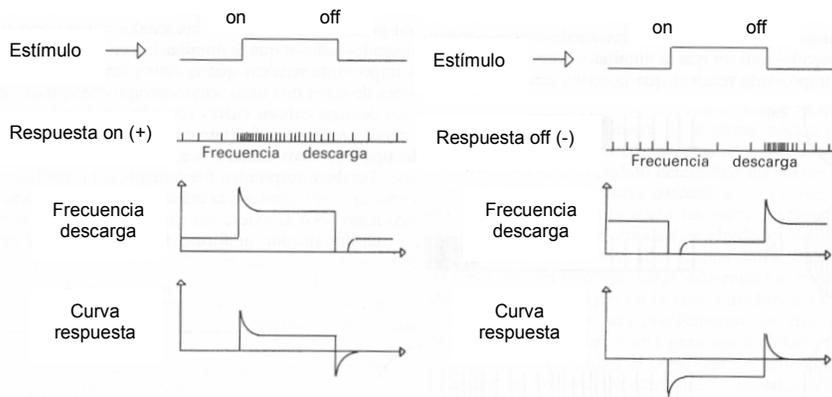


Figura 3.5. Frecuencia del potencial de acción y curvas de respuesta típicas en una célula de respuesta on (izquierda) y off (derecha).

3.3.2. Índice de transitoriedad y latencias

Las células que responden sólo con componente transitorio se denominan fásicas. Si sólo responden con componente sostenido se denominan tónicas. En realidad, existe una gradación casi continua de células entre estas dos situaciones extremas. Se puede definir un índice de transitoriedad de la forma:

$$IT = 100 \cdot \frac{NP_1}{NP_1 + NP_2} \quad (3.1)$$

donde NP_1 es el número de picos dentro de un pequeño intervalo de tiempo próximo al inicio del estímulo y NP_2 es el número de picos en un intervalo de tiempo similar una vez estabilizada la respuesta. Así pues, una célula es puramente transitoria si $IT=100$ y puramente sostenida si $IT=50$. En general las células del Magno presentan ITs mayores que las del Parvo.

Se denomina latencia en una célula de naturaleza excitatoria al tiempo que transcurre hasta la aparición del primer pico desde el inicio del estímulo. En una célula de respuesta inhibitoria, este tiempo hay que contarlo desde la interrupción del estímulo. En general, las células del Magno tienen latencias menores que las del Parvo.

3.3.3. Sensibilidad espacial del campo receptivo. Células de centro on y centro off

Se denomina campo receptivo de la célula a la región de fotorreceptores conectados con la misma. Es preferible definir el campo receptivo en el plano de los fotorreceptores porque aunque dicha región tiene su conjugada en el espacio objeto, ésta depende del punto de fijación. La magnitud de la respuesta de una célula no es la misma si el estímulo se enciende en un punto del campo receptivo u otro. Los campos receptivos de las células ganglionares, así como los de las células del LGN y buena parte de los de las células del córtex estriado tienen forma circular. Además, tienen simetría circular, lo que significa que cualquier punto de luz encendido a una misma distancia r del centro del círculo produce la misma respuesta en la célula. La

función particular que describe cómo cambia la respuesta con la distancia al centro (o con las coordenadas x e y del estímulo si el campo receptivo no tuviera simetría circular) se denomina sensibilidad espacial. La forma típica que tiene esta sensibilidad (ver figura 3.6) se puede interpretar de la manera siguiente [Rodieck (1965)]: supongamos que la respuesta de la célula es la suma de las respuestas de dos mecanismos a los que por tradición denominaremos en adelante centro y periferia. Supongamos que los campos receptivos de tales mecanismos tienen asimismo simetría circular y que su sensibilidad espacial es de forma gaussiana, esto es:

$$S_c(r) = A_c \cdot e^{-\left(\frac{r}{r_c}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$S_p(r) = A_p \cdot e^{-\left(\frac{r}{r_p}\right)^2} \quad (3.3)$$

donde A_c , A_p y r_c , r_p son las amplitudes y los radios respectivamente de los dos mecanismos. La sensibilidad espacial de la célula es la suma de las sensibilidades de tales mecanismos. Si uno de ellos, por ejemplo el centro, actúa de manera excitatoria y el otro, la periferia, de manera inhibitoria, la suma (signo incluido) es en realidad la diferencia entre las gaussianas. Nótese que el mecanismo denominado periferia responde en realidad desde su propio centro, que de hecho está en el mismo punto que el del mecanismo denominado centro.

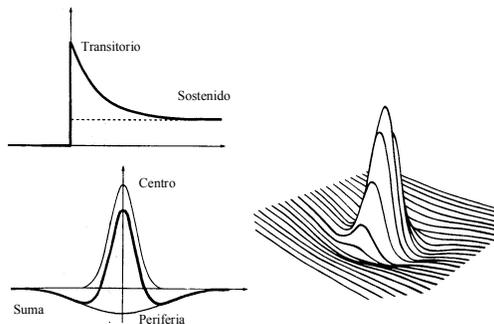


Figura 3.6. Modelo de Rodieck para una célula de respuesta on. Izquierda arriba: respuesta temporal a un escalón positivo. Izquierda abajo: sensibilidades de los mecanismos centro y periferia (trazo fino) y sensibilidad de la célula (trazo grueso). Derecha: representación bidimensional (x,y) de la sensibilidad [Rodieck (1965)].

Veamos con más detalle, haciendo uso de un ejemplo, cómo con este modelo podemos fácilmente entender lo que ocurre cuando desplazamos el punto de luz desde el centro hasta el borde del campo receptivo (ver figura 3.7). Un punto en el centro del campo receptivo produce respuesta máxima tanto en el mecanismo centro como en el mecanismo periferia, pero el primero responde de manera excitatoria y el segundo de manera inhibitoria. La suma de ambas respuestas da en este caso respuesta excitatoria. Conforme alejamos el punto del centro las respuestas de los dos mecanismos van disminuyendo, de manera que la suma, que continúa siendo una respuesta excitatoria, es cada vez más pequeña. A una cierta distancia del centro, las dos respuestas se han hecho iguales y la respuesta de la célula se hace cero. Más allá, la célula vuelve a responder, pero de manera inhibitoria, ya que la respuesta de la periferia es mayor que la del centro. En un punto dado la respuesta del mecanismo centro llega a hacerse cero, pero la célula sigue dando respuesta inhibitoria a través del mecanismo periferia. Finalmente, éste acaba también respondiendo cero y la célula ya no da respuesta. El ejemplo ilustrado corresponde a una célula del tipo que en adelante denominaremos de “centro on”, porque el mecanismo centro es el que responde de manera excitatoria. Existen células “de centro off”, que actúan al revés.

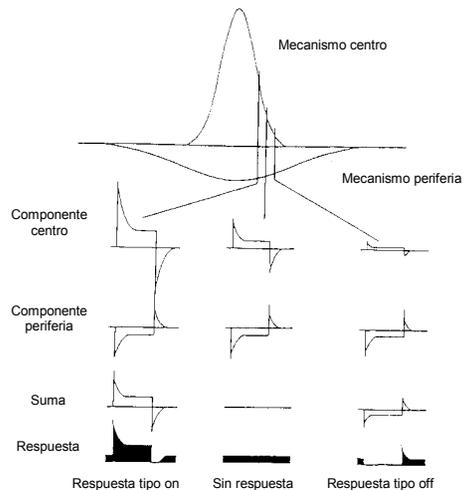


Figura 3.7. Respuestas de los mecanismos centro y periferia a un punto de luz encendido en diferentes posiciones del campo receptivo. La respuesta de la célula es la suma de las dos respuestas [Rodieck (1965)].

3.3.4. Respuesta del campo receptivo a un estímulo. Células tipo X y tipo Y

Supongamos que el campo receptivo es iluminado con una distribución radial de intensidades, $L(r)$, de longitud de onda λ . Si el centro y la periferia son mecanismos espacialmente lineales, la respuesta a $L(r)$ se puede calcular de la forma:

$$R_c(\lambda) = S_c(\lambda) \int L(r) \cdot S_c(r) \cdot dr \quad (3.4)$$

$$R_p(\lambda) = S_p(\lambda) \int L(r) \cdot S_p(r) \cdot dr \quad (3.5)$$

donde $S_c(\lambda)$, $S_p(\lambda)$ son las sensibilidades espectrales del centro y la periferia respectivamente. Como veremos más adelante, dichas sensibilidades están gobernadas por los conos que estimulan a cada mecanismo. De acuerdo con el modelo de Rodieck, y siempre que la propia célula sea asimismo un mecanismo espacialmente lineal, la respuesta se calculará como la diferencia entre las respuestas del centro y la periferia. Se dice que una célula es de tipo X si es espacialmente lineal, y de tipo Y en caso contrario. La totalidad de las células del Parvo y el 75% de las del Magno son de tipo X.

3.3.5. Células oponentes y células no oponentes. Punto neutro

Consideremos la respuesta de una célula a una luz espectral de energía unidad. Se dice que la célula tiene oponencia espectral, o simplemente que es oponente, cuando responde con excitación a luces en una parte del espectro y con inhibición a luces en el resto del espectro. La longitud de onda en la que se produce la transición de un tipo de respuesta a otro se denomina punto neutro. Así pues, en el punto neutro la respuesta de la célula es cero. Se dice, por el contrario, que una célula no tiene oponencia espectral, o que es no oponente, cuando responde de la misma manera a luces de cualquier longitud de onda, bien con excitación o bien con inhibición. Según la longitud de onda del punto neutro, se pueden clasificar las células oponentes en dos grupos [DeValois et al. (1966)]. Las células cuyo punto neutro está por debajo de 560 nm se dice que tienen oponencia

azul-amarillo, porque los máximos de excitación e inhibición están en estas regiones. Dependiendo de si el máximo excitatorio está en el azul o en el amarillo se llaman azul-amarillo o amarillo-azul. Las células cuyo punto neutro está por encima de 560 nm se dice que tienen oponencia rojo-verde. En promedio, las células azul-amarillo tienen el punto neutro alrededor de 500 nm y las células rojo-verde alrededor de 570 nm [Derrington et al. (1984)]. En la figura 3.8 se muestran sensibilidades espectrales representativas de los seis grupos descritos por DeValois et al.

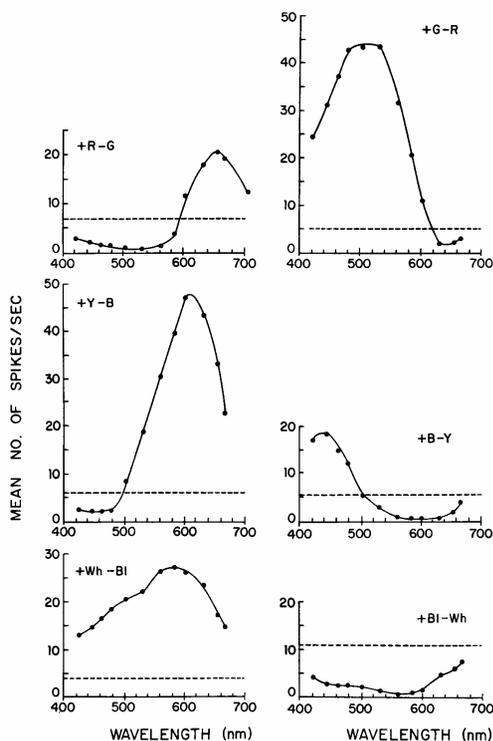


Figura 3.8. Sensibilidades espectrales (respuesta a un espectro de igual energía) de las seis clases de células (cuatro oponentes y dos no oponentes) descritas por DeValois et al. [DeValois et al. (1966)].

3.3.6. Mapa de inputs

Nótese que la curva de sensibilidad espectral de una célula no nos da ninguna información sobre qué conos inervan cada región del campo receptivo. De acuerdo con Wiesel y Hubel [Wiesel y Hubel (1966)] existen, según el mapa de inputs, al menos tres clases distintas de células a las que se denomina de Tipo I, de Tipo II y de Tipo III (ver figura 3.9). En las células de Tipo I el centro y la periferia del campo receptivo están inervados por conos distintos actuando con signos contrarios, es decir, tienen oponencia espectral y antagonismo espacial. Las células de Tipo II tienen oponencia espectral pero no antagonismo espacial, ya que en ellas no existe centro y periferia. Por último, las células de Tipo III tienen, al contrario que las de Tipo II, antagonismo espacial pero no oponencia espectral. Dentro de cada clase existen a su vez distintas posibilidades, según sean de centro on o de centro off y según el signo que corresponda a cada cono. Todas las células del camino Magnocelular son de Tipo III. En el camino Parvocelular, el 90% son de Tipo I y el 10% de Tipo II. Existe cierta discusión sobre la existencia o no de células de Tipo III en el Parvo. Las células con mapa de Tipo I tienen oponencia rojo-verde. Por el contrario, las células con mapa de Tipo II tienen oponencia azul-amarillo [Zrenner (1983)]. Se ha sugerido que las células de Tipo I también podrían formarse con conos L y M inervando el centro y la periferia en distinta proporción [Hubel (1995)]. Las dos arquitecturas son, de hecho, funcionalmente indistinguibles. Sin embargo, con esta concepción, bastaría con suponer que todos los conos son por ejemplo L en el centro y M en la periferia, y la sensibilidad del campo receptivo se describiría haciendo uso del modelo de Rodieck, sin más que multiplicar las gaussianas de los mecanismos centro y periferia por las sensibilidades espectrales de los conos L y M respectivamente.

3.3.7. Sensibilidad al contraste espacial

Las células de Tipo III responden a redes acromáticas y a variaciones de luminancia en general. La curva de sensibilidad al contraste (CSF) tiene forma de filtro pasa-banda. Las células de Tipo II responden a redes cromáticas y a variaciones de color en general. La curva de sensibilidad al contraste cromático (CSFc) tiene forma de

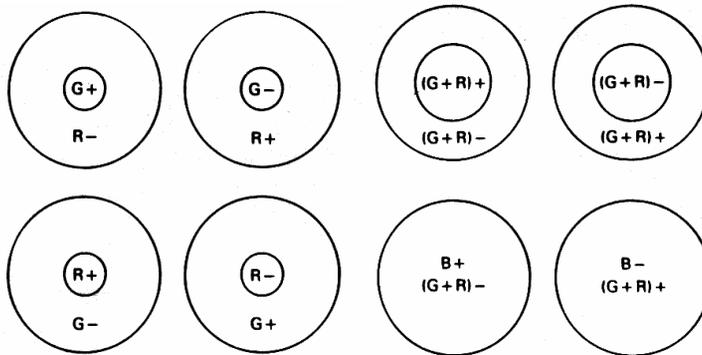


Figura 3.9. Mapas de inputs de las diferentes estructuras espaciales descritas por Wiesel y Hubel [Adaptado de Wiesel y Hubel (1966)].

filtro pasa-baja. Las células de Tipo I responden tanto a redes cromáticas como a acromáticas. Las CSFs cromática y acromática correspondientes tienen forma de pasa-baja y pasa-banda respectivamente. En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran las CSFs acromáticas de un conjunto de células del Magno y del Parvo medidas en el LGN. Nótese que en general las células del Magno son mucho más sensibles a frecuencias bajas y medias, pero tienen resoluciones notablemente más pobres. En la parte izquierda de la figura 3.12 se muestran las CSFs cromática y acromática de una célula de Tipo I en particular. La resolución cromática es significativamente menor que la acromática. Se pueden comparar las características de estas CSFs con las de las CSFs cromática y acromática bien conocidas de la psicofísica [Mullen (1985)], mostradas a la parte derecha de la figura.

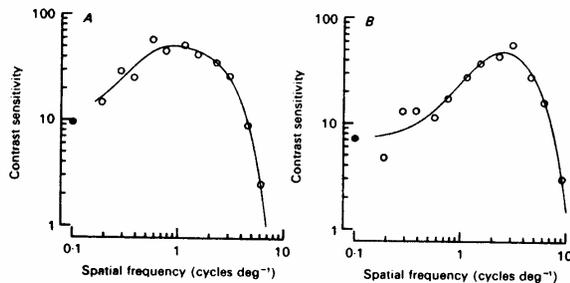


Figura 3.10. Curvas de sensibilidad al contraste espacial acromático para dos células del Magno [De Derrington y Lennie (1984)].

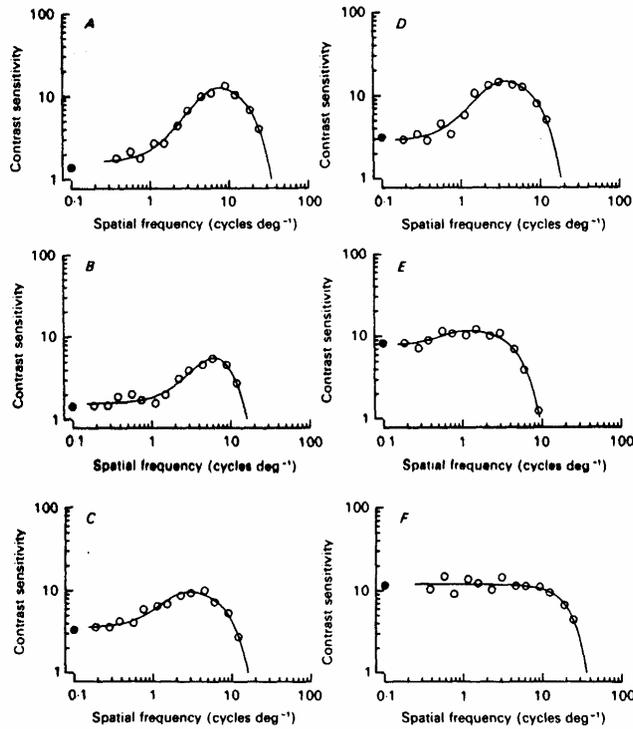


Figura 3.11. Curvas de sensibilidad al contraste espacial acromático para seis células del Parvo con diferentes mapas de inputs [De Derrington y Lennie (1984)].

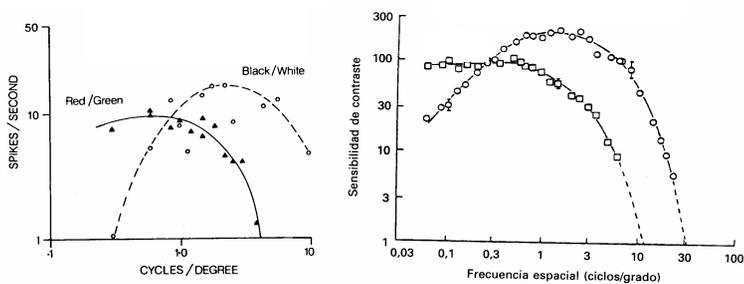


Figura 3.12. Comparación de curvas de sensibilidad al contraste espacial cromático y acromático. Izquierda: célula Tipo I de centro L-on [De DeValois y DeValois, *Spatial Vision*, Oxford (1990)]. Derecha: datos psicofísicos de un observador humano [De Mullen (1985)].

Todas las propiedades comentadas en el presente apartado aparecen resumidas en la tabla 3.1.

	MAGNO		PARVO		
ORIGEN Y PROYECCIONES	Ganglionares M→ sustratos ventrales LGN→ 4C α de V1		Ganglionares P→ sustratos dorsales LGN→ 4C β de V1		
TAMAÑO DEL CAMPO RECEPTIVO	Grande		Pequeño		
SUMACIÓN ESPACIAL	Tipo X (75%)	Tipo Y (25%)	Tipo X		
RESPUESTA TEMPORAL	Fásica (transitoria) ⁽¹⁾		Tónica (sostenida) ⁽¹⁾		
LATENCIA	Menor		Mayor		
VELOCIDAD DE CONDUCCIÓN	Mayor		Menor		
MAPA DE INPUTS	Tipo III		Tipo I	Tipo II	Otros
			70%	10%	20%
ANTAGONISMO ESPACIAL ⁽²⁾	Sí		Sí	No	Sí
OPONENCIA ESPECTRAL	No		Sí	Sí	No
SENSIBILIDAD ESPECTRAL	V(λ)		R/G	B/Y	Tipo V(λ) ⁽³⁾
INPUT DE BASTONES	Sí		No		
GANANCIA DE CONTRASTE	Mayor		Menor		
SENSIBILIDAD AL CONTRASTE ACROMÁTICO ⁽⁴⁾	Frecuencias espaciales bajas y/o frecuencias temporales altas		Resto de la superficie espacio-temporal		
SENSIBILIDAD AL CONTRASTE CROMÁTICO	Básicamente no sensible		Toda la superficie espacio-temporal		
TIPO DE FILTRO	Pasa-banda		Pasa-banda (acromático) Pasa-baja (cromático)		

Tabla 3.1. Resumen de las características de los caminos Magno y Parvocelular. Notas: (1) El índice de transitoriedad es de medio a alto en el Magno y de medio a bajo en el Parvo. (2) Debe entenderse para variaciones de luminancia. (3) Aunque las características de estas células son básicamente las mismas que las de una de Tipo III, su espectro de acción es el de los conos L o M. (4) Debe entenderse preferentemente.

3.4. Propiedades de las células en el córtex estriado

3.4.1. Células con campos receptivos centro-periferia

Pueden encontrarse células con campos receptivos centro-periferia tanto en las puertas de entrada del Magno y del Parvo, 4C α y 4C β respectivamente, como en los blobs de las capas más superficiales 2 y 3. En 4C α , el mapa de inputs de todas las células es de Tipo III. En 4C β se encuentran células con mapas tanto de Tipo III

como de Tipo I, aunque no parece haber de Tipo II. En los blobs encontramos de Tipo III, de Tipo II y especialmente una clase de célula que no existía hasta aquí: las denominadas células oponentes dobles. Se trata de células con antagonismo espacial, como las de Tipo III, pero con oponencia espectral tanto en el centro como en la periferia del campo receptivo (véase la figura 3.13). Responden a redes cromáticas (y a variaciones de color en general) pero, debido al antagonismo espacial, la forma de la CSF (cromática) es de pasabanda. [Livingstone y Hubel (1984)].

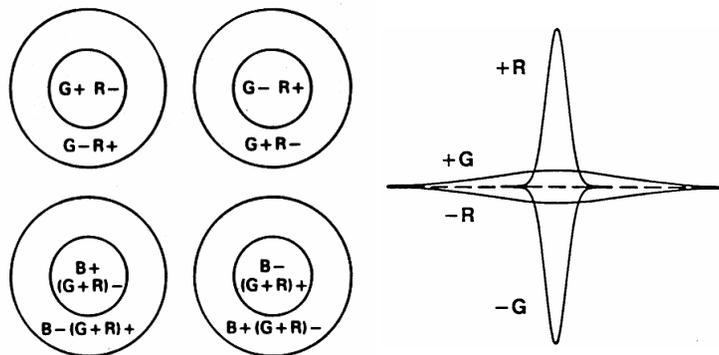


Figura 3.13. Izquierda: mapas de inputs de las diferentes estructuras posibles para una célula oponente doble. Derecha: sensibilidad espacial del campo receptivo correspondiente a la célula superior derecha [Adaptado de Lennie y D'Zmura (1988)].

3.4.2. Células con campos receptivos rectangulares

Muchas células en el córtex tienen campos receptivos de forma rectangular: son las denominadas células simples y células complejas. En las células simples el campo receptivo presenta, no obstante, regiones excitatoria e inhibitoria claramente diferenciadas. Un campo receptivo con estas características se puede formar recibiendo inputs de un conjunto de células de Tipo I, por ejemplo de centro L-on, cuyos campos receptivos están alineados a lo largo de un eje (figura 3.14, izquierda). Así, estas células son selectivas para la posición de una barra, o sea, responden con excitación o con inhibición según ésta caiga sobre una u otra parte del campo receptivo (figura 3.14,

derecha). Además, son selectivas para la orientación de la misma, ya que sólo responden si la barra está dispuesta en la dirección adecuada. En el campo receptivo de las células complejas no existe una región excitatoria y una región inhibitoria; por consiguiente, estas células no son selectivas para la posición de la barra, aunque sí para su orientación. (figura 3.15, izquierda). Por otra parte, estas células son selectivas para el sentido del movimiento, esto es, responden sólo si una barra con la orientación adecuada se desplaza hacia un lado y no hacia el contrario (figura 3.15, derecha).

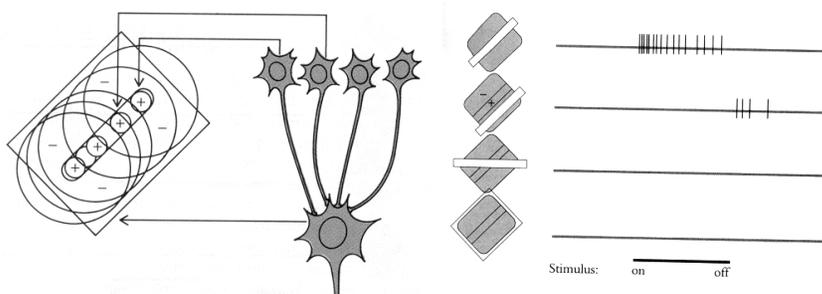


Figura 3.14. Izquierda: arquitectura para la construcción de una célula simple a partir de células de Tipo I. Derecha: ilustración de las respuestas de una célula simple a diferentes estímulos; la respuesta es excitatoria o inhibitoria según la posición de la barra, y no hay respuesta si la orientación de la misma no es la adecuada.

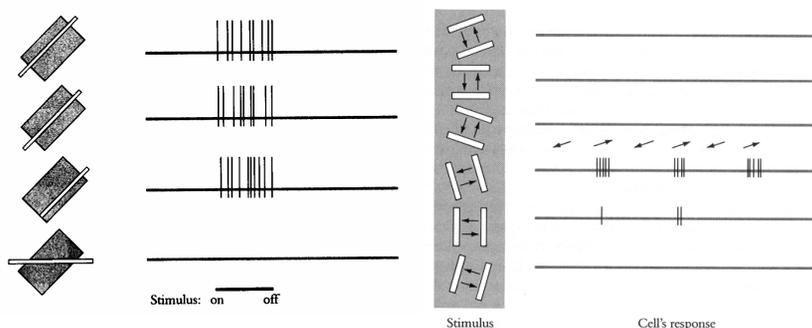


Figura 3.15. Izquierda: ilustración de las respuestas de una célula compleja a diferentes estímulos; la respuesta es excitatoria independientemente de dónde esté la barra, pero sólo con la orientación adecuada. Derecha: la célula sólo responde si la barra con la orientación adecuada se desplaza asimismo en el sentido adecuado.

Las CSFs acromáticas de las células simples tienen forma de pasa-banda, aunque la banda de frecuencias dentro de la cual responden cambia notablemente de unas células a otras (figura 3.16) [DeValois et al. (1982)]. Estas CSFs se corresponden razonablemente bien con las bandas de respuesta de los canales de frecuencias determinados mediante métodos psicofísicos (figura 3.17) [Wilson y Gelb (1984)].

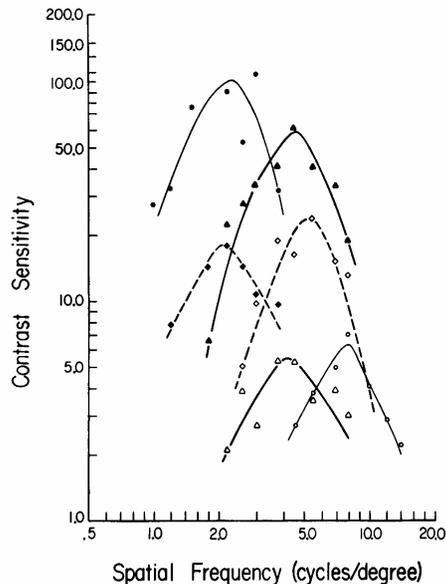


Figura 3.16. Curvas de sensibilidad al contraste espacial acromático de seis células simples representativas del córtex estriado [DeValois et al. (1982)].

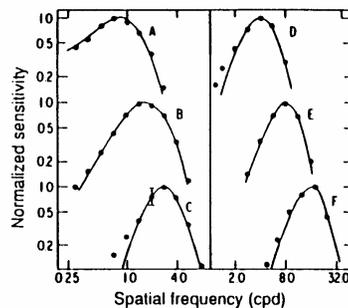


Figura 3.17. Respuestas de los seis canales de frecuencias espaciales obtenidas mediante métodos psicofísicos [De Wilson y Gelb (1984)].

3.5. Reflexiones sobre la naturaleza de los canales cromático y acromático

Las propiedades de las células del Magno parecen las adecuadas para que este camino sea el soporte fisiológico del canal que en psicofísica llamaríamos acromático, ya que contiene células sin oponencia espectral, cuya sensibilidad espectral se parece mucho a la curva de eficiencia luminosa relativa, $V(\lambda)$. Con un mapa de inputs de Tipo III, sería además un canal puramente acromático, ya que estas células son capaces de responder a variaciones de luminancia adecuadamente distribuidas espacialmente, pero no a variaciones de color. Por el contrario, las propiedades de las células del Parvo parecen las adecuadas para soportar lo que en psicofísica llamaríamos canales cromáticos (rojo-verde y azul-amarillo), ya que sus células tienen una u otra clase de oponencia espectral. Sin embargo, la mayor parte de las células oponentes son de Tipo I, cuya oponencia, recordemos, es rojo-verde. Sólo una pequeña porción de células oponentes tiene el mapa de inputs de Tipo II, cuya oponencia es azul-amarillo. Un canal azul-amarillo podría estar soportado por estas células, que de hecho se localizan en la retina, en el LGN y en los blobs del córtex estriado [Wiesel y Hubel (1966), De Monasterio y Gouras (1975), Reid y Shapley (1992)]. El eje neutro del canal azul-amarillo perceptual determinado mediante cancelación del tono [Jameson y Hurvich (1955)] es consistente con su eje neutro. Sin embargo, las células de Tipo I responden, como dijimos anteriormente, tanto a variaciones de luminancia como de color. En general, un estímulo visual puede ser simultáneamente una variación de luminancia y de color, y por consiguiente en la respuesta de una célula de Tipo I no habría manera de saber qué parte es debida a la señal de luminancia y cuál a la señal de color. Se dice que la información sobre la luminancia y el color está multiplexada en la respuesta de estas células. Mediante inputs de los cuatro grupos de células de Tipo I se pueden construir, a nivel cortical, diferentes estructuras espaciales más sofisticadas que se comportarían como un canal cromático puro rojo-verde o como un canal acromático (aunque, atención, de origen Parvocelular) [Ingling y Martínez-Uriegas (1983), Martínez-Uriegas (1990), Gouras (1991), Kingdom y Mullen (1995)]. Es probable que éste, y no el Magno, sea el canal acromático que participa en la

codificación de la luminosidad de los objetos. Por otra parte, el eje neutro del canal rojo-verde perceptual tiene dos puntos neutros localizados en 475 y 580 nm, y sin embargo las células con oponencia rojo-verde del LGN tienen un solo punto neutro alrededor de 570 nm. Es posible que los canales perceptuales se formen en V4 mediante inputs de células o mosaicos de células con oponencia rojo-verde y azul-amarillo procedentes de los blobs del córtex estriado [T'so y Gilbert (1986)], pero también son posibles otras muchas arquitecturas.

Capítulo 4. Teorías y modelos de la visión del color

A partir de las experiencias psicofísicas que hemos descrito en el capítulo 2 podemos formular modelos matemáticos de la visión del color que expliquen cómo funciona el sistema visual. Para construir uno, seleccionamos un conjunto de datos experimentales y proponemos operaciones que los reproduzcan. El modelo se prueba realizando predicciones sobre fenómenos que no se encuentren dentro del conjunto de datos utilizado en su construcción, y comprobando experimentalmente la validez de dichas predicciones. Debe tenerse en cuenta que si bien podemos demostrar que un modelo es falso si encontramos una experiencia que contradiga las predicciones del mismo, no es posible probar su validez completa. Sin embargo, y a pesar de la imposibilidad de saber si el sistema visual realiza o no las operaciones propuestas por un modelo, los fisiólogos pueden encontrar en ellos claves valiosas sobre el funcionamiento del mismo: si se predicen adecuadamente los resultados experimentales, es posible que el sistema visual realice alguna de las operaciones indicadas en el modelo, de manera que los fisiólogos saben entonces qué propiedades deberían tener las células que intervienen en el proceso visual. Y a la inversa, los descubrimientos fisiológicos sobre el sistema visual se introducen en los modelos, perfeccionándolos. Los modelos actuales explican todavía tan sólo un rango limitado de los fenómenos de la visión del color. En lo que sigue, proponemos un breve recorrido por la historia de las teorías y modelos de la visión del color, desde las ideas primitivas.

4.1. La teoría tricromática, la teoría de los colores oponentes y los modelos de zonas anteriores a 1955

4.1.1. La teoría tricromática de Young-Helmholtz

A principios del siglo XIX, Thomas Young [Young (1802)] propuso un modelo para explicar la trivariación visual. Si era posible igualar un color mediante mezcla de un primario rojo, otro verde y otro azul, la causa debería radicar en la existencia de tres tipos de receptores, rojos, verdes y azules, que responderían, en mayor o menor medida, a cada uno de estos primarios. Young llegó a proponer que la respuesta de estos receptores debía ser de espectro ancho, que la sensación de color dependería de la relación entre las respuestas de los tres tipos de receptores, y que no podría tenerse sensación de color con la respuesta de un solo tipo de receptor. Esta propuesta, en contradicción con la teoría vigente de la visión del color, que le atribuía una base puramente física [Newton (1672, 1704)], y falta del apoyo de un conocimiento de la fisiología de la retina, fue ignorada durante años. Después de que los experimentos de Maxwell y Grassman [Maxwell (1872)] establecieran firmemente el carácter tricromático de la visión del color, Helmholtz [Helmholtz (1911)] recogió y desarrolló las ideas de Young, proponiendo un modelo de tres receptores con las siguientes propiedades:

- (1) Cada mecanismo sensorial posee una curva de sensibilidad espectral, $j_i(\lambda)$.
- (2) Los mecanismos son lineales. La respuesta total de cada mecanismo a una luz de espectro $P(\lambda)$ viene dada por:

$$J_i = \int j_i(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4.1)$$

- (3) El color es una función de los valores relativos de las tres respuestas, J_1 , J_2 y J_3 .
- (4) La luminosidad es función de las tres respuestas. La expresión más simple será la siguiente, siendo I_1 , I_2 e I_3 constantes:

$$Q = I_1 J_1 + I_2 J_2 + I_3 J_3 \quad (4.2)$$

Las leyes de Grassman y Abney implican la linealidad de los receptores, y a la inversa. J_i serían los valores triestímulo en un espacio de representación en el que $j_i(\lambda)$ serían las funciones de igualación e I_i las unidades tricromáticas. La teoría de Young supone que es posible encontrar tres primarios que describirían las sensibilidades de los tres hipotéticos mecanismos. Dicho sistema de primarios constituiría un conjunto de fundamentales. Para poder explicar los datos de igualación del color, debe existir alguna relación lineal entre estos primarios y las funciones de igualación del color, por ejemplo, en XYZ. Sin embargo, existen infinitos conjuntos de fundamentales que cumplirían este requisito. Por tanto, para elegir un conjunto concreto de primarios serían necesarios más datos que las igualaciones de color. Si exigimos que las respuestas de los mecanismos sean siempre positivas, en consonancia con la idea de que representan absorciones de pigmentos, restringimos los primarios posibles a primarios imaginarios. Una restricción adicional sería exigir $J_1 = J_2 = J_3$ para el blanco, aunque esta restricción carece de motivación más allá de situar el blanco en el centro del diagrama.

La teoría de Young-Helmoltz es obviamente insuficiente para explicar la apariencia del color. Para justificar fenómenos como por ejemplo el efecto Helmholtz-Kohlrausch es necesario suponer que los fotorreceptores interaccionan en alguna etapa del sistema visual. Los modelos de zonas proponen la forma de dicha interacción.

4.1.2. La teoría de los colores oponentes: las ideas de Hering

Ewald Hering [Hering (1878)] supuso la existencia de procesos visuales capaces de generar señales neuronales de dos tipos opuestos, dependiendo de la longitud de onda del estímulo. Dichos procesos explican que percibamos una variedad grande, pero con combinaciones limitadas, de tonos que varían en luminosidad y colorido. Es decir, estos procesos explican que los tonos puedan describirse mediante los nombres rojo, amarillo, verde y azul, y los tonos intermedios mediante rojo amarillento (o amarillo rojizo), amarillo verdoso (o verde amarillento), verde azulado (o azul verdoso) y azul

rojizo (o rojo azulado), mientras que jamás encontramos rojos verdosos, (o verdes rojizos), ni amarillos azulados (o azules amarillentos). La teoría de Hering se basa en que, cuando a un sujeto se le pide que seleccione colores únicos, siempre encuentra cuatro: un azul de 475 nm, un verde de 500 nm, un amarillo sobre 580 nm y un rojo, mezcla de un rojo y de un violeta de los extremos del espectro. Con estos colores más el blanco y el negro podría definirse un sistema de representación del color basado en tres ejes, como se muestra en la figura 4.1:

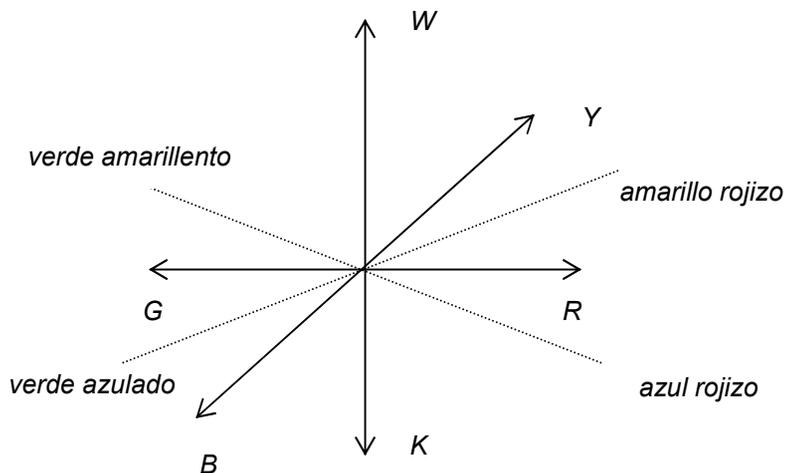


Figura 4.1. Sistema de representación del color de tres ejes.

Los estímulos acromáticos se representan sobre el eje vertical. Para estímulos de saturación creciente, nos alejamos en la dirección radial. La luminosidad del estímulo viene determinada por su componente acromática (proyección sobre el eje vertical), que a su vez depende del estado de adaptación y de la posición del estímulo en la retina. No obstante, la componente cromática (proyección sobre el plano RYGB) también influye en la luminosidad. Los cuatro primarios R-G e Y-B son antagónicos; no así los primarios W y K, que pueden estar presentes simultáneamente: el gris resulta de un cierto equilibrio entre el blanco y el negro. El rojo se opone al verde (no hay rojos

verdosos ni verdes rojizos), el amarillo se opone al azul (no hay amarillos azulados ni azules amarillentos). Las propiedades de cada pareja de primarios antagonista pueden relacionarse con las de dos procesos oponentes: un proceso rojo-verde y otro azul-amarillo. En estos procesos, la respuesta del amarillo es de signo contrario a la del azul, y la del rojo de signo contrario a la del verde. Cada proceso tiene, por tanto, dos subprocesos de signo contrario. Los tonos intermedios dependen de la interacción entre los mecanismos oponentes.

Con esta teoría puede explicarse que colores complementarios, al mezclarse, generen un estímulo acromático, ya que estimulan subprocesos de distinto signo, con lo que la cromaticidad se cancela y sólo queda la luminosidad. El efecto Bezold-Brücke se explica admitiendo que la respuesta de los mecanismos depende del estado de adaptación. También puede ofrecerse alguna interpretación para la inducción.

4.1.3. Los modelos de zonas: la teoría de Müller-Judd

El modelo de Young-Helmoltz era capaz de explicar la tricromacia, los umbrales y las formas defectivas de la visión del color, pero no la apariencia del color. La teoría de Hering, por el contrario, explicaba al menos ciertos efectos de la apariencia del color, pero fallaba al explicar la visión variante puesto que, aunque predice la existencia de defectos rojo-verde y amarillo-azul o la ceguera total al color, es incapaz de predecir la protanopía. La deuteranopía resultaría de un fallo en el mecanismo rojo-verde.

El conjunto de fenómenos que puede explicarse es mucho mayor si se considera que el sistema visual está organizado en una serie de etapas, la primera de las cuales es una etapa tricromática como en el modelo de Young-Helmholtz, siendo la segunda una etapa oponente, como en el modelo de Hering. Este tipo de modelos se denominan modelos de zonas [Donders (1881)].

Las ideas que acabamos de citar están presentes en la teoría de Müller sobre el sistema visual, que postula la existencia de tres etapas de procesado: una primera etapa fotoquímica, una segunda

etapa cromática y una etapa final de excitación del nervio óptico. El modelo matemático de la teoría de Müller [Müller (1924, 1930)], elaborado por Judd [Judd (1949)], hace uso de los siguientes datos:

1. Propiedades de igualación del color de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes.
2. Datos sobre el estímulo acromático.
3. Datos del amarillo único.

1ª Etapa: Etapa de conos

Se postulan tres tipos de conos, cada uno de ellos con su propia curva de sensibilidad espectral, que puede expresarse como combinación lineal de las funciones de igualación de un tricrómata normal, representado por las funciones de igualación en XYZ:

$$\begin{pmatrix} \bar{p}_1(\lambda) \\ \bar{p}_2(\lambda) \\ \bar{p}_3(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1956 & 2.4478 & 0.6434 \\ -2.5455 & 7.0492 & 0.4963 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Estos fundamentales, a veces denominados de tipo König, se obtienen a partir de los centros de confusión de los dicrómatas, suponiendo que las coordenadas de éstos son:

$$\begin{aligned} x_{pc} &= 0.747 & y_{pc} &= 0.253 \\ x_{dc} &= 1 & y_{dc} &= 0.000 \\ x_{tc} &= 0.165 & y_{tc} &= 0.000 \end{aligned} \quad (4.4)$$

En un lenguaje más moderno diríamos que la ecuación 4.3 no es más que un cambio de base desde el espacio XYZ a un espacio LMS cuyos primarios son los centros de confusión. Para un color cualquiera C, la ecuación 4.3 se escribiría de la forma:

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1956 & 2.4478 & 0.6434 \\ -2.5455 & 7.0492 & 0.4963 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

donde P_1, P_2, P_3 son los valores triestímulo de C.

2ª Etapa: Codificación intermedia de las señales de los conos

Se postulan dos canales oponentes, el canal rojo amarillento-verde azulado, yR-bG, simbolizado por $\alpha_1(\lambda)$, y el canal amarillo verdoso-azul rojizo, gY-rB, simbolizado por $\alpha_2(\lambda)$, que se obtienen como combinaciones lineales de los fundamentales de la forma:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1(\lambda) \\ \alpha_2(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0.0151 & -0.384 & -0.4000 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{p}_1(\lambda) \\ \bar{p}_2(\lambda) \\ \bar{p}_3(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

3ª Etapa: Codificación neural final

Esta etapa, de tipo Hering, consta de dos procesos oponentes, rojo-verde (R-G), simbolizado por $\beta_1(\lambda)$, y amarillo-azul (Y-B), simbolizado por $\beta_2(\lambda)$, así como de un proceso no oponente, acromático (W-K), simbolizado por $\beta_3(\lambda)$. De nuevo las salidas de estos procesos se obtienen como combinaciones lineales de la forma:

$$\begin{aligned} \beta_1(\lambda) &= \alpha_1(\lambda) - 0.6265\alpha_2(\lambda) \\ \beta_2(\lambda) &= 0.1622\alpha_1(\lambda) + \alpha_2(\lambda) \\ \beta_3(\lambda) &= 0.075\bar{p}_1 + 0.1912\bar{p}_2 + 0.0013\bar{p}_3 + 0.0810\alpha_1 + 0.0024\alpha_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 se puede reescribir de una forma muy sencilla en términos de las funciones de igualación XYZ:

$$\begin{aligned}\beta_1(\lambda) &= 6.325(\bar{x}(\lambda) - \bar{y}(\lambda)) \\ \beta_2(\lambda) &= 2.004(\bar{y}(\lambda) - \bar{z}(\lambda)) \\ \beta_3(\lambda) &= \bar{y}(\lambda)\end{aligned}\quad (4.8)$$

La teoría de Müller-Judd explica la protanopía como un fallo del canal yR-bG ($\alpha_1(\lambda)=0$) de la segunda etapa. La deuteranopía se explica como un fallo del canal R-G ($\beta_1(\lambda)=0$) y la tritanopía como un fallo de gY-rB ($\alpha_2(\lambda)=0$). Por consiguiente, la $V(\lambda)$ de un deuteranope sería como la de un observador normal, esto es:

$$V_D(\lambda) = V_N(\lambda) = \bar{y}(\lambda) \quad (4.9)$$

mientras que la de un protanope sería:

$$V_P(\lambda) = 0.075\bar{p}_1(\lambda) + 0.1912\bar{p}_2(\lambda) + 0.0013\bar{p}_3(\lambda) + 0.0024\alpha_2(\lambda) \neq V_N(\lambda) \quad (4.10)$$

y la de un tritanope:

$$V_T(\lambda) = 0.075\bar{p}_1(\lambda) + 0.1912\bar{p}_2(\lambda) + 0.0013\bar{p}_3(\lambda) + 0.0810\alpha_1(\lambda) \neq V_N(\lambda) \quad (4.11)$$

Entre otras cosas, este modelo permite reproducir razonablemente los umbrales de discriminación de longitud de onda.

4.2. El experimento de cancelación de tono y el modelo de Hurvich y Jameson

4.2.1. El experimento de cancelación de tono

Hemos visto que, según las ideas de Hering, cada color puede describirse como mezcla de cuatro colores o tonos únicos, azul, verde, amarillo y rojo, y que la gama de combinaciones posibles es restringida. Dorothea Jameson y Leo M. Hurvich realizaron en 1955 un experimento basado en esta idea: el experimento de cancelación del tono [Jameson y Hurvich (1955)]. Utilizaron los tres tonos únicos espectrales de un observador y un rojo del extremo del espectro como

estímulos de cancelación. El observador debía añadir a un estímulo espectral uno de los estímulos de cancelación, hasta conseguir que en el estímulo espectral no quedase ningún rastro del color complementario al de cancelación. Por ejemplo, un color espectral naranja produciría sensaciones de rojo y amarillo en cierta proporción; si el observador añadiera azul, cancelarían la sensación de amarillo y quedaría un estímulo rojo; si añadiera verde, cancelarían la sensación de rojo y el estímulo quedaría amarillo. Los resultados de realizar este experimento con todos los estímulos espectrales con igual energía se muestran en la figura 4.2.

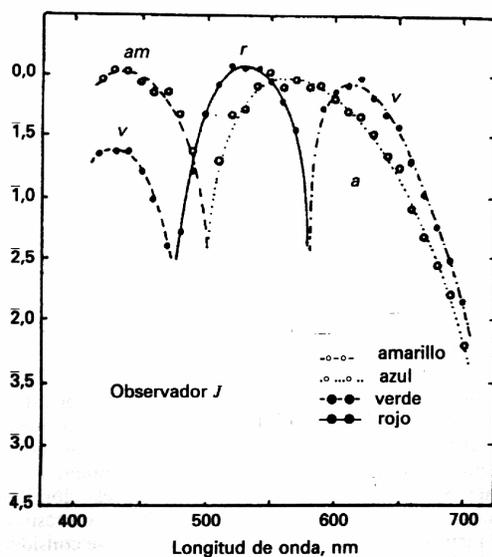


Figura 4.2. Energía de los estímulos de cancelación en el experimento de Jameson y Hurvich.

Para el escalado relativo de los dos tramos del par azul-amarillo se impuso que la sensación de azul del azul único fuera igual a la sensación de amarillo del amarillo único; análogamente, para escalar los dos tramos del par rojo-verde se impuso que la sensación de rojo del rojo único fuera igual a la sensación de verde del verde único. Por último, para escalar un par frente al otro se hacían coincidir en alguna longitud de onda que produjera la misma sensación del

color de un par que del color del otro par; por ejemplo, el naranja de 600 nm se puede describir como igual de rojo que de amarillo.

Analicemos con un poco más de detalle este resultado. Vemos que los estímulos de longitud de onda inferior a 475 nm se perciben predominantemente azules, aunque con cierta componente rojiza; por consiguiente, es necesario añadir amarillo para cancelar la sensación de azul, y una cantidad menor de verde para cancelar la sensación de rojo. El tono del estímulo de 475 nm se cancela añadiendo únicamente amarillo: el azul puede identificarse entonces como un tono único, que no contiene ni rojo ni verde. Desde el 475 nm al 500 nm estamos en la zona de los azules verdosos; aquí será pues necesario añadir amarillo para compensar la componente azul, y rojo para compensar la componente verde; como puede apreciarse, la cantidad de amarillo es superior a la de rojo, por lo que estos estímulos se perciben como azules verdosos, no como verdes azulados. El 500 nm es, de nuevo, un tono único, puesto que para cancelarlo basta añadir rojo; no es, por tanto, ni un verde azulado ni un verde amarillento. Del 500 nm hasta el 575 nm estamos en la región de los verdes amarillentos, de manera que necesitamos rojo para cancelar la componente verde y una proporción mayor de azul para cancelar la componente amarilla. En el 575 nm sólo necesitamos la componente azul, ya que es el amarillo único. Del amarillo único hasta el 600 nm, aproximadamente, tenemos los amarillos rojizos. En esta región añadimos verde para cancelar la componente roja y una proporción mayor de azul para cancelar la componente amarilla. Del 600 nm hasta el final del espectro tenemos la región roja, en la que el tono se cancela con verde y una proporción menor de azul, lo que indica una componente amarilla en estos colores espectrales.

Así pues, la cantidad de cada estímulo de cancelación que añadimos nos proporciona información sobre las distintas componentes del color espectral que consideremos. Por ejemplo, el azul que añadimos nos informa de que existe una componente amarilla. Por consiguiente, podemos considerar que la energía del estímulo de cancelación que añadimos para cancelar el tono de un estímulo es una medida de la componente del color complementario que contiene (ver figura 4.3).

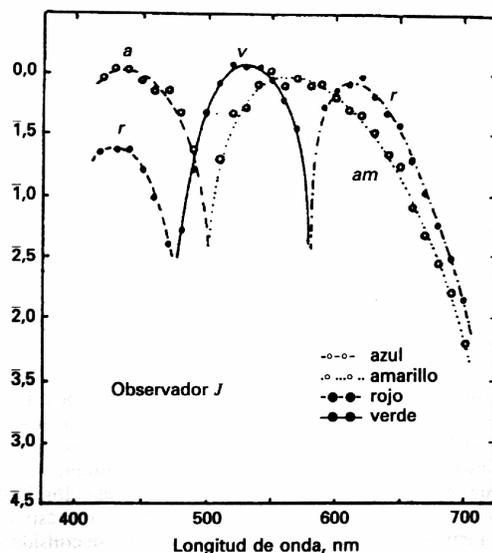


Figura 4.3. Magnitud de las sensaciones cromáticas en el experimento de Jameson y Hurvich.

4.2.2. Sensibilidad espectral de los mecanismos oponentes

Las ideas de Hering y los resultados del experimento de cancelación de tono invitan a pensar que existen en el sistema visual, además del mecanismo acromático (en adelante A), un mecanismo (en adelante T, de tritanópico) que dice si un estímulo es rojo o verde, pero que nunca diría que es ambas cosas simultáneamente, y un mecanismo (en adelante D, de deuteranópico) que dice si es azul o amarillo, pero nunca ambas cosas simultáneamente. Las sensibilidades espectrales de los mecanismos oponentes se pueden derivar de las curvas del experimento de Jameson y Hurvich si les exigimos que cumplan algunas propiedades:

- Los tres mecanismos son lineales.
- La sensibilidad espectral del mecanismo A es la $V(\lambda)$ fotópica de parpadeo.

- c) La respuesta de T a estímulos en cuya descripción aparece la componente “rojo” es positiva, mientras que si aparece la componente “verde” es negativa.
- d) Un estímulo que no aparece ni como verdoso ni como rojizo da respuesta cero en este canal.
- e) La respuesta de D a estímulos en cuya descripción aparece la componente “azul” es negativa, mientras que si aparece la componente “amarillo” es positiva.
- f) Un estímulo que no aparece ni como azulado ni como amarillento da respuesta cero en este canal.

Puesto que hemos admitido que los tres mecanismos son lineales, para caracterizarlos desde el punto de vista espectral basta con medir su sensibilidad espectral, definida como la respuesta a estímulos de energía unidad constante. Denotaremos dichas sensibilidades por $A(\lambda)$, $T(\lambda)$ y $D(\lambda)$, donde λ simboliza un estímulo espectral de energía unidad.

Por hipótesis, $A(\lambda)=V(\lambda)$. Para determinar $T(\lambda)$ y $D(\lambda)$ haremos uso de los resultados experimentales de Jameson y Hurvich. Los estímulos de cancelación son: rojo (R), verde (G), amarillo (Y) y azul (B). Dado el estímulo espectral λ , de energía $E(\lambda)$, el observador añadirá R o G en la cantidad suficiente como para que la mezcla no se perciba ni verdosa ni rojiza, respectivamente: en estas condiciones la respuesta del canal T será cero. Si $E_\lambda(R)$ y $E_\lambda(G)$ denotan, respectivamente, la energía de rojo y verde utilizadas por el observador para alcanzar esta condición, podremos escribir:

$$T(E(\lambda)\lambda + E_\lambda(R)R + E_\lambda(G)G) = 0 \quad (4.12)$$

donde $E_\lambda(R) \neq 0 \Leftrightarrow E_\lambda(G) = 0$, puesto que para conseguir que el estímulo no sea ni verdoso ni rojizo, o añadimos rojo o añadimos verde, pero no ambos a la vez. Ya que hemos admitido que el mecanismo T es lineal, la ecuación 4.12 podrá escribirse como:

$$E(\lambda)T(\lambda) + E_\lambda(R)T(R) + E_\lambda(G)T(G) = 0 \quad (4.13)$$

de donde la sensibilidad espectral $T(\lambda)$ no será más que:

$$T(\lambda) = -(E_\lambda(R)T(R) + E_\lambda(G)T(G)) / E(\lambda) \quad (4.14)$$

donde $E_\lambda(R) \neq 0 \Leftrightarrow E_\lambda(G) = 0$. La ecuación 4.14 tiene dos incógnitas, $T(R)$ y $T(G)$. Para intentar calcularlas, pidamos al observador que determine la energía de R, $E_G(R)$, que hay que añadir a G para que la mezcla no sea ni rojiza ni verdosa. Es decir, resolvamos la ecuación:

$$T(G + E_G(R)R) = 0 \quad (4.15)$$

De aquí, admitiendo que T es lineal,

$$T(G) = -E_G(R)T(R) \quad (4.16)$$

Así, de 4.14 y 4.16, obtenemos $T(\lambda)$ salvo un factor de escalado:

$$T(\lambda) = T(R)(E_\lambda(G)E_G(R) - E_\lambda(R)) / E(\lambda) \quad (4.17)$$

Con el canal D procederemos de manera análoga: en un segundo experimento, pedimos al observador que añada a cada λ las energías adecuadas de Y o B para que la mezcla no aparezca ni azulada ni amarillenta, respectivamente. En tal caso, la respuesta de D será cero. Si $E_\lambda(Y)$ y $E_\lambda(B)$ denotan, respectivamente, la energía de amarillo y azul utilizadas por el observador para alcanzar esta condición, podremos escribir:

$$D(E(\lambda)\lambda + E_\lambda(Y)Y + E_\lambda(B)B) = 0 \quad (4.18)$$

donde $E_\lambda(Y) \neq 0 \Leftrightarrow E_\lambda(B) = 0$, puesto que para conseguir que el estímulo no sea ni azulado ni amarillento, o añadimos amarillo o añadimos azul, pero no ambos a la vez. De 4.18, admitiendo que D es lineal, tendremos:

$$E(\lambda)D(\lambda) + E_\lambda(Y)D(Y) + E_\lambda(B)D(B) = 0 \quad (4.19)$$

de donde la sensibilidad espectral $D(\lambda)$ no será más que:

$$D(\lambda) = -(E_\lambda(Y)D(Y) + E_\lambda(B)D(B)) / E(\lambda) \quad (4.20)$$

De nuevo, esta ecuación tiene dos incógnitas, $D(Y)$ y $D(B)$. Para calcularlas, pedimos al observador que determine la energía de Y , $E_B(Y)$, que debe añadirse a B para que la mezcla no aparezca ni azulada ni amarillenta. Tenemos entonces:

$$D(B+E_B(Y)Y)=0 \quad (4.21)$$

y por tanto:

$$D(B)=-E_B(Y)D(Y) \quad (4.22)$$

Con 4.20 y 4.22, $D(\lambda)$ queda determinado, salvo un factor de escalado:

$$D(\lambda)=D(Y)(E_{\lambda}(B)E_B(Y)-E_{\lambda}(Y))/E(\lambda) \quad (4.23)$$

Para determinar las constantes de escalado global $D(Y)$ y $T(R)$ basta con encontrar algún estímulo espectral λ_e que parezca tan azulado como rojizo, o tan azulado como verdoso, o tan amarillo como rojizo, o tan amarillo como verdoso. Por ejemplo, como se ha comentado anteriormente, el estímulo de 600 nm cumple en particular la condición de ser igual de rojo que amarillo. Tenemos, por tanto:

$$D(\lambda_e)=T(\lambda_e) \quad (4.24)$$

De 4.17, 4.23 y 4.24 se deriva:

$$D(Y)(E_{\lambda_e}(B)E_B(Y)-E_{\lambda_e}(Y))/E(\lambda_e)=T(R)(E_{\lambda_e}(G)E_G(R)-E_{\lambda_e}(R))/E(\lambda_e) \quad (4.25)$$

Simplificando y despejando $D(Y)$ obtenemos finalmente:

$$D(Y)=T(R)(E_{\lambda_e}(G)E_G(R)-E_{\lambda_e}(R))/(E_{\lambda_e}(B)E_B(Y)-E_{\lambda_e}(Y)) \quad (4.26)$$

Los canales resultantes se muestran en la figura 4.4.

Sólo quedaría determinar el escalado relativo de los dos mecanismos oponentes y el mecanismo acromático. Por definición, el mecanismo acromático se normaliza a la unidad en su máximo.

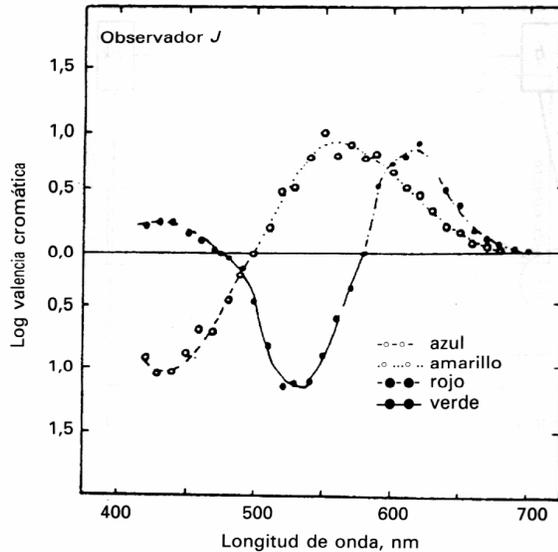


Figura 4.4. Canales perceptuales cromáticos de Jameson y Hurvich.

4.2.3. El modelo de Hurvich y Jameson

Las sensibilidades oponentes $T(\lambda)$ y $D(\lambda)$ obtenidas en el apartado anterior se pueden describir en términos de las funciones de igualación XYZ [CIE (1932)] de la forma:

$$T(\lambda) = 1.0 \cdot \bar{x}(\lambda) - 1.0 \cdot \bar{y}(\lambda) \quad (4.27)$$

$$D(\lambda) = 0.4 \cdot \bar{y}(\lambda) - 0.4 \cdot \bar{z}(\lambda) \quad (4.28)$$

Estas ecuaciones no representan el efecto inicial de la luz, sino el resultado de diferencias entre señales neuronales que dependen a su vez de ciertos procesos fotoquímicos. En su primera versión del modelo [Hurvich y Jameson (1955, 1957)] Hurvich y Jameson propusieron cuatro mecanismos diferentes, r, g, y, b (ver fórmulas 6.5 a 6.8). La sensibilidad espectral del mecanismo oponente rojo-verde se obtenía a partir de las respuestas del mecanismo r y del g; análogamente, la sensibilidad del mecanismo oponente amarillo-azul

se obtenía a partir de las respuestas de los mecanismos y, b. El mecanismo acromático recibía señal de los cuatro mecanismos, pudiéndose demostrar que era proporcional a $\bar{y}(\lambda)$. Los máximos de sensibilidad de r, g, y, b están muy próximos, y la sensibilidad del mecanismo r se extiende hasta las cortas longitudes de onda.

En una formulación alternativa del modelo se pueden sustituir estos cuatro mecanismos r, g, y, b por tres mecanismos α , β , γ cuyas sensibilidades espectrales se escriben como combinaciones lineales de las funciones de igualación XYZ de la forma:

$$\begin{pmatrix} \alpha(\lambda) \\ \beta(\lambda) \\ \gamma(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 6.5341 & 0.1336 \\ -0.3368 & 7.0009 & 0.0020 \\ 0.3329 & 6.4671 & -0.1347 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

Los máximos de estas sensibilidades están muy próximos entre sí, y la sensibilidad $\alpha(\lambda)$ se extiende hasta las cortas longitudes de onda. Las respuestas de los mecanismos se combinan formando los canales acromático, rojo-verde y amarillo-azul mediante la siguiente transformación:

$$\begin{pmatrix} A(\lambda) \\ T(\lambda) \\ D(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha(\lambda) \\ \beta(\lambda) \\ \gamma(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

La combinación de estas dos etapas da lugar a las expresiones de las fórmulas 4.27 y 4.28.

Esta última formulación del modelo presenta una primera fase tricromática y una segunda fase oponente, pero sus mecanismos $\alpha(\lambda)$, $\beta(\lambda)$, $\gamma(\lambda)$ no pueden considerarse todavía equivalentes a los tres tipos de conos existentes en la retina. Los propios Jameson y Hurvich reconocieron la necesidad de modificar la fase tricromática de su modelo [Jameson y Hurvich (1968)] a la luz del posterior descubrimiento de las curvas de absorción de los conos [Brown y Wald (1963, 1964), Marks, Dobbelle y MacNichol (1964)].

4.3. Modelos lineales con una transformación oponente

A partir del trabajo de Jameson y Hurvich se propusieron otros modelos de zonas con la misma estructura básica: una etapa tricromática y otra en la que las señales de conos se combinaban generando un canal acromático y dos canales cromáticos. Estos modelos, además, incorporaron a su fase tricromática los datos experimentales disponibles sobre pigmentos de conos. A continuación revisaremos algunos de los más conocidos: el modelo de Ingling y Tsou, el modelo de Guth, Massof y Benzschawel, y quizá el modelo de esta clase más usado hoy en día: el modelo de Boynton.

4.3.1. El modelo de Ingling y Tsou

La estructura de este modelo [Ingling y Tsou (1977)] es similar en algunos aspectos a la del de Hurvich y Jameson. El procesado visual se inicia en una etapa tricromática que en este caso sí reproduce el funcionamiento de los conos en la retina, con máximos de sensibilidad en las regiones de longitudes de onda cortas (S), medias (M) y largas (L). Las respuestas de estos receptores se combinan formando dos canales oponentes cromáticos rojo-verde (T) y amarillo-azul (D) y un canal acromático (A).

Etapa de conos

Se postula que la sensibilidad de los receptores corresponde a los fundamentales de Smith y Pokorny [Smith y Pokorny (1975)], que expresados como combinaciones lineales de las funciones de igualación XYZ, incluyendo la modificación de Judd, se escriben:

$$\begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2435 & 0.8524 & -0.0516 \\ -0.3954 & 1.1642 & 0.0837 \\ 0 & 0 & 0.6220 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}'(\lambda) \\ \bar{y}'(\lambda) \\ \bar{z}'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

Se trata de fundamentales de tipo König normalizados a la unidad. La hipótesis de König se escribe en general de la forma:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{cp} & x_{cd} & x_{ct} \\ y_{cp} & y_{cd} & y_{ct} \\ z_{cp} & z_{cd} & z_{ct} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_p & 0 & 0 \\ 0 & k_d & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

Nótese que esta condición no es más que un cambio de base desde el espacio XYZ a un espacio en el que los primarios son los centros de confusión dicromáticos. Las coordenadas de los centros de confusión determinados por Smith y Pokorny son:

$$\begin{aligned} x_{pc} &= 0.7465 & x_{dc} &= 1.4000 & x_{tc} &= 0.1749 \\ y_{pc} &= 0.2535 & y_{dc} &= -0.4000 & y_{tc} &= 0.0000 \\ z_{pc} &= 0.0000 & z_{dc} &= 0.0000 & z_{tc} &= 0.8252 \end{aligned} \quad (4.33)$$

Las constantes de la matriz diagonal se calculan para que los fundamentales estén normalizados a la unidad. Las sensibilidades de estos tres mecanismos se muestran en la figura 5.2.

Etapa oponente

El paso de conos a canales oponentes viene dado por la siguiente transformación matricial:

$$\begin{pmatrix} A(\lambda) \\ T(\lambda) \\ D(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 \\ 1.2 & -1.6 & 0.4 \\ 0.24 & 0.11 & -0.7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

El modelo de Ingling y Tsou no considera contribución de los conos S en el canal acromático, que se forma por sumas de L y M. El canal T presenta una oponencia L-M, incluyendo una contribución menor y positiva de S. El canal D presenta una oponencia (L+M)-S. Las sensibilidades espectrales ATD resultantes son similares a las del modelo de Hurvich y Jameson (ver figura 4.5).

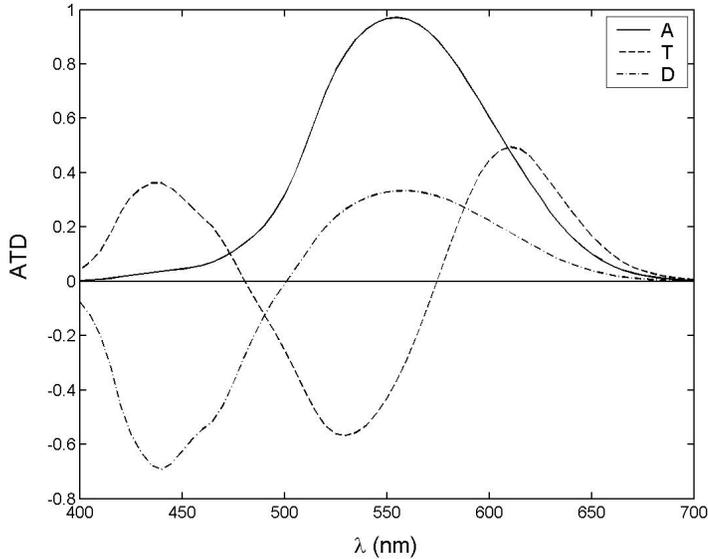


Figura 4.5. Canales perceptuales del modelo de Ingling y Tsou.

4.3.2. El modelo de Guth, Massof y Benzschawel

El modelo de Guth, Massof y Benzschawel [Guth et al. (1980)] está especialmente concebido para reproducir datos sobre aditividad de luminosidades, incluyendo además de manera explícita versiones para las distintas formas de dicromacía. La primera etapa del modelo utiliza los fundamentales de Smith y Pokorny normalizados a la unidad, igual que en el de Ingling y Tsou. En la segunda etapa se postula que los conos S no contribuyen ni al canal acromático ni al canal oponente T, y que los conos M no contribuyen al canal oponente D. Las sensibilidades espectrales de los canales (figura 4.6) se derivan de los conos mediante la ecuación:

$$\begin{pmatrix} A(\lambda) \\ T(\lambda) \\ D(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5967 & 0.3654 & 0 \\ 0.9553 & -1.2836 & 0 \\ -0.0284 & 0 & 0.0483 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

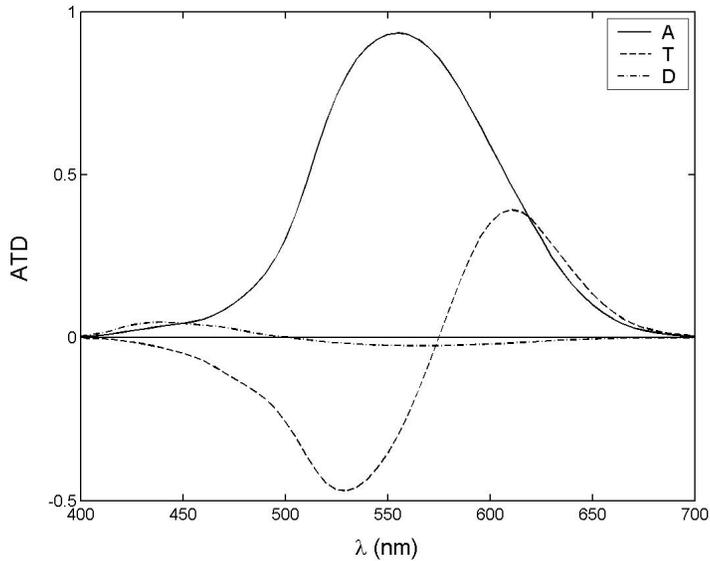


Figura 4.6. Canales perceptuales del modelo de Guth, Massof y Benzschawel.

Hay que resaltar que este modelo no predice la contribución positiva de la curva del canal T en las cortas longitudes de onda, y por tanto es incapaz de explicar la componente roja del tono percibido en esta región del espectro en el experimento de cancelación de tono de Jameson y Hurvich.

4.3.3. El modelo de Boynton

En este modelo [Boynton (1986)] las sensibilidades espectrales de los conos son las de los fundamentales de Smith y Pokorny, con L y M escalados de forma que la suma de $L(\lambda)$ y $M(\lambda)$ sea igual a la $V(\lambda)$ modificada por Judd. Para S se impone como condición de escalado que en $\lambda=498$ nm se cumpla $L(\lambda)+M(\lambda)=S(\lambda)$; esto garantiza que un canal D propuesto con la forma $L+M-S$ tenga un punto neutro en 498 nm. Con estas condiciones, las sensibilidades espectrales de los conos tienen la siguiente forma (ver figura 4.7):

$$\begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15516 & 0.54308 & -0.03287 \\ -0.15516 & 0.45692 & 0.03287 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}'(\lambda) \\ \bar{y}'(\lambda) \\ \bar{z}'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

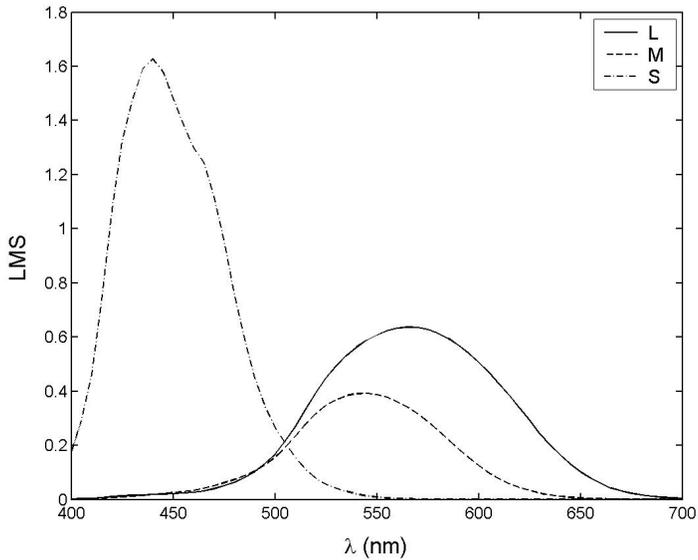


Figura 4.7. Fundamentales de Smith y Pokorny con las condiciones de escalado de Boynton.

De lo dicho anteriormente es trivial deducir que el canal acromático se obtiene como la suma de las respuestas de los conos L y M, sin contribución de los conos S. El canal T se define de manera que su punto neutro esté en 570 nm e imponiendo que no recibe señal de los conos S. Con la condición impuesta anteriormente para el escalado relativo entre L y M, necesariamente T debe ser de la forma $L-2M$, ya que $L=2M$ en 570 nm. La forma de D ya ha quedado determinada por el escalado de los conos S. Todas estas ideas se resumen en la siguiente ecuación (ver figura 4.8):

$$\begin{pmatrix} A(\lambda) \\ T(\lambda) \\ D(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

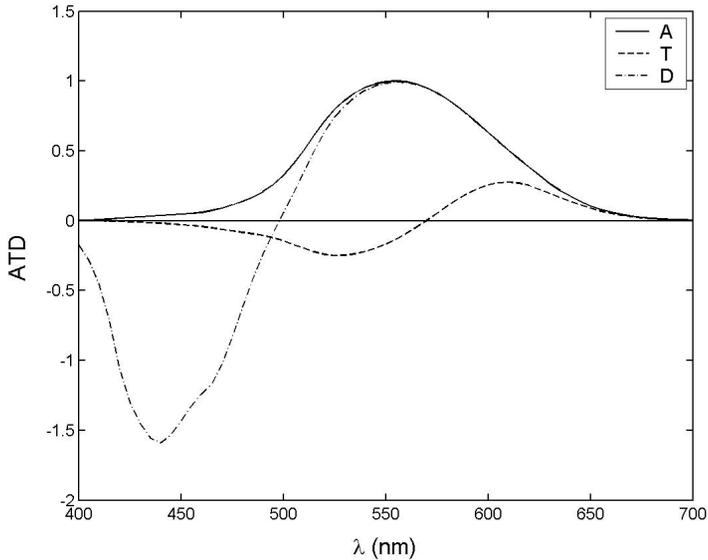


Figura 4.8. Canales ATD del modelo de Boynton.

Este modelo es también incapaz de explicar la componente roja percibida en las cortas longitudes de onda en el experimento de cancelación de tono. Los puntos neutros del modelo (las longitudes de onda en las que se anulan los canales) coinciden en buena medida con los de las células rojo-verde y amarillo-azul del LGN.

4.4. Modelos lineales con más de una transformación oponente: el modelo de DeValois y DeValois

Las diferencias observadas entre las sensibilidades espectrales de las células del LGN y los canales de Jameson y Hurvich hicieron que algunos investigadores se plantearan la necesidad de añadir a sus modelos una etapa adicional que tuviera en cuenta la transformación entre las respuestas del LGN y la percepción final del color, localizada al parecer en una fase posterior del proceso visual.

Uno de estos modelos, basado en mayor grado que los anteriores en consideraciones fisiológicas y anatómicas, es el de DeValois y DeValois [DeValois y DeValois (1993)], que consta de una etapa tricromática asociada a los conos y dos etapas oponentes asociadas al LGN y al córtex visual. La primera etapa oponente consta de tres canales oponentes, y se puede asociar al conjunto de las células Parvo bipolares, ganglionares y del LGN. La segunda etapa oponente, localizada en el córtex visual, consta de un canal rojo-verde, un canal azul-amarillo y un canal acromático, aunque los autores se concentraron sólo en la formulación de los dos canales cromáticos.

Primera etapa: conos

Se parte de los fundamentales LMS de Smith y Pokorny normalizados a la unidad, como en el modelo de Ingling y Tsou o el de Guth et al.. Más adelante se hará uso de las proporciones de conos en la retina, que son 10:5:1.

Segunda etapa: células ganglionares y del LGN

Desde los conos, el camino Magnocelular está constituido por las células bipolares Magno, que tienen conexiones directas con varios conos L y M, y están conectadas a las células ganglionares Magno, que a su vez transmiten las señales a las células Magno del LGN sin modificación de la información. Cada bipolar Magno recibe en su centro inputs de cuatro conos L y dos conos M como promedio, y en su periferia, a través de las células horizontales, inputs de signo contrario de los tres tipos de conos en proporción 10:5:1. La respuesta resultante constituye la señal del Magno, con una curva de sensibilidad sin oponentencia espectral, muy parecida a la $V(\lambda)$, y con campos receptivos de gran tamaño, de centro on o de centro off, asociados a las bajas frecuencias espaciales. Esta señal del Magno permanece separada del camino Parvocelular hasta el córtex.

El camino Parvocelular parte de los conos y continúa con las células bipolares Parvo, que tienen conexión directa con un solo cono, L, M o S. Éstas están conectadas a las células ganglionares Parvo, que a su vez transmiten las señales a las células Parvo del LGN sin

modificación de la información. Los centros de los campos receptivos de las bipolares Parvo se deben a conexiones directas con un solo cono, que puede ser L, M o S. Las periferias de los campos receptivos se deben a conexiones por medio de células horizontales que conectan a las bipolares indistintamente con conos L, M y S, en proporción 10:5:1. La periferia va asociada a un mecanismo sustractivo, de forma que la señal de salida se obtiene restando las señales de centro y periferia, con pesos relativos iguales para ambos. Dicha señal de salida es, en el caso de centro L:

$$L_0 = 16L - (10L + 5M + S) = 6L - 5M - S \quad (4.38)$$

que es bastante similar a un canal de tipo L-M. Para M se tiene:

$$M_0 = 16M - (10L + 5M + S) = 11M - 10L - S \quad (4.39)$$

bastante similar a un canal M-L, aunque en este caso ligeramente asimétrico con respecto a L_0 . Por último, para S tenemos:

$$S_0 = 16S - (10L + 5M + S) = 15S - 10L - 5M \quad (4.40)$$

que se puede asociar a un canal de tipo S-(L+M) teniendo en cuenta la proporción 2:1 entre los conos L y los conos M. En resumen, esta primera transformación lineal de las sensibilidades espectrales se puede expresar matricialmente de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} L_0(\lambda) \\ M_0(\lambda) \\ S_0(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & -5 & -1 \\ -10 & 11 & -1 \\ -10 & -5 & 15 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

Estas L_0 , M_0 , S_0 (ver figura 5.7) se generan en las bipolares Parvo de centro on, que son las que se despolarizan con incrementos de luz. De igual forma existen bipolares Parvo de centro off, que se despolarizan con decrementos de luz y que dan lugar a señales $-L_0$, $-M_0$, $-S_0$ iguales que las anteriores pero cambiadas de signo.

Tercera etapa: córtex visual

Combinando las LMS_0 y $-LMS_0$ podemos obtener señales asociadas a células corticales, algunas de las cuales responderán a cambios de cromaticidad, respondiendo otras a cambios de luminancia. Las que detectan cambios de cromaticidad tienen entradas de distinto signo de L_0 y M_0 , formándose los canales perceptuales rojo-verde ($T(\lambda)=R(\lambda)=R^*(\lambda)-G^*(\lambda)$) y azul-amarillo ($D(\lambda)=B(\lambda)=B^*(\lambda)-Y^*(\lambda)$) mediante sumas y restas de S_0 a L_0-M_0 , con los pesos correspondientes para LMS_0 , que en este caso son 10:5:2.

$$R(\lambda) = +10L_0(\lambda) - 5M_0(\lambda) + 2S_0(\lambda) \quad (4.42)$$

$$B(\lambda) = -10L_0(\lambda) + 5M_0(\lambda) + 2S_0(\lambda) \quad (4.43)$$

$$G(\lambda) = -R(\lambda) \quad (4.44)$$

$$Y(\lambda) = -B(\lambda) \quad (4.45)$$

Expresado en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} R(\lambda) \\ Y(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & -5 & 2 \\ 10 & -5 & -2 \\ -10 & 5 & -2 \\ -10 & 5 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_0(\lambda) \\ M_0(\lambda) \\ S_0(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

Los autores interpretan esta transformación suponiendo que inicialmente hay sólo un eje neutro L_0-M_0 , al que podría llamarse “eje naranja-cyan”, que es modulado por S_0 de dos formas distintas, dando lugar a los ejes neutros T y D. Esta propuesta está basada en los datos conocidos sobre porcentajes de conos S, que son demasiado bajos como para que el canal azul-amarillo surja de la comparación entre los S y el resto de conos. Según los autores, son los conos M los que más contribuyen a dicho canal. Esto concuerda con el hecho de que en algunas situaciones especiales en las que no actúan los conos S, como la tritanopía unilateral, se siga teniendo percepción de azul. En la figura 4.9 se muestran estos canales oponentes perceptuales.

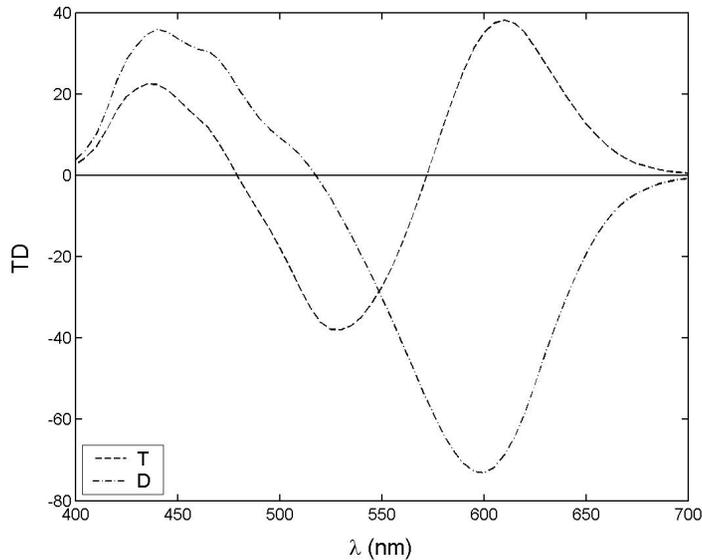


Figura 4.9. Canales oponentes perceptuales del modelo de DeValois y DeValois.

Hay evidencias experimentales de que en etapas corticales posteriores a V1 existen células de sensibilidad espectral no oponente selectivas a colores particulares: rojo, amarillo, verde o azul. Los cuatro mecanismos equivalentes $RYGB^*(\lambda)$ se obtienen sometiendo las curvas oponentes $RYGB(\lambda)$ definidas en la ecuación 4.46 a un proceso de rectificación de media onda en el que se anulan sus tramos negativos (figura 4.10).

En cuanto al canal acromático Parvo, consta de unidades corticales para altas frecuencias espaciales, con inputs de L_0 o de M_0 , y otras unidades asociadas a frecuencias menores, con inputs de tipo L_0+M_0 o incluso $L_0+M_0+S_0$. Algunas de estas células responderían a aumentos y otras a disminuciones de la luminosidad. Los autores no han proporcionado más información acerca de las ecuaciones asociadas a las sensibilidades de los canales acromáticos Magno y Parvo, ni acerca de la interacción entre dichos canales.

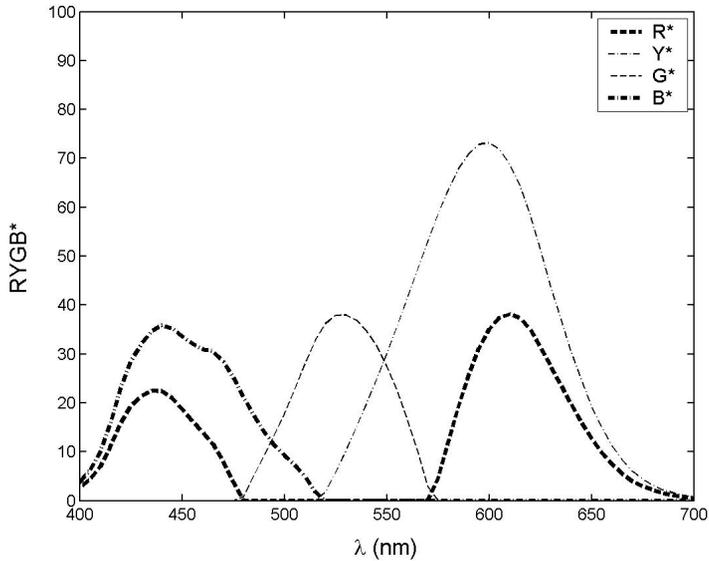


Figura 4.10. Mecanismos perceptuales $RYGB^*(\lambda)$ del modelo de DeValois y DeValois.

En un estudio posterior [DeValois et al. (1997)] DeValois y DeValois y colaboradores introdujeron modificaciones en los coeficientes utilizados para generar los mecanismos $RYGB(\lambda)$ previos a la rectificación, a fin de ajustar las predicciones de su modelo a un conjunto de datos experimentales sobre estimación de tono según los cuales el giro de los tonos únicos rojo y verde desde el eje L_0 - M_0 no es de igual amplitud, ocurriendo lo mismo con los tonos únicos amarillo y azul:

$$\begin{pmatrix} R(\lambda) \\ Y(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & -5 & 1 \\ 10 & -5 & -3.5 \\ -10 & 5 & -2 \\ -10 & 5 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_0(\lambda) \\ M_0(\lambda) \\ S_0(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.47)$$

Los mecanismos perceptuales modificados y rectificadas se muestran en la figura 4.11.

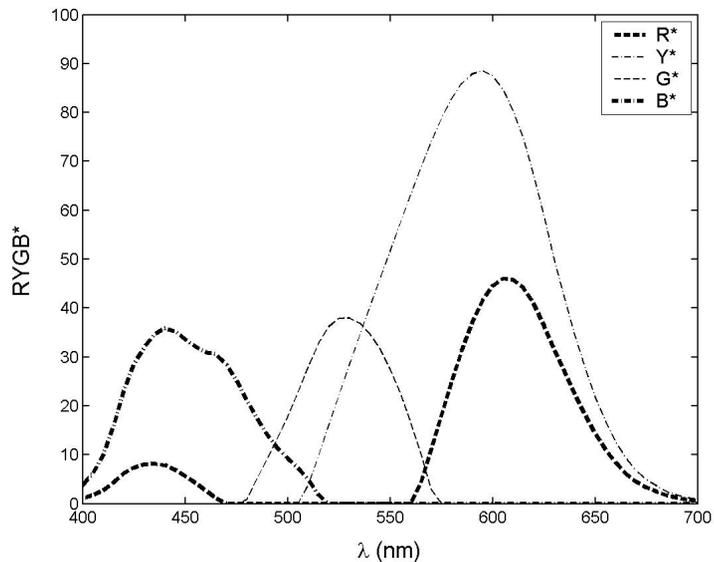


Figura 4.11. Mecanismos perceptuales $RYGB^*(\lambda)$ del modelo de DeValois y DeValois modificado.

4.5. Modelos no lineales con una transformación oponente: CIELAB

Los modelos de zonas analizados hasta ahora, independientemente de si tienen una o dos etapas oponentes, consisten exclusivamente en transformaciones lineales de las funciones de igualación XYZ. Sin embargo, se ha demostrado experimentalmente que las respuestas de algunas células del sistema visual no son lineales, lo cual hace pensar en la posibilidad de introducir operaciones no lineales en los modelos. El espacio uniforme CIELAB es, en cierto modo, el primer modelo con una transformación oponente en el que se incluyeron no linealidades.

En 1976, la CIE propuso dos nuevos espacios de color que se han venido utilizando hasta la actualidad: los espacios uniformes CIELUV y CIELAB [Robertson (1977)]. El sistema CIELUV es una

modificación del UCS-1960/64 con unas nuevas coordenadas u' y v' definidas por las ecuaciones:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (4.48)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (4.49)$$

en tanto que el sistema CIELAB es una versión simplificada de la fórmula de Adam-Nickerson, que por entonces era recomendada por numerosas organizaciones. Sus coordenadas $L^*a^*b^*$ vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (4.50)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (4.51)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (4.52)$$

donde la función f se define como:

$$f(\omega) = \begin{cases} \omega^{1/3} & \omega > 0.008856 \\ 7.787\omega + 16/116 & \omega \leq 0.008856 \end{cases} \quad (4.53)$$

XYZ son los valores triestímulo del estímulo considerado y XYZ_n los valores triestímulo del blanco de referencia, bajo las mismas condiciones de iluminación. La fórmula para calcular la diferencia de color en CIELAB viene dada por la correspondiente distancia euclídea, esto es:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (4.54)$$

Aunque el espacio CIELAB se propuso explícitamente a efectos de cálculo de diferencias de color, hay que hacer notar que puede ser entendido como modelo de apariencia del color. En efecto, la normalización de los valores triestímulo respecto de un blanco de referencia es, de hecho, una transformada de adaptación cromática de

tipo Von Kries, aunque la normalización está hecha en XYZ en lugar de en LMS. Terstiege [Terstiege (1972)] se refirió a esto como una pseudotransformada de Von Kries. Gracias a esta etapa, las predicciones que se realizan con CIELAB sobre pares correspondientes son razonablemente comparables a las que se obtienen con un simple Von Kries o con un modelo de adaptación cromática mucho más elaborado, como por ejemplo el RLAB de Fairchild [Fairchild (1991, 1996)]. A continuación se aplica una no linealidad compresiva en forma de potencia de exponente 1/3. Por último, las ecuaciones 4.51 y 4.52 representan en realidad transformaciones opuestas como las que aparecen en los modelos de zonas y en los modelos de apariencia. De hecho, $f(X/X_n) - f(Y/Y_n)$ y $f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)$ no hacen más que reproducir las respuestas de los canales cromáticos perceptuales de Jameson y Hurvich. Sin embargo, los descriptores perceptuales que se pueden predecir con CIELAB son sólo la terna básica constituida por la claridad, el tono y el croma, definidos como:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (4.55)$$

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (4.56)$$

$$h_{ab} = \arctg(b^*/a^*) \quad (4.57)$$

Además, los descriptores cromáticos son insensibles a las variaciones de la iluminación y tampoco hay manera de considerar el efecto que produce en la apariencia del color cualquier cambio del entorno, etc. Así pues, podríamos concluir que CIELAB es un modelo de apariencia del color en la forma más simple posible.

4.6. Modelos no lineales con más de una transformación opoente

Con el paso del tiempo han ido apareciendo nuevos modelos de visión del color con estructuras cada vez más complejas que, acercándose en mayor o menor grado a la fisiología del sistema visual, han conseguido explicar satisfactoriamente un número creciente de fenómenos psicofísicos de diversa índole. A continuación analizaremos dos modelos algunas de cuyas ideas se aproximan

bastante a las utilizadas en nuestra propia propuesta: el modelo de Valberg et al. y el modelo de Guth.

4.6.1. El modelo de Valberg et al.

Para la construcción de espacios de color uniformes pueden seguirse distintos criterios. Un criterio razonable consiste en tratar de imponer que el espacio reproduzca los resultados del atlas Munsell, que es un espacio perceptual, pero otra opción es utilizar funciones que representen de la forma más fiel posible el funcionamiento fisiológico del sistema visual. El espacio SVF [Seim y Valberg (1986)] sigue una línea mixta, ya que se impone que reproduzca los loci de croma Munsell constante haciendo uso de sucesivas transformaciones inspiradas en cierta medida en las fases de procesado que sigue el sistema visual. Explicamos a continuación los pasos para su consecución.

Dado un estímulo de coordenadas cromáticas xy y factor de luminancia Y bajo iluminante C , y calculados sus valores triestímulo, con Y normalizada a 1, obtenemos las excitaciones relativas de los conos, S'_i , mediante la transformación:

$$\begin{pmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = (a_{ij}) \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.58)$$

donde (a_{ij}) es la matriz de los fundamentales de Pitt [Pitt (1944)], aunque los autores han hecho notar que el resultado no cambia de manera significativa si se utilizan otros fundamentales [Vos y Walraven (1971), Vos (1978), Smith y Pokorny (1975), Estévez (1979)].

Se introduce entonces una etapa de adaptación cromática, de tipo Von Kries, en la que los coeficientes de la matriz de adaptación son las excitaciones S'_{iW} calculadas con la expresión 4.58 correspondientes a los valores triestímulo normalizados del iluminante C : $XYZ_W = (0.9817, 1, 1.1818)$.

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/S'_{1w} & 0 & 0 \\ 0 & 1/S'_{2w} & 0 \\ 0 & 0 & 1/S'_{2w} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} \quad (4.59)$$

Las respuestas de los tres tipos de conos, $v(S)$, se obtienen a partir de las excitaciones S_i mediante la expresión:

$$v(S) = \begin{cases} \frac{(S - S_0)^n}{(S - S_0)^n + k} & \text{si } S \geq S_0 \\ 0 & \text{si } S < S_0 \end{cases} \quad (4.60)$$

donde S_0 es un valor umbral. La respuesta final de los mecanismos es:

$$V(S) = V_M v(S) \quad (4.61)$$

donde la constante de escalado V_M es diferente para cada mecanismo.

En particular, la respuesta de los conos a un estímulo acromático de luminancia Y se calcula con una expresión formalmente análoga a la 4.60:

$$v_1(Y) = \begin{cases} \frac{(100Y - 0.43)^{0.51}}{(100Y - 0.43)^{0.51} + 31.75} & \text{si } Y \geq 0.0043 \\ 0 & \text{si } Y < 0.0043 \end{cases} \quad (4.62)$$

$$V_Y = 40v_1(Y) \quad (4.63)$$

A partir de las respuestas de los conos se calculan p_1 y p_2 :

$$p_1 = v_1(S_1) - v_1(Y) \quad (4.64)$$

$$p_2 = \begin{cases} v_1(S_3 = Y) - v_1(S_3) & \text{si } S_3 \leq Y \\ v_2(S_3 = Y) - v_2(S_3) & \text{si } S_3 > Y \end{cases} \quad (4.65)$$

Los $v_1(S_3)$ y $v_1(S_1)$ se calculan sustituyendo Y por S_3 y S_1 , respectivamente, en la expresión de $v_1(Y)$, y $v_2(S_3)$ se calcula sustituyendo Y por S_3 en la expresión de $v_2(Y)$, donde

$$v_2(Y) = \begin{cases} \frac{(100 Y/k(V_Y) - 0.1)^{0.86}}{(100 Y/k(V_Y) - 0.1)^{0.86} + 103.2} & \text{si } Y \geq 0.001k(V_Y) \\ 0 & \text{si } Y < 0.001k(V_Y) \end{cases} \quad (4.66)$$

siendo

$$k(V_Y) = 0.140 + 0.175V_Y \quad (4.67)$$

Finalmente, el estímulo se describe mediante V_Y y las coordenadas oponentes F_1 y F_2 , que son transformaciones de p_1 y p_2 , definidas como sigue:

$$F_1 = 700p_1 - 54p_2 \quad (4.68)$$

$$F_2 = 96.5p_2 \quad (4.69)$$

de manera que la diferencia de color en este espacio se expresa como:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta F_1)^2 + (\Delta F_2)^2 + (2.3\Delta V_Y)^2} \quad (4.70)$$

Como se ha comentado antes, paralelamente a la presentación de este espacio uniforme Valberg y colaboradores propusieron un modelo de zonas fisiológico, probando que las operaciones anteriores se podían describir en términos de respuestas de diferentes clases de células, a nivel del LGN y el córtex visual [Valberg et al. (1986)]. Según los autores, hay seis clases de células oponentes distintas en el camino Parvocelular, a nivel del LGN [Lee et al. (1987)]. De los cuatro tipos que reciben exclusivamente inputs de conos L y M, dos tienen polaridad +L-M y otros dos +M-L, pudiendo ser de centro on o de centro off. Los dos últimos tipos de células reciben inputs de conos S, que pueden ser excitatorios o inhibitorios. En la tabla 4.1 se explican en detalle las características de cada tipo de célula.

	WL (wide-long wavelength)	WS (wide-short wl.)	NL (narrow-long wl.)	NS (narrow-short wavelength)
Región excitatoria	$\lambda > 500$ nm	$\lambda < 600$ nm	$\lambda > 600$ nm	$\lambda < 500$ nm
Anchura de banda	Ancha	Ancha	Estrecha	Estrecha
Magnitud de la Inhibición	Débil	Débil	Fuerte	Fuerte
Grado de oponencia	Débil	Débil	Fuerte	Fuerte
Respuesta a un encendido acrom.	Excitatoria	Excitatoria	Inhibitoria	Inhibitoria
Máxima respuesta cromática	Colores claros	Colores claros	Colores oscuros	Colores oscuros
Equivalente DeValois et al.	+Y+B	+G+R	+R+G	+B-Y
Inputs	+L-M	+M-L ⁽²⁾	-M+L	-L+M
Equivalente Wiesel y Hubel	Tipo I (Centro rojo on)	Tipo I (Centro verde on)	Tipo I (Centro verde off)	Tipo I (Centro rojo off)
	Tipo II		Tipo II	Tipo II (Centro azul on)

Tabla 4.1. Características de las células del LGN [Lee et al. (1987)]. Notas: (1) Son escasas, y estrictamente son +M-S-L, con input de L menor. (2) Algunas podrían tener además un input de S sinérgico con M. (3) El componente inhibitorio de estas células podría ser también M o L+M.

Para la obtención de las sensibilidades espectrales asociadas a estas células del LGN, Lee y colaboradores parten de las funciones de igualación XYZ CIE1931 [CIE (1932)], aplicándoles la siguiente matriz para obtener una versión ligeramente modificada de los fundamentales de Estévez [Estévez (1979)]:

$$\begin{pmatrix} L_E(\lambda) \\ M_E(\lambda) \\ S_E(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0629 & 0.1210 & -0.0106 \\ -0.0679 & 0.2242 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0.1777 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.71)$$

Los coeficientes de la matriz son los adecuados para que las tres curvas de Estévez encierren la misma área, de forma que un blanco de 110 cd/m² y coordenadas xy=(0.404,0.410) dé como resultado LMS_E=(19.6,18.0,8.26). Se aplica esta misma matriz a un blanco equienergético de 110 cd/m² para obtener LMS_W. Las fórmulas empleadas para los cálculos posteriores contienen una serie de constantes cuyos valores numéricos en función del tipo de célula se muestran en la tabla 4.II.

	σ_L	σ_M	σ_S	A_L	A_M	A_S
+L-M(WL)	0.44	0.38		625	-575	0
-M+L(NL)	0.11	0.07		139	-160	0
+M-L(WS)	1.44	1.38		-463	508	0
-L+M(NS)	0.11	0.09		-234	208	0
+S-L(NS)	0.43		0.48	-199	0	138
+M-S(WL)	14.9	7.26	20.1	-147	338	-236

Tabla 4.II. Coeficientes empleados en el cálculo de las respuestas de células del LGN de Lee et al..

Los valores de las σ de esta tabla son relativos; se multiplicó σ_L por el correspondiente valor triestímulo L_W para obtener la σ_L definitiva, y lo mismo con σ_M y M_W , y con σ_S y S_W . Una vez hecho esto, se aplica a L_E la siguiente no linealidad de tipo Naka-Rushton, procediendo de igual forma para M_E y S_E :

$$L(\lambda) = \frac{L_E(\lambda)^{0.7}}{L_E(\lambda)^{0.7} + \sigma_L^{0.7}} \quad (4.72)$$

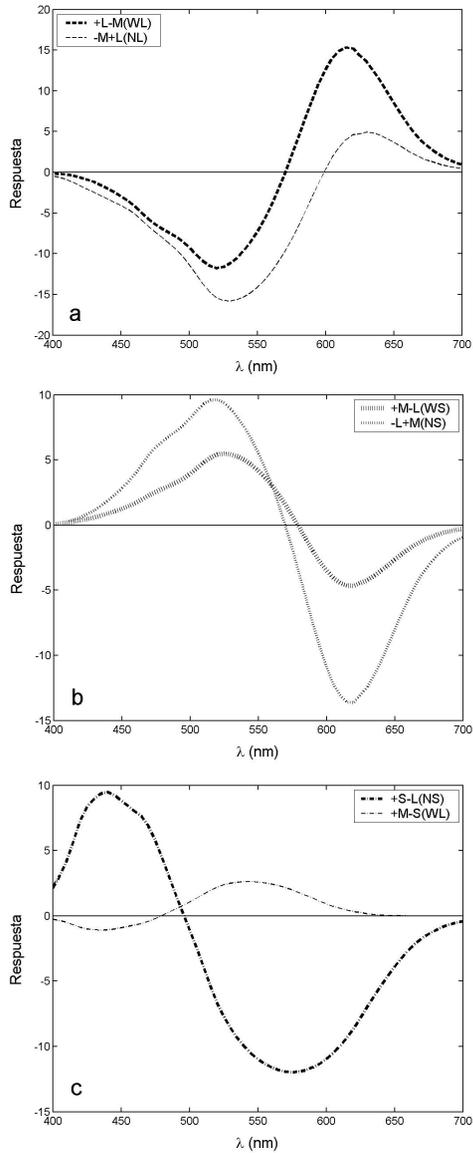


Figura 4.12. Respuestas de células del LGN obtenidas por Lee y colaboradores. a) Células con polaridad +L-M; b) Células con polaridad +M-L; c) Células con input de conos S.

Las respuestas de las células se obtienen calculando en cada caso:

$$R(\lambda) = A_L \cdot L(\lambda) + A_M \cdot M(\lambda) + A_S \cdot S(\lambda) \quad (4.73)$$

Las sensibilidades espectrales resultantes se muestran en la figura 4.12.

Valberg et al. probaron que el comportamiento de la coordenada $p_1(\lambda)$ del espacio de Seim y Valberg con la luminancia se puede imitar sumando las respuestas para la longitud de onda λ de las dos células con polaridad +L-M (una con centro L-on y otra con centro M-off) si p_1 es positivo, o de las células con polaridad +M-L (una con centro M-on y otra con centro L-off) si p_1 es negativo. De esto cabe inferir que en algunas células del sistema visual, presumiblemente a nivel cortical, deberían realizarse esta clase de sumas. Denominamos $p_1^*(\lambda)$ a las respuestas intermedias de estas células. Por otra parte, el comportamiento de la coordenada $p_2(\lambda)$ del espacio uniforme con la luminancia se imita con la respuesta de células con input S excitatorio o inhibitorio según p_2 sea positivo o negativo. Se supone que en este caso las señales no experimentan ninguna interacción intermedia, es decir, que viajan desde el LGN al mismo nivel cortical donde se generan las $p_1^*(\lambda)$ sin sufrir allí ninguna modificación. Denominamos $p_2^*(\lambda)$ a las respuestas de las presuntas células que reciben dichas señales. Finalmente, $p_1^*(\lambda)$ y $p_2^*(\lambda)$ interaccionan de la siguiente manera para generar el canal perceptual rojo-verde $F_1^*(\lambda)$ y el azul-amarillo $F_2^*(\lambda)$:

$$F_1^*(\lambda) = 1.5 \cdot p_1^*(\lambda) - 0.5 \cdot p_2^*(\lambda) \quad (4.74)$$

$$F_2^*(\lambda) = 0.7 \cdot p_2^*(\lambda) \quad (4.75)$$

Valberg y Seim demostraron que el modelo resultante era capaz de predecir correctamente al menos el efecto Bezold-Brücke y el efecto Hunt [Valberg y Seim (1991)]. El modelo de Valberg et al. es probablemente el modelo fisiológico más elaborado del que se dispone hasta el momento.

4.6.2. El modelo ATD de Guth

El modelo de zonas CA90 propuesto por Guth [Guth (1991, 1992)] consta de una etapa de receptores, una primera etapa oponente que se podría asociar al LGN, y una segunda etapa oponente perceptual. Incluye también un control de ganancia multiplicativo y no linealidades de tipo Naka-Rushton. En la primera revisión del modelo [Guth (1993)] se modificaron las matrices de transformación de las etapas oponentes y la estructura del control de ganancia, y se añadió otra no linealidad de tipo potencial. En las revisiones siguientes [Guth (1994a, 1994b, 1995)] hubo pequeños cambios en los valores numéricos de los parámetros para ajustar mejor determinadas colecciones de datos experimentales. En un capítulo posterior compararemos las predicciones de la versión de 1995 (denominada ATD95) con las de nuestro modelo ATTD de visión del color. Para una explicación detallada de la estructura de ATD95, véase el apéndice A.

4.7. Descriptores perceptuales en un modelo de zonas

Las expresiones propuestas para los descriptores perceptuales del color a partir de las señales de los canales acromático, rojo-verde y azul-amarillo varían de unos modelos a otros.

Un modelo válido de visión del color debe predecir una dependencia de la luminosidad con la cromaticidad del estímulo. Así, aun cuando la forma funcional de la luminosidad puede cambiar de un modelo a otro, en todos los casos debe depender de la respuesta del canal acromático y de los canales cromáticos. En el modelo de Hurvich y Jameson, la luminosidad se obtiene a partir de la suma del valor absoluto de las señales de los tres canales:

$$Q = |A| + |T| + |D| \quad (4.76)$$

Otros modelos como el de Ingling y Tsou, el de Guth et al. y ATD95, por el contrario, postulan una interacción vectorial entre las señales, de manera que la luminosidad será el módulo del vector ATD:

$$Q = \sqrt{A^2 + T^2 + D^2} \quad (4.77)$$

Es posible que esta concepción se pueda aplicar asimismo al modelo de Boynton. Valberg et al. no proponen ninguna expresión para la luminosidad, y en el modelo de DeValois y DeValois no se define ningún descriptor perceptual.

El tono de un estímulo vendrá dado por la relación entre las respuestas de los dos canales cromáticos. En el modelo de Hurvich y Jameson se definen los denominados coeficientes de tono, dados por las expresiones:

$$\frac{|T|}{|T|+|D|} \quad (4.78)$$

$$\frac{|D|}{|T|+|D|} \quad (4.79)$$

En los modelos posteriores es sin embargo más habitual introducir un ángulo de tono, esto es:

$$H = \text{arctg}\left(\frac{D}{T}\right) \quad (4.80)$$

La saturación de un estímulo debe representar una medida de la respuesta cromática independientemente de la luminosidad. En el modelo de Hurvich y Jameson esta concepción se recoge en la expresión:

$$s = \frac{|T|+|D|}{|A|+|T|+|D|} \quad (4.81)$$

En los modelos posteriores, respetando el significado del término, se redefine la saturación como la distancia al blanco del espacio,

independientemente de la luminancia. Teniendo en cuenta que el valor de T y D en el blanco es 0, la expresión usual para la saturación será:

$$s = \frac{\sqrt{T^2 + D^2}}{A} \quad (4.82)$$

En ninguno de estos modelos se define explícitamente el colorido. Sin embargo, es razonable asignar a éste el numerador de la saturación:

$$M = \sqrt{T^2 + D^2} \quad (4.83)$$

De esta manera se puede entender la saturación como el colorido por unidad de luminancia. Si en vez de dividir por A dividiéramos el colorido por la expresión de la luminosidad, conseguiríamos una interpretación de la saturación razonablemente acorde con la definición del vocabulario de términos colorimétricos de la CIE (ver apéndice C):

$$s = \frac{\sqrt{T^2 + D^2}}{\sqrt{A^2 + T^2 + D^2}} \quad (4.84)$$

Aunque CIELAB ha sido descrito previamente, por ser el primer modelo con una transformación opoente que incluyó no linealidades, lo excluimos de este apartado porque los descriptores que proporciona son de colores relacionados, como corresponde a un modelo de apariencia.

4.8. Modelos de apariencia del color

Los llamados modelos de apariencia del color se pueden definir como modelos que proporcionan los distintos descriptores perceptuales de colores relacionados para diferentes condiciones de observación. Requieren como información básica los valores triestímulo del test, del adaptador y de una referencia de reflectancia espectral plana que contiene la información sobre el color del iluminante, así como sobre el nivel absoluto de la iluminación. Algunos

requieren además información adicional sobre el modo de apariencia y el grado de adaptación cromática. A grandes rasgos, la estructura de un modelo de apariencia empieza con una transformada de adaptación cromática, seguida de una fase oponente y de una definición de los descriptores perceptuales. Aunque algunas de las expresiones utilizadas por estos modelos tienen cierta inspiración fisiológica, la mayoría de las etapas intermedias no intentan reproducir el funcionamiento real del sistema visual. Esta libertad a la hora de proponer etapas adicionales en la estructura para conseguir mejores predicciones de los distintos fenómenos psicofísicos hace que los modelos de apariencia sean normalmente mucho más complejos que los modelos descritos hasta ahora, lo cual afecta a la rapidez de cálculo que se puede conseguir con ellos desde el punto de vista computacional. De igual forma, las expresiones propuestas para los descriptores perceptuales son más complejas que las citadas en el caso de los modelos anteriores, a fin de que los resultados se ajusten mejor a los datos experimentales.

Existe un comité de la CIE (TC1-34, Testing colour appearance models) encargado de evaluar el funcionamiento de los diferentes modelos de apariencia y recomendar el de mejores prestaciones para su uso generalizado. Con este fin se comparan sus predicciones de efectos como los de Helson-Judd, Stevens, Hunt o Helmholtz-Kohlrausch, de los resultados de Bartleson y Breneman, de descuento del iluminante, de adaptación incompleta, de diferencias de color, etc.

Teniendo en cuenta la definición de modelo de apariencia dada antes, entran en esta categoría desde modelos muy sencillos como el CIELAB y el CIELUV hasta modelos más elaborados como el de Nayatani [Nayatani et al. (1987, 1990a), Nayatani (1995)], el RLAB [Fairchild (1996)], el LLAB [Luo, Lo y Kuo (1996)] o el CIECAM97s [CIE (1998), Luo y Hunt (1998a, 1998b)]. Uno de los más completos y utilizados es el Hunt94, propuesto por R.W.G. Hunt [Hunt (1991, 1994)], que dispone además de una versión explícita para colores no relacionados, Hunt91u. En un capítulo posterior compararemos sus predicciones con las del modelo de visión del color ATTD propuesto en la presente memoria. Para una explicación detallada de ambas versiones del modelo de Hunt, véase el apéndice B.

Capítulo 5. Estructura del modelo ATTD y correlaciones con la fisiología

El modelo que proponemos en la presente memoria consta, a grandes rasgos, de una etapa tricromática y tres etapas oponentes: una precortical (células ganglionares y del núcleo geniculado lateral), otra en el córtex estriado (V1) y una tercera en niveles superiores del córtex. Partimos de los valores triestímulo XYZ del test cuya percepción se quiere estimar y el fondo sobre el que se observa, renormalizados para que Y coincida con la iluminación retiniana en trolands. Se les aplica la matriz de los fundamentales de Smith y Pokorny para convertirlos en señales de conos LMS, que son posteriormente escaladas con unos determinados pesos. A continuación actúa un mecanismo multiplicativo de adaptación cromática, y por último se aplica una no linealidad de tipo Naka-Rushton.

Las respuestas finales de los conos se recombinan linealmente generando un canal acromático (A_{LGN}), dos canales cromáticos rojo-verde (T_{LM} y T_{ML}) y un canal cromático azul-amarillo (D_{LGN}). Se aplica entonces un segundo mecanismo multiplicativo, y después un mecanismo sustractivo que descuenta parte de la señal del fondo en el canal acromático. Actúa una segunda no linealidad y por último hay un reescalado con cuatro factores de peso que proporcionan las respuestas finales de las células del núcleo geniculado lateral.

El canal acromático A_{LGN} , correspondiente al camino Magnocelular, ya no cambia a partir de aquí. Los dos canales de tipo T del LGN se recombinan linealmente, generándose el canal acromático del camino Parvocelular y un canal T_{V1} de segunda etapa oponente. Después de un último mecanismo sustractivo, se produce una

recombinación lineal de T_{V1} y el canal azul-amarillo, resultando de esta tercera transformación oponente las señales T_P y D_P definitivas del camino Parvocelular. A partir de las señales perceptuales ATD_P del Parvo se pueden calcular los descriptores perceptuales del test: luminosidad, tono, colorido y saturación.

En el presente capítulo, a lo largo de la descripción detallada del modelo, se intercalarán en el texto, en letra cursiva, los comentarios referentes a las correlaciones entre las distintas etapas y la fisiología conocida del sistema visual. Nos concentraremos más en las correlaciones de las fases posteriores a la retina, ya que, al ser la fisiología de las etapas iniciales más conocida, la mayor parte de las contribuciones originales corresponden al núcleo geniculado lateral y al córtex visual.

5.1. Mecanismos precorticales

5.1.1. Fotorreceptores

Partimos de las funciones de igualación XYZ CIE1931 [CIE (1932)] con la $V(\lambda)$ modificada por Judd [Judd (1951)] y refinada por Vos [Vos (1978)] (figura 5.1). La entrada para el modelo son los valores triestímulo XYZ del test y los valores triestímulo XYZ_b del fondo, que escalaremos para que el valor triestímulo Y (adimensional) coincida con el valor numérico de la iluminación retiniana absoluta en trolands. Para el paso de candelas por metro cuadrado (cd/m^2) a trolands (td) se utiliza la expresión propuesta por Guth [Guth (1993)]:

$$E=18Y^{0.8} \quad (5.1)$$

Así pues, los valores triestímulo renormalizados de test y fondo se calculan de la forma:

$$\begin{pmatrix} X(\lambda) \\ Y(\lambda) \\ Z(\lambda) \end{pmatrix} = \frac{E(\lambda)}{y'(\lambda)} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}'(\lambda) \\ \bar{y}'(\lambda) \\ \bar{z}'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

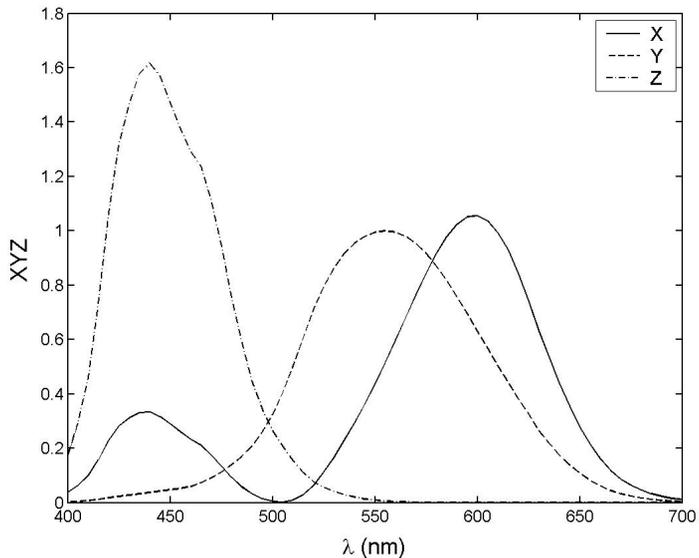


Figura 5.1. Funciones de igualación XYZ refinadas por Judd y Vos.

La expresión de paso a trolands funciona igual que si se multiplicara la luminancia en cd/m^2 por la superficie de la pupila en mm^2 . Se tiene en cuenta por tanto la dependencia del diámetro pupilar con la luminancia del test. Esta operación es, de hecho, un primer mecanismo de adaptación multiplicativo, no lineal, que tiene lugar en la pupila del ojo.

Los valores triestímulo de test y fondo se aplican a la matriz de los fundamentales (conos + medios prerreceptoriales) de Smith y Pokorny [Smith y Pokorny (1975)] normalizados a la unidad (figura 5.2), obteniéndose así las señales de longitudes de onda largas (L), medias (M) y cortas (S) del test. Utilizamos la notación abreviada $XYZ(\lambda)$ para el vector de componentes $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$:

$$LMS_n(\lambda) = M_R \cdot XYZ(\lambda) \quad (5.3)$$

La matriz M_R es:

$$M_R = \begin{pmatrix} 0.2435 & 0.8524 & -0.0516 \\ -0.3954 & 1.1642 & 0.0837 \\ 0 & 0 & 0.6225 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Estos tres valores triestímulo se asocian a las respuestas de los tres tipos de conos de la retina.

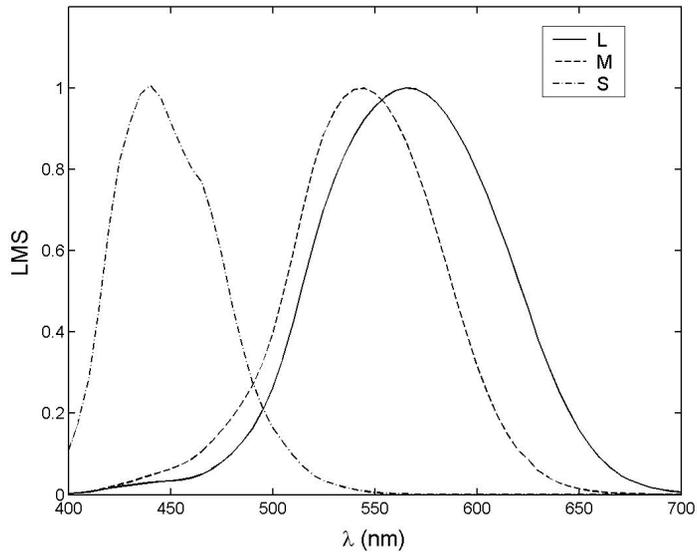


Figura 5.2. Fundamentales LMS de Smith y Pokorny.

Los valores triestímulo LMS_n se escalan con los pesos relativos de los conos:

$$LMS(\lambda) = W_R \cdot LMS_n(\lambda) \quad (5.5)$$

donde W_R es de la forma:

$$W_R = \begin{pmatrix} W_L & 0 & 0 \\ 0 & W_M & 0 \\ 0 & 0 & W_S \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Sobre el hipotético soporte fisiológico para estos pesos, véase más adelante.

A continuación actúa un mecanismo multiplicativo de adaptación, o control de ganancia, gobernado por el adaptador, que es, en general, una combinación lineal del propio test (autoadaptación) y del fondo, esto es:

$$LMS_a = p_t \cdot LMS + p_b \cdot LMS_b \quad (5.7)$$

El control de ganancia modifica las $LMS(\lambda)$ de la siguiente forma:

$$LMS(\lambda) = \Gamma_R \cdot LMS(\lambda) \quad (5.8)$$

donde Γ_R es la ganancia dada por la siguiente expresión (figura 5.3):

$$\Gamma_R = \frac{\gamma_R}{\gamma_R + LMS_a} \quad (5.9)$$

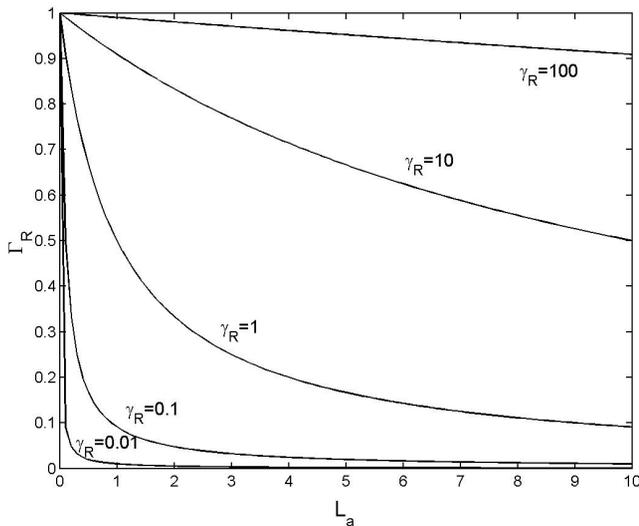


Figura 5.3. Ganancia multiplicativa en función del adaptador para 5 valores de γ_R .

La notación abreviada utilizada en estas ecuaciones quiere dar a entender que las operaciones indicadas han de realizarse primero con L, L_b y L_a , repitiendo después el mismo procedimiento con las M y finalmente con las S. Suponemos que la constante γ_R es la misma para los tres tipos de conos.

La respuesta final de los conos se calcula aplicando a las salidas de los conos adaptados una no linealidad de tipo Naka-Rushton [Naka y Rushton (1966)] que es de la forma:

$$LMS(\lambda) = \frac{LMS(\lambda)^n}{\sigma_R^n + LMS(\lambda)^n} \quad (5.10)$$

con $n=0.7$ [Valeton y Van Norren (1983), Boynton y Whitten (1970)] y la constante de semisaturación, σ_R , también la misma para los tres tipos de conos (figura 5.4). La salida de la no linealidad está siempre comprendida entre -1 y $+1$.

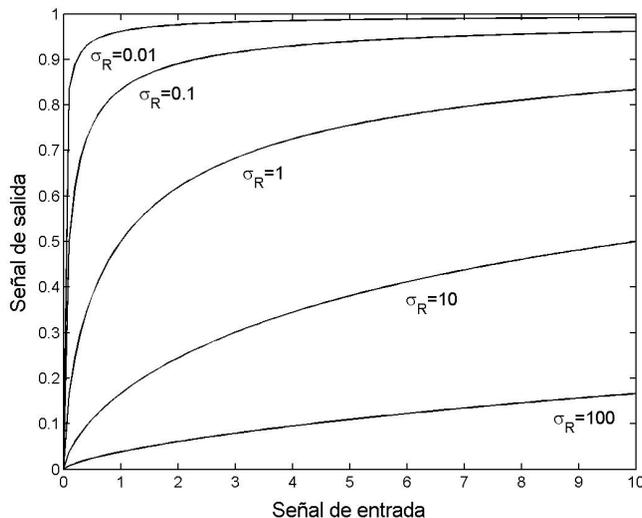


Figura 5.4. Funcionamiento de la no linealidad con $n=0.7$ para distintos valores de σ_R .

La existencia en los conos individuales de un mecanismo de adaptación multiplicativo es sobradamente conocida. En cuanto a la no linealidad, modeliza la saturación de la respuesta del cono por encima de un determinado nivel de estimulación. Se ha comprobado experimentalmente que la curva del potencial de membrana del cono en función del logaritmo de la intensidad del estímulo se desplaza horizontalmente al cambiar el estado de adaptación [Normann y Perlman (1979)]. El mecanismo multiplicativo y la no linealidad permiten reproducir esencialmente este comportamiento. El ruido de fotones y el ruido neural no aparecen explícitamente, como ocurre por ejemplo en el modelo de Guth, pero suponemos que están implícitos en las no linealidades.

5.1.2. Células ganglionares y del núcleo geniculado lateral

Las sensibilidades espectrales de los conos, $LMS(\lambda)$, se recombinan linealmente generando un canal acromático $A_{LGN}(\lambda)$, dos canales cromáticos tritanópicos $T_{LM}(\lambda)$ y $T_{ML}(\lambda)$, y un canal cromático deuteranópico $D_{LGN}(\lambda)$. La matriz:

$$M_{LGN} = \begin{pmatrix} + & + & 0 \\ + & - & 0 \\ - & + & 0 \\ - & - & + \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

representa la forma de las transformaciones que se proponen, dejando por ahora libres los valores de sus coeficientes. Para A_{LGN} se propone una combinación aditiva de L y M; no participan los conos S. Para T_{LM} y T_{ML} , sendas combinaciones sustractivas de L y M, o de M y L, respectivamente; tampoco participan los conos S. Para D_{LGN} , una combinación sustractiva entre S y una adición ponderada de L y M. Así pues:

$$ATTD(\lambda) = M_{LGN} \cdot LMS(\lambda) \quad (5.12)$$

Estas señales ATTD obtenidas son las que dan nombre a nuestro modelo.

Los coeficientes de M_{LGN} contienen información de las respuestas máximas de cada cono, de las poblaciones relativas de conos en la zona de la retina considerada y de las conexiones de entrada a cada tipo de célula ganglionar. Estas contribuciones son inseparables en el proceso de minimización porque cada coeficiente de M_{LGN} sería el producto de distintos parámetros libres. Para no perder tantos grados de libertad se introdujeron los pesos W_R . Desafortunadamente, dada su situación, estos pesos no pueden interpretarse en términos de las poblaciones de conos, ni tampoco pueden deducirse éstas de los coeficientes de M_{LGN} .

Estas operaciones tendrían lugar en las células ganglionares y se transmitirían al córtex estriado, vía núcleo geniculado lateral, sin modificación adicional de la información. El soporte fisiológico para el canal acromático, A_{LGN} , es el camino Magnocelular [Wiesel y Hubel (1966), Derrington et al. (1984), Dreher et al. (1976), Schiller y Malpeli (1977, 1978)]. Las células del Magno tienen campos receptivos de Tipo III [Wiesel y Hubel (1966), Derrington et al. (1984)], y sensibilidad espectral de tipo $V(\lambda)$ [Lee et al. (1988)]. El soporte fisiológico para los canales cromáticos T_{LM} , T_{ML} y D_{LGN} es el camino Parvocelular, aunque recientemente se viene proponiendo que el canal azul-amarillo es un camino fisiológicamente segregado de los canales rojo-verde, al que se ha dado el nombre de camino koniocelular [Dacey y Lee (1994), Hendry (1995), Hendry y Yoshioka (1994)]. Las células con oponencia rojo-verde tienen campos receptivos de Tipo I [Wiesel y Hubel (1966)]. Supondremos que las células que median los canales T_{LM} y T_{ML} son de centro on. La mayor parte de las células con oponencia azul-amarillo tienen campos receptivos de Tipo II [Wiesel y Hubel (1966), Zrenner y Gouras (1981), Lee et al. (1987)]. Existen también, no obstante, células con campos receptivos de Tipo I con centro S-on [Lee et al. (1987)], pero no con centro off [Malpeli y Schiller (1978), DeMonasterio (1979), Zrenner y Gouras (1981)]. Supondremos que las células que median D_{LGN} son de Tipo II y con input de S excitatorio.

Naturalmente, existen células con oponencia rojo-verde de centro off. Supondremos que la sensibilidad espectral de una célula con polaridad L-M es estrictamente la misma si es de centro on o de centro off, y lo mismo para una célula con polaridad M-L. Asimismo, existen células con oponencia azul-amarillo con input S inhibitorio [DeMonasterio y Gouras (1975), Valberg et al. (1986)]. Supondremos que la sensibilidad espectral de éstas es, salvo la polaridad, estrictamente la misma que la de las células con input S excitatorio. Puesto que en realidad existe una cierta variabilidad en los pesos de los conos, independientemente de si la célula es de centro on o de centro off, o si es de input S excitatorio o inhibitorio [Valberg et al. (1987), Lee et al. (1987)], estas suposiciones son razonables. No obstante, una alternativa más sofisticada habría consistido en considerar cuatro canales cromáticos rojo-verde, a saber, T_{LM} y $-T_{LM}$ (de centros on y off respectivamente), T_{ML} y $-T_{ML}$ (de centros on y off respectivamente); y dos canales cromáticos azul-amarillo, a saber, D_{LGN} y $-D_{LGN}$.

Sobre los tipos de células asimilables a los canales TTD:

De entre los seis grupos que Lee y colaboradores proponen para clasificar las células del LGN [Lee et al. (1987)] (ver tabla 4.1) y que, de hecho, habían utilizado en el modelo de Valberg et al. [Valberg et al. (1986)] para interpretar en términos fisiológicos el espacio SVF [Seim y Valberg (1986)], consideramos comparables a nuestros TTD los siguientes: para representar la oponencia rojo-verde con polaridades LM y ML, células de Tipo I con centro L-on e inputs +L-M, y con centro M-on e inputs +M-L, respectivamente. La primera se caracteriza por un tramo excitatorio ancho en las largas longitudes de onda; se la denomina WL en la notación de Creutzfeldt et al. [Creutzfeldt et al. (1979)]. La segunda presenta un tramo excitatorio ancho en las cortas longitudes de onda (WS). Sorprendentemente, la primera corresponde a una amarillo-azul en la clasificación de DeValois et al. [DeValois et al. (1966)] y no, como pudiera esperarse, a una rojo-verde. La segunda sí corresponde a una verde-rojo. Para representar la oponencia azul-amarillo elegimos células con un tramo excitatorio estrecho en las cortas longitudes de onda (NS), con inputs +S-L y que corresponden a una azul-amarillo de DeValois et al..

Existen asimismo células con inputs +L-M con centro M-off y de Tipo II. Supondremos que estas células están presentes en el LGN pero con idéntica sensibilidad espectral que las de centro on. Estas células serían las rojo-verde en la clasificación de DeValois et al.. De la misma manera, existen células con polaridad +M-L de centro L-off y de Tipo II que supondremos con la misma sensibilidad espectral que las de centro on. Sorprendentemente, estas células serían azul-amarillo en la clasificación de DeValois et al.. Por último, existen células con input de S inhibitorio de la forma +M-S, cuyos campos receptivos son de Tipo II y que se corresponderían con el amarillo-azul de DeValois et al.. Está demostrado que en el LGN hay muy pocas células con input S inhibitorio; por eso no seleccionamos este último tipo.

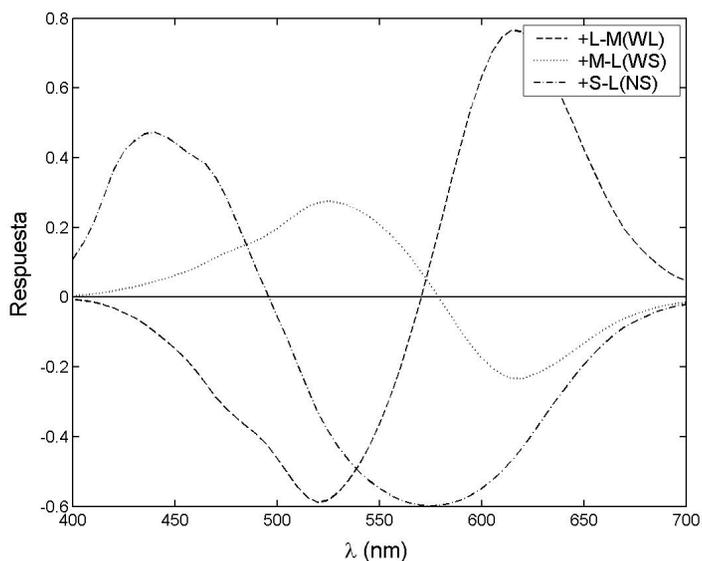


Figura 5.5. Respuestas de células de Lee et al. asimilables a TTD.

En la figura 5.5 se muestran las respuestas de células de Lee et al. seleccionadas. Se puede apreciar que +L-M(WL) presenta su punto neutro en 570 nm, +M-L(WS) en 580 nm y +S-L(NS) en 495 nm. Podemos comparar estas curvas con los canales cromáticos propuestos por otros autores, como por ejemplo Guth.

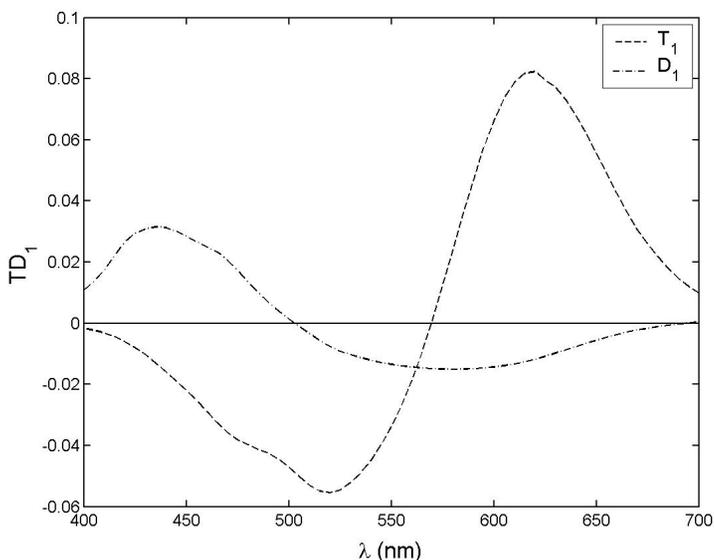


Figura 5.6. Sensibilidades espectrales TD_1 de primera etapa oponente de ATD95.

En la figura 5.6 se muestran los canales oponentes $T_1(\lambda)$ y $D_1(\lambda)$ de primera etapa de ATD95. El canal T_1 , con sensibilidad espectral del tipo +L-M, presenta su punto neutro en 570 nm igual que la +L-M(WL) de Lee et al., mientras que el D_1 , de tipo -L+M+S, lo presenta en 500 nm, casi igual que la +S-L(NS). En la figura 5.7 se muestran los canales $LMS_0(\lambda)$ de DeValois y DeValois [DeValois y DeValois (1993)]. Estos autores postulan unos canales cromáticos de primera etapa oponente $L_0(\lambda)$ (de tipo +L-M) con punto neutro en 530 nm, $M_0(\lambda)$ (-L+M) con punto neutro en 565 nm y $S_0(\lambda)$ (-L-M+S) con punto neutro en 495 nm (igual que la +S-L(NS) de Lee et al.).

Excepto la L_0 de DeValois y DeValois, el resto de canales del LGN considerados aquí se pueden asociar razonablemente a uno de los dos grupos de células encontrados por Derrington, Krauskopf y Lennie [Derrington et al. (1984)], cuyos puntos neutros se sitúan en torno a 500 nm y 570 nm. Nótese que el L_0 de DeValois y DeValois tampoco se asemeja a ninguno de los otros tres tipos considerados por Lee y colaboradores (ver figura 4.12).

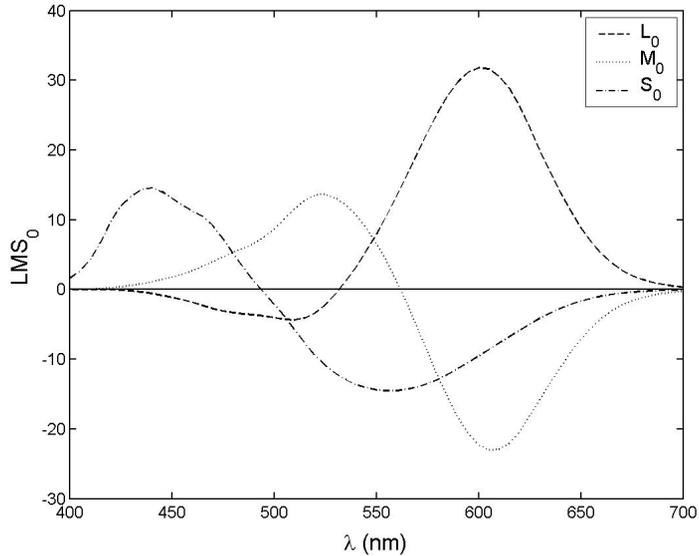


Figura 5.7. Sensibilidades espectrales LMS_0 de primera etapa oponente de DeValois y DeValois.

El primero en actuar sobre las señales ATTD es un mecanismo multiplicativo que consideraremos opcional y que, a diferencia del que actuaba en la fase de receptores, estaría gobernado únicamente por el fondo, de la siguiente manera:

$$ATTD(\lambda) = \Gamma_{LGN} \cdot ATTD(\lambda) \quad (5.13)$$

siendo la ganancia:

$$\Gamma_{LGN} = \frac{\gamma_{LGN}}{\gamma_{LGN} + |ATTD_b|} \quad (5.14)$$

Estas $ATTD_b$ se han obtenido aplicando el modelo a XYZ_b hasta la fase anterior, haciendo $p_t=0$ y $p_b=1$ en (5.7), o en otras palabras, con autoadaptación del fondo. Las constantes γ_{LGN} son distintas en cada canal: γ_A , γ_T (común a T_{LM} y T_{ML}) y γ_D . En fases posteriores del estudio se consideraron tres variantes del modelo: en la variante 1 no hay

control de ganancia en ningún canal; en la variante 2 lo hay en los cuatro canales; y en la variante 3, sólo en A y D. Esta tercera variante estaría respaldada por ciertas evidencias psicofísicas de que los canales T y D tienen distinto grado de linealidad [Larimer et al. (1974, 1975)]. Por ejemplo, Finkelstein considera adaptación multiplicativa en la etapa oponente para el canal azul-amarillo [Finkelstein (1993b)] pero no para el canal rojo-verde [Finkelstein (1993a)].

A continuación actúa en el Magno un mecanismo sustractivo cuya acción es descontar del test un porcentaje de la señal del fondo, o sea:

$$A_{LGN}(\lambda) = A_{LGN}(\lambda) - K_{LGN} \cdot A_{LGNb} \quad (5.15)$$

Los mecanismos sustractivos se asocian generalmente con una etapa cromáticamente oponente [Finkelstein (1993a, 1993b), Larimer (1981), Pugh y Mollon (1979), Jameson y Hurvich (1972)], así que se hicieron pruebas preliminares con distintas versiones del modelo ATTD para determinar en qué fase o fases oponentes era preferible incluir mecanismos de este tipo. En las versiones que consideraban adaptación sustractiva en el LGN Parvo, las constantes sustractivas obtenidas (ver capítulo 6) tenían valores muy bajos, casi despreciables. Por consiguiente, la sustracción del fondo en los canales cromáticos se introducirá en una etapa posterior.

Sobre el soporte fisiológico para el mecanismo sustractivo acromático del LGN, véase más adelante.

Las cuatro señales se introducen a continuación en una no linealidad de tipo Naka-Rushton, pero en esta ocasión con exponente $n=1$ [Shapley y Enroth-Cugell (1984)]:

$$ATTD(\lambda) = \frac{ATTD(\lambda)}{\sigma_{LGN} + |ATTD(\lambda)|} \quad (5.16)$$

con la misma σ_{LGN} para los cuatro canales. Tomamos valor absoluto en el denominador porque las señales de los canales oponentes pueden

ser negativas. La salida de la no linealidad está siempre comprendida entre -1 y $+1$.

Esta no linealidad se podría asociar al rango limitado de respuestas de las células del LGN [Shapley y Enroth-Cugell (1984)].

Las respuestas finales de los canales A_{LGN} , T_{LM} , T_{ML} y D_{LGN} se calculan reescalando las salidas de las no linealidades mediante la siguiente matriz de pesos:

$$W_{LGN} = \begin{pmatrix} W_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{LM} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{ML} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_D \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

esto es:

$$ATTD(\lambda) = W_{LGN} \cdot ATTD(\lambda) \quad (5.18)$$

Las señales resultantes son equiparables a las respuestas de células de Lee et al., y por consiguiente estos pesos no contemplan las poblaciones relativas de células del LGN; se pueden asociar a las respuestas máximas de las funciones de Naka-Rushton en cada canal. La información sobre las poblaciones relativas de células del LGN y sobre las conexiones de entrada a las distintas células del córtex está incluida en las etapas posteriores, pero no es deducible directamente a partir de los parámetros del modelo.

El A_{LGN} del Magno no participa en la visión del color. Su función es la de detección de movimientos y parpadeos de alta frecuencia [Schiller et al. (1990)]. Sin embargo, como explicaremos más adelante (ver apartado 8.5), contribuirá junto con los TTD Parvo del LGN en la detección de luces espectrales sobre fondo blanco de distintas luminancias.

5.2. Mecanismos corticales

5.2.1. Segunda transformación oponente

El canal acromático A_{LGN} ya no cambia a partir de aquí. Las señales de los tres canales cromáticos se recombinan linealmente generándose un nuevo canal acromático, A_{V1} , y dos nuevos canales cromáticos a los que denominamos T_{V1} y D_{V1} . La construcción de canales acromáticos y cromáticos a nivel cortical exclusivamente a partir de canales oponentes ha sido sugerida en diversas ocasiones [DeValois y DeValois (1993), Ingling y Martínez-Uriegas (1985), Martínez-Uriegas (1994)]. La matriz

$$M_{V1} = \begin{pmatrix} \pm & \pm & 0 \\ 1 & - & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

describe la forma de las transformaciones que se proponen. La sensibilidad espectral del canal A_{V1} se obtiene como combinación lineal, presuntamente aditiva, de unas cantidades T_{LM}^C y T_{ML}^C , que son las T_{LM} y T_{ML} calculadas de nuevo a partir de las componentes positivas de M_{LGN} ($L^*M_{LGN}(2,1)$ en el caso de T_{LM}^C y $M^*M_{LGN}(3,2)$ en el de T_{ML}^C). Los signos \pm de (5.19) indican que para esos parámetros, por ahora libres, no vamos a presuponer ningún signo en particular. El canal T_{V1} se construye como combinación sustractiva de T_{LM} y T_{ML} , o lo que es lo mismo, como combinación aditiva de T_{LM} (de centro on) y la presunta $-T_{ML}$ (de centro off) que, recuérdese, tendría la misma sensibilidad espectral que la T_{ML} . Nos preocupamos sólo por las contribuciones relativas de T_{LM} y T_{ML} a T_{V1} , haciendo $M_{V1}(2,1)=1$, ya que el escalado global de T_{V1} vendrá dado por una etapa posterior. El canal azul-amarillo no sufre variación alguna en esta etapa; así pues, $D_{V1}=D_{LGN}$. Se tiene, por consiguiente:

$$ATD_{V1}(\lambda) = M_{V1} \cdot TTD(\lambda) \quad (5.20)$$

A continuación, un mecanismo de adaptación sustractivo resta parte de la señal del fondo en cada canal, de la forma:

$$ATD_{V_1}(\lambda) = ATD_{V_1}(\lambda) - K_{CTX} \cdot ATD_{V_{1b}} \quad (5.21)$$

con las constantes K_{CTX} distintas para cada canal: K_A , K_T y K_D . Las $ATD_{V_{1b}}$ se han calculado aplicando el modelo al fondo hasta la fase anterior, suponiendo autoadaptación. En particular, la cantidad $A_{V_{1b}}$ se ha obtenido, como para el test, mediante las T_{LM}^C y T_{ML}^C calculadas de nuevo a partir de las componentes positivas de M_{LGN} .

Si aceptamos la concepción tradicional para el campo receptivo de una célula de Tipo I, a saber, L en el centro, M en la periferia, (o al revés), podríamos interpretar que los inputs que generan la sensibilidad espectral de A_{V_1} procederían de las señales de los centros de los campos receptivos de las células que median T_{LM} y T_{ML} . Esta operación generaría una respuesta que podría imputarse a una célula cuyo campo receptivo fuera de sólo centro y sin oponencia espectral. El campo receptivo de tal célula podría formalmente denominarse Tipo III de sólo centro. La adaptación sustractiva combinaría las respuestas de Tipo III de sólo centro de test y fondo, generando una respuesta que correspondería a una célula cuyo campo receptivo sería de Tipo III. Sin embargo, es prudente recordar en este momento que aunque esta arquitectura para las células de Tipo I ha recibido un importante apoyo experimental [Reid y Shapley (1992)], no todos los autores aceptan esta concepción. Especialmente DeValois y DeValois argumentan que las sinapsis a la periferia desde el mosaico de conos son completamente aleatorias y, por consiguiente, la sensibilidad espectral de la periferia debe replicar la proporción de conos en el mosaico, a saber, 10:5:1. DeValois y DeValois se refieren a esta concepción como modelo indiscriminado [DeValois y DeValois (1993)]. Un menor grado de aleatoriedad podría eliminar la contribución de los conos S y la periferia se reduciría a $2L+M$. La sensibilidad espectral de una célula de, por ejemplo, centro L-on, balanceada, sería $3L - (2L+M) = L-M$. DeValois y DeValois se refieren a esta concepción como modelo discreto. Sin embargo, nótese que aunque dicha sensibilidad espectral sea la misma que con la concepción tradicional, el mapa de inputs, siempre según DeValois y DeValois, es distinto, porque se sigue aceptando de hecho que las conexiones a la periferia son básicamente aleatorias. Análogamente a lo expuesto para el Parvo, el canal acromático Magno se puede interpretar también como una señal

de Tipo III de centro, combinación aditiva de L y M, que tras la adaptación sustractiva se convierte en una señal de Tipo III.

La respuesta del canal T_{V1} podría imputarse a una célula cuyo campo receptivo fuera de Tipo II. Recuérdese que la respuesta del canal D_{LGN} ya procedía de células con campos receptivos de Tipo II. Por consiguiente, ambos canales cromáticos estarían mediados por la misma clase de célula. Análogamente, la adaptación sustractiva combinaría las respuestas de Tipo II de test y fondo, tanto en T_{V1} como en D_{V1} , generando de esta manera el antagonismo espacial propio de las células oponentes dobles. En efecto, en los blobs de V1 existen células de Tipo III y existen células oponentes dobles [Livingstone y Hubel (1984), Michael (1978a), Gouras (1974), T'so y Gilbert (1988)]. También se ha citado la existencia de oponentes dobles en 4C [Gouras (1974), Michael (1978a)]. Su oponencia puede ser rojo-verde [T'so y Gilbert (1988), Michael (1978a)] o azul-amarillo [T'so y Gilbert (1988)].

Por todo lo dicho anteriormente, la arquitectura sugerida para el modelo ATTD guarda una razonable correlación con la fisiología del sistema visual. Sin embargo, presenta al menos dos puntos débiles. En primer lugar, en lo que respecta a la arquitectura de los mecanismos acromáticos, la existencia de células con las características a las que nos hemos referido como de sólo centro puede ser discutible. No obstante, la idea utilizada es básicamente la misma que la que se usa en los modelos de demultiplexado en los que se extrae la información acromática de la respuesta de las células de Tipo I vía selectividad a la orientación [Martínez-Uriegas (1990, 1994), Kingdom y Mullen (1995)]. Se trata de construir una unidad acromática, asimilable a una Tipo III, con el centro a partir de los centros de las L y M de centro on y la periferia a partir de los centros de las L y M de centro off. Un campo receptivo de esta forma sería característico de las denominadas células simples que constituyen la mayor parte de los interblobs. Por el contrario, Hubel concibe el campo receptivo de la célula simple como el resultado de la superposición de varios campos receptivos de Tipo I dispuestos a lo largo de un eje [Hubel (1995)] (ver figura 3.14, izquierda). Es posible que el canal acromático de nuestro modelo utilice las columnas que atraviesan los

interblobs y no las células de Tipo III de los blobs, como podría pensarse en un primer momento. La razón por la que éstas existen es oscura. Pudiera ser, naturalmente, que existieran canales cromáticos con y sin selectividad a la orientación. Sin embargo, no es evidente el origen de estas células de Tipo III de los blobs. En general, teniendo en cuenta que su centro es significativamente más grande que el de una Tipo III del LGN, se podría pensar que se forma a partir de un mosaico de inputs de células Tipo I de niveles inferiores. Por otra parte, existen evidencias fisiológicas de que la mayoría de las células simples responden a redes cromáticas y acromáticas [Thorell et al. (1984), Lennie et al. (1990), Gouras y Kruger (1979)], si bien es cierto que la respuesta a variaciones de luminancia es generalmente más importante y está sintonizada para altas frecuencias. Por el contrario, la respuesta a variaciones de color presenta unas características de sintonizado muy variables de unas células a otras. Las MTFs calculadas por Kingdom y Mullen [Kingdom y Mullen (1995)] demuestran que este comportamiento aparentemente anárquico es razonablemente descrito modificando adecuadamente el número de inputs de centro L y de centro M con la configuración propuesta por Martínez-Uriegas. Así pues, no es sostenible que estas células simples puedan constituir un canal acromático puro. Sin embargo, la evidente selectividad a la orientación demostrada psicofísicamente con redes acromáticas hace que, a pesar de todo lo dicho, no haya por ahora un mejor candidato a canal acromático Parvo.

En segundo lugar, en lo que respecta a la arquitectura de los mecanismos cromáticos, aun habiéndose demostrado que existen campos receptivos de Tipo II en V1, no es seguro que los haya en un nivel anterior a los blobs, o sea, en $4C\beta$. Sí los hay en los blobs, pero son significativamente más grandes que los Tipo II del LGN, lo que de nuevo sugiere alguna estructura en mosaico asimilable a una Tipo II. La manera en que se construiría este mosaico ha sido propuesta por Gouras [Gouras (1991)]. Es posible que las periferias se unan a los centros mediante conexiones horizontales en los propios blobs, ya que de hecho existen allí células de Tipo II [Livingstone y Hubel (1984)] que podrían servir de input para las oponentes dobles. Sin embargo, esta posibilidad es una mera especulación; es mucho más probable que los inputs de Tipo II para los centros y las periferias procedan

directamente del LGN. Según Hubel, que el tamaño del centro de las oponentes dobles sea del orden del de las células de Tipo II del LGN apoyaría esta idea. No obstante, la arquitectura de una célula oponente doble a partir de inputs de células de Tipo II tanto para el centro como para la periferia (bien haciendo uso de células con una u otra polaridad, bien mediante conexiones excitatorias o inhibitorias) es sólo una concepción [Michael (1978a), Hubel (1995)] entre otras posibles. Una opción alternativa consistiría en admitir que el campo receptivo de una célula oponente doble se construye directamente a base de inputs de células de Tipo I. Es muy probable que el centro de una oponente doble con cierta polaridad se forme mediante conexiones excitatorias de L y M de centros on y conexiones inhibitorias de L y M de centros off; para cambiar la polaridad de la periferia bastaría con cambiar el signo de todas las sinapsis [Livingstone y Hubel (1984), Gouras (1990)]. Esta idea es compatible con nuestro modelo, ya que de hecho podría hacerse esencialmente lo mismo con sólo las L y M de centro on. Bastaría, naturalmente, con que las conexiones fueran excitatorias para el centro e inhibitorias para la periferia.

Existen células oponentes dobles con la polaridad contraria. Por consiguiente, supondremos que existen los correspondientes canales con la polaridad contraria a los que nos referiremos como $-TD_{V1}$. Supondremos que estos canales tienen la misma sensibilidad espectral que TD_{V1} , salvo un signo menos global.

5.2.2. Tercera transformación oponente

Las salidas $ATD_{V1}(\lambda)$ de estos canales aún sufren una última recombinación que conduce a las señales perceptuales:

$$ATD_P(\lambda) = M_P \cdot ATD_{V1}(\lambda) \quad (5.22)$$

de acuerdo con los coeficientes de la matriz:

$$M_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm & \pm \\ 0 & \pm & \pm \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

El canal acromático perceptual es A_{V1} sin modificación adicional. De esta manera hacemos nula la contribución de D_{LGN} a A_P y por tanto los conos S no participan en la curva de sensibilidad espectral acromática. Aunque existe algún estudio que indica una contribución pequeña [Drum (1983)], el hecho de que la $V(\lambda)$ de protanopes y deuteranopes sea el espectro de acción de los conos M y L, respectivamente [Pokorny y Smith (1972), Wright (1952)], así como el hecho de que la $V(\lambda)$ de un tritanope sea esencialmente idéntica a la de un tricrómata normal, respaldan la idea de que los conos S no contribuyen al mecanismo de luminancia. Pruebas preliminares con nuestro modelo demostraron que permitiendo a D_{LGN} participar en la formación de A_P , el peso de su contribución obtenido (ver capítulo 6) era un orden de magnitud inferior a los de T_{LM} y T_{ML} , lo cual apoya nuestra decisión.

Los canales cromáticos T_P y D_P se obtienen a partir de sendas combinaciones lineales de T_{V1} y D_{V1} , en las que no hemos impuesto ningún signo. Admitimos que T_{LM} y T_{ML} pueden influir a través de T_{V1} en D_P [DeValois y DeValois (1993), Lennie y D'Zmura (1988)]. Esta posibilidad, sin embargo, ha sido descartada de partida en otros modelos como el ATD95 de Guth o el modelo de Valberg y Seim, que suponen que el eje neutro del canal perceptual D de Jameson y Hurvich es el mismo que el de las células del LGN [Derrington et al. (1984)].

Supondremos que existen canales con la polaridad contraria, a los que nos referiremos como $-TD_P$. Supondremos que estos canales se forman a partir de $-TD_{V1}$ con exactamente las mismas operaciones con que se formaron los TD_P , y por consiguiente tienen la misma sensibilidad espectral que éstos, salvo un signo menos global.

Probablemente después de la matriz M_P podrían considerarse otros mecanismos sustractivos debidos a las periferias silenciosas de las células de V4, ya que éstas actúan como un mecanismo supresor (de hecho, el largo alcance espacial de los efectos de inducción requiere o bien algún tipo de mecanismo supresor o bien campos receptivos con periferia grande). A pesar de no haberlos considerado explícitamente, colocar una adaptación sustractiva antes de una

transformación lineal es equivalente, a efectos computacionales, a colocarla después de la misma cambiando apropiadamente los valores numéricos de las constantes sustractivas [Ware y Cowan (1982)], de modo que nuestras K_{CTX} de V1 podrían incluir los efectos de los posibles mecanismos sustractivos de V4.

Reflexiones sobre la naturaleza de los canales cromáticos:

Sin duda, es tentador pensar que las dos clases de blobs constituyen el soporte fisiológico de los canales perceptuales [T'so y Gilbert (1988)]. Desafortunadamente, no es muy probable que estas poblaciones estén tan bien definidas como consideran T'so y Gilbert. Por el contrario, existen células en V1 sintonizadas para casi cualquier dirección del espacio de color, o para ser más precisos, cuyo vector de máxima respuesta apunta casi en cualquier dirección del plano isoluminante [Lennie et al. (1990)]. Tampoco hay evidencia fisiológica alguna que demuestre que estos canales existen en V4. Los primeros trabajos de Zeki parecían indicar que las bandas de sintonizado espectral de las células de V4 eran más estrechas que las encontradas en V1 o en el LGN, y con los máximos agrupados en torno a los tonos únicos perceptuales [Zeki (1980)]. Zeki ha continuado desde entonces defendiendo que éstas son las verdaderas células selectivas al color. Sin embargo, no hay unanimidad a este respecto entre los distintos autores. De hecho, las células de V4 son en realidad escasamente oponentes y en este sentido no puede decirse que sean selectivas para el color. Además, las sensibilidades espectrales tienen el máximo en prácticamente cualquier región del espectro y las bandas de sintonizado tampoco son significativamente más estrechas que las de V1 [De Monasterio y Schein (1982), Schein y Desimone (1991)].

Si V4 juega un papel esencial en la visión del color, no es por sus características espectrales, sino por sus propiedades espaciales. De hecho, aunque tanto el contraste simultáneo como la constancia del color son fenómenos que pueden entenderse conceptualmente atendiendo a las propiedades de las células oponentes dobles, el alcance espacial de dichos fenómenos es significativamente mayor que el "pequeño" campo receptivo de estas células. Es aquí donde presumiblemente interviene la periferia silenciosa característica de las

células de V4. Fuera del campo receptivo de una célula de V4 existe una región notablemente grande que, cuando se ilumina, es capaz de suprimir total o parcialmente la respuesta del campo receptivo incluso si éste es iluminado con luz del color óptimo, siempre y cuando la luz con que es iluminado esté en la misma banda espectral. Las células de V4 con su periferia silenciosa pueden pues actuar como "detectores de contraste selectivos al color" [Lucassen y Walraven (1993)]. Éste es probablemente el soporte fisiológico para la comparación espacial dentro de una banda espectral característico de los algoritmos retinex para la constancia del color [Land y McCann (1971), Land (1974, 1983), Zeki (1995)].

En un modelo de direcciones sintonizadas, según las ideas de Lennie y colaboradores, el color de un estímulo estaría determinado por el detector particular que diera máxima respuesta para ese estímulo. El tono y el colorido se podrían asociar al argumento y el módulo, respectivamente, del vector de máxima respuesta, o en otras palabras, a las coordenadas polares de dicho vector. Por el contrario, en un modelo de canales perceptuales, el tono sería el resultado de comparar las respuestas de dichos canales. No es en absoluto evidente dónde se realizaría esta comparación aunque, siempre según el punto de vista de Zeki, se realizaría mediante conexiones horizontales dentro de V4. Tampoco es evidente cómo ocurriría la comparación. Una estrategia posible es la que se ha seguido en nuestro modelo, que de hecho es la concepción tradicional de la mayor parte de los modelos neurales hasta la fecha: se trataría simplemente de relacionar los valores numéricos de las salidas de los canales oponentes T_p y D_p , signos incluidos. Como veremos a continuación, una manera sencilla de establecer esta relación consiste en definir el tono mediante el arco tangente de T_p/D_p . Como dijimos al inicio de esta reflexión, dos clases de células oponentes dobles contenidas en los dos tipos de blobs encontrados por T'so y Gilbert serían apropiadas para realizar una operación de esta naturaleza, aunque conviene reconocer que el consenso en este punto no alcanza siquiera para estar convencidos de la existencia o no de cualquier clase de agrupación en los blobs, de manera que el contenido de cada blob bien podría ser una mezcla de células con cualquier "sintonizado espectral" [Livingstone y Hubel (1984), Tootell et al. (1988a), Lennie et

al. (1990)]. Sin embargo, recordemos que implícitamente hemos supuesto que existen TD_P y $-TD_P$; por consiguiente, se podría considerar una estrategia alternativa, indistinguible realmente de la propuesta, que consistiría en comparar las salidas de los cuatro canales resultantes de la rectificación TD_P y $-TD_P$. Así, la oponencia perceptual emergería como resultado de la oponencia entre pares de células, a saber: si responde la célula que codifica rojo, no lo hace la que codifica verde, y viceversa; y lo mismo con el amarillo y el azul.

Esta opción es fisiológicamente posible, pero debe notarse que supone un cambio de extraordinaria importancia en nuestra manera de pensar, porque de esta forma la oponencia deja de ser una propiedad interna de cada canal cromático. DeValois y DeValois son firmes defensores de estas ideas, y en la literatura sobre el tema se pueden encontrar descritas otras fisiologías que serían asimismo consistentes con este planteamiento. Por ejemplo, Vautin y Dow han propuesto que las células de V1 podrían estar agrupadas en promedio en cuatro bandas espectrales, y dispuestas de la siguiente forma: blobs "rojos" rodeados de interblobs "verdes" y blobs "azules" rodeados de interblobs "amarillos" [Vautin y Dow (1985), Dow y Vautin (1987), Dow (1991)]. Sin embargo, inevitablemente tenemos que preguntarnos dónde ocurriría la rectificación. Las células simples, debido a que no tienen actividad espontánea, realizan de hecho un rectificado de media onda [DeValois y DeValois (1990)], y es cierto que existen células simples que se comportan como no oponentes dentro de ciertas bandas espectrales [Gouras (1974), Thorell et al. (1984), Livingstone y Hubel (1984)]. La existencia de células selectivas simultáneamente a la orientación y al color no debe sorprendernos. El efecto McCollough es una demostración psicofísica de esto [McCollough (1965)]. DeValois y DeValois sugieren que las células simples darían salidas rectificadas y que las células complejas, que son mayoría en los niveles posteriores a V1, se construirían mediante sumas de estas señales rectificadas [DeValois y DeValois (1993)]. Para que las células complejas de V1 se formaran de la misma manera bastaría con admitir que la jerarquía simple-complejas existe también dentro de V1 [Michael (1978b,c), Hubel y Wiesel (1968), Gouras (1974)]. Siendo optimistas, podríamos pensar que se genera de esta manera un conjunto discreto de (cuatro) bandas espectrales, pero probablemente

lo que ocurre en realidad es que diferentes combinaciones lineales generan un barrido de bandas espectrales cuyo máximo recorre todo el espectro. Esto es, de hecho, lo que encuentran Schein y Desimone en V4 [Schein y Desimone (1990)]. La construcción de estas bandas de V4 mediante combinación de señales rectificadas procedentes del córtex estriado es sugerida por estos investigadores. Tampoco los datos que tenemos sobre células complejas en el córtex estriado apuntan a la existencia de estas cuatro bandas, ya que según Lennie et al. en esta clase de células no se encuentran direcciones de sintonizado preferentes, aunque tampoco se encuentran en la población de células simples, y ni siquiera entre las células con campos receptivos concéntricos [Lennie et al. (1990)]. Por otra parte, la implicación de las células simples en los canales cromáticos está apoyada por el hecho de que cuando se realizan experimentos de adaptación con redes cromáticas se encuentra selectividad a la orientación casi en la misma medida que con redes acromáticas [Bradley et al. (1988)]. Sin embargo, Hubel y colaboradores continúan defendiendo como candidatas para soportar los canales cromáticos a las células oponentes dobles de los blobs, en tanto que éstas tienen las características espectrales adecuadas a tal cometido, además de un campo receptivo con la arquitectura espacial que produciría una función de transferencia cromática consistente con la forma pasa-baja de la CSF cromática psicofísica. Sin embargo, estas células tienen estructura centro-periferia y por lo tanto carecen de selectividad a la orientación.

Es posible que las exigencias espectrales y espaciales de los mecanismos cromáticos puedan compatibilizarse en una estructura denominada célula simple oponente doble [Hubel y Wiesel (1968), Poggio et al (1975), Michael (1978b)], ya que éstas se pueden interpretar como conjuntos de campos receptivos de oponentes dobles dispuestos solapados a lo largo de un eje. Como hemos dicho antes, es posible que existan en 4C los elementos necesarios para una implementación jerárquica de estas células, es decir, células oponentes dobles centro-periferia. Pero aunque no pongamos en duda que existan células simples oponentes dobles que reunirían todas las condiciones necesarias para constituir un canal cromático "puro", "pasa-baja" y "con selectividad a la orientación", tenemos que

reconocer que, aunque no sean excepcionales, desde luego son minoría dentro de la población de células simples. Por el contrario, la arquitectura común de una célula simple, descrita antes, no puede constituir un canal ni puramente cromático ni puramente acromático, y si son estas células los pilares para construir las selectivas al color en forma de células complejas en V1 o V4, entonces no hay más remedio que admitir que aún no hemos encontrado los mecanismos que separan la información cromática y acromática multiplexada en las células oponentes del LGN. Algunos intentos de modelizar los procesos de demultiplexado se han propuesto recientemente con mayor o menor éxito [Kingdom y Mullen (1995), Martínez-Uriegas (1990, 1994), Gouras (1991), Watson y Ahumada (1989), Billock (1991)].

Una última reflexión: que existen direcciones privilegiadas desde el punto de vista funcional es evidente, porque los tonos únicos se pueden determinar experimentalmente, pero ¿por qué éstas y no cualquier otra pareja de direcciones cardinales? De hecho, un modelo con al menos cuatro direcciones de sintonizado se ha demostrado recientemente capaz de ajustar razonablemente un amplio conjunto de datos experimentales, incluyendo datos sobre discriminabilidad de texturas definidas por diferencias puramente cromáticas [Li y Lennie (1997)] y efectos de habituación e inducción en la apariencia del color [Muller y Lennie (1995)]. Si no existen agrupamientos de las direcciones de sintonizado en torno a un número pequeño y discreto de ellas, debería establecerse que el comportamiento del sistema real es equivalente a una organización más simple en la que sí existieran dos (o mejor cuatro) direcciones privilegiadas [Geisler y Albrecht (1997)]. Y es en esta línea por donde probablemente deberemos orientar nuestra futura investigación.

5.2.3. Descriptores perceptuales

Se proponen las siguientes expresiones para los descriptores perceptuales en función de ATD_p , en consonancia con las definiciones de la CIE de la luminosidad Q , el tono H , el colorido M y la saturación s [CIE (1987)]:

$$Q = \sqrt{A_p^2 + T_p^2 + D_p^2} \quad (5.24)$$

$$H = \frac{10}{9} \cdot \arctg\left(\frac{D_p}{T_p}\right) \quad (5.25)$$

$$M = \sqrt{T_p^2 + D_p^2} \quad (5.26)$$

$$s = \frac{M}{Q} = \frac{\sqrt{T_p^2 + D_p^2}}{\sqrt{A_p^2 + T_p^2 + D_p^2}} \quad (5.27)$$

Algunos de los rasgos de ATTD están inspirados en ATD95 (ver apéndice A), y por tanto nuestro modelo tiende, al igual que el de Guth, a proporcionar un plano TD_p perceptualmente uniforme, no a situar los tonos únicos experimentales en los ejes $T_p=0$, $D_p=0$. El descriptor H en estos modelos está más próximo, pues, a un ángulo de tono que a una cuadratura de tono, aunque en el capítulo 8, dedicado al testeo de ATTD, cumplirá ambas funciones, que en el modelo de apariencia de Hunt son desempeñadas por descriptores distintos (ver apéndice B). El factor $10/9$ se introduce para poder comparar más adelante las predicciones de ATTD y ATD95 con la escala centesimal de cuadratura de Hunt.

En la figura 5.8 se muestra un esquema de la estructura del modelo ATTD en el que quedan resumidos todos los pasos explicados en el presente capítulo, desde los valores triestímulo XYZ hasta los descriptores perceptuales. El esquema indica además la participación del fondo en las etapas con adaptación multiplicativa o sustractiva. Se incluye la distancia perceptual umbral δ con la cual se calcularán las predicciones del modelo sobre umbrales de detección y discriminación (ver apartado 8.5).

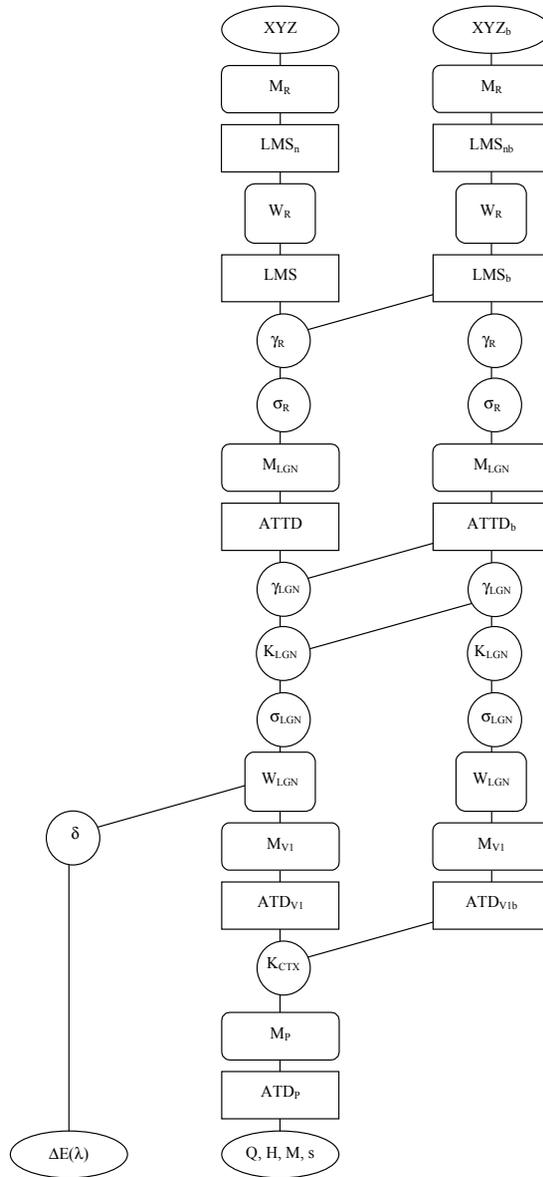


Figura 5.8. Estructura del modelo ATTD.

5.3. Consideraciones de carácter general

-Suponemos que nuestro modelo considera un test de pequeño tamaño, de unos 2° , rodeado por un fondo uniforme.

-Los parámetros de ATTD no varían con la luminancia del estímulo presentado.

-No hemos considerado no linealidades de tipo Naka-Rushton en la fase cortical del modelo, a pesar de que se sabe que las células complejas, situadas en el córtex, responden de manera no lineal. Por otra parte, tampoco hemos considerado la existencia de mecanismos multiplicativos en el córtex, aunque es probable que los fenómenos de habituación (adaptación temporal) tengan soporte fisiológico en algún mecanismo multiplicativo del córtex, ya que se ha demostrado que las células del LGN no se habitúan [Lennie et al. (1994)].

-El modelo no tiene en cuenta la contribución de los bastones, y por tanto es aconsejable trabajar con él sólo en la región fotópica, por encima de 1 cd/m^2 [Wyszecki y Stiles (1982) p. 354].

-ATTD sirve tanto para fondo nulo como para fondo no nulo.

-El modelo es de colores no relacionados en el sentido de que no utiliza una referencia blanca ni estima claridades o cromas. La ausencia de referencia no nos impide obtener predicciones de fenómenos de inducción cromática.

-No se consideran en ATTD mecanismos de adaptación temporales. Por lo tanto, sus parámetros no varían con el tiempo de presentación del adaptador. Consideraremos que el modelo supone una adaptación incompleta.

-Los mecanismos sustractivos del modelo son espaciales, del tipo centro-periferia. Aunque también existen en el sistema visual mecanismos temporales, no los consideramos en el presente estudio.

-En cuanto a los mecanismos de adaptación cromática, Ware y Cowan [Ware y Cowan (1982)] llevaron a cabo un testeo de distintos tipos de modelos lineales de dos etapas para averiguar qué combinaciones de mecanismos ajustaban mejor unos datos experimentales de 15 pares correspondientes bajo cambio de adaptación, para 5 adaptaciones distintas, y llegaron a la conclusión de que las dos combinaciones más apropiadas eran la de multiplicativo en receptores más sustractivo en fase oponente [Hurvich (1981), Shevell (1980), Walraven (1980)], y la de multiplicativo en receptores más multiplicativo en fase oponente [Guth et al. (1980), Hurvich (1981)]. La base de datos LUTCHI [Luo et al. (1995)] también señala la necesidad de un mecanismo multiplicativo en receptores y uno sustractivo en fase oponente. Por otra parte, Finkelstein explica sus datos experimentales mediante unos canales rojo-verde y azul-amarillo con no linealidades, multiplicativa en receptores, multiplicativa en fase oponente (sólo en el canal azul-amarillo) y sustractiva en fase oponente [Finkelstein (1993a, 1993b)]. La elección de mecanismos para nuestro modelo (multiplicativa en receptores, multiplicativa opcional en la primera fase oponente y sustractiva en la segunda fase oponente) es compatible con las conclusiones de estos autores.

Capítulo 6. Determinación de los parámetros de ATTD

6.1. Procedimiento

6.1.1. Parámetros libres del modelo

En el capítulo anterior hemos propuesto la estructura de las etapas del modelo ATTD, pero tenemos que especificar cuál es el valor más adecuado para cada uno de los 33 parámetros que por ahora hemos dejado libres, y que resumimos en la tabla 6.I. Conseguiremos nuestro propósito definiendo un coeficiente que exprese el grado de divergencia entre una base de datos experimentales fisiológicos y psicofísicos y las predicciones del modelo de dichos datos para unos valores determinados de los parámetros. Trabajando con la implementación del modelo en entorno MATLAB, trataremos de minimizar el valor de este coeficiente de ajuste, escogiendo luego los valores numéricos de los parámetros asociados al valor más bajo. Repetiremos este proceso para las tres variantes del modelo, comparando luego los resultados.

En el proceso de minimización se puede restringir la variación de los parámetros a ciertos rangos de valores numéricos para favorecer que los valores óptimos tengan significado físico. No basta con que el modelo resultante proporcione unas curvas bien ajustadas a los datos experimentales; además los valores numéricos de los parámetros resultantes deben ser, en la medida de lo posible, compatibles con sus definiciones hechas en base a la fisiología del sistema visual. En algunos casos se aplicará el razonamiento anterior a los signos de los parámetros, exigiendo que sean negativos o

positivos. En el caso de las constantes sustractivas, se exigirá que estén comprendidas entre 0 y 1.

Pesos de los tres tipos de conos	W_L, W_M, W_S
Constante de la adaptación multiplicativa de los receptores	γ_R
Constante de semisaturación de la no linealidad de los receptores	σ_R
Pesos de la contribución de L y M a A_{LGN}	$M_{LGN}(1,1), M_{LGN}(1,2)$
Pesos de la contribución de L y M a T_{LM}	$M_{LGN}(2,1), M_{LGN}(2,2)$
Pesos de la contribución de L y M a T_{ML}	$M_{LGN}(3,1), M_{LGN}(3,2)$
Pesos de la contribución de L, M y S a D_{LGN}	$M_{LGN}(4,1), M_{LGN}(4,2), M_{LGN}(4,3)$
Constantes de la adaptación multiplicativa del LGN	$\gamma_A, \gamma_T, \gamma_D$
Constante sustractiva del canal acromático Magno	K_{LGN}
Constante de semisaturación de la no linealidad del LGN	σ_{LGN}
Factores de escalado de $ATTD_{LGN}$	W_A, W_{LM}, W_{ML}, W_D
Pesos de la contribución de T_{LM} y T_{ML} a A_{V1}	$M_{V1}(1,1), M_{V1}(1,2)$
Peso de la contribución de T_{ML} a T_{V1}	$M_{V1}(2,2)$
Constantes sustractivas del córtex	K_A, K_T, K_D
Pesos de la contribución de T_{V1} y D_{V1} a T_P	$M_P(2,2), M_P(2,3)$
Pesos de la contribución de T_{V1} y D_{V1} a D_P	$M_P(3,2), M_P(3,3)$

Tabla 6.1. Resumen de los parámetros libres del modelo ATTD. En la variante 1 del modelo no participan γ_A , γ_T y γ_D , y en la variante 3 no participa γ_T .

6.1.2. Datos de referencia y predicciones del modelo

Veremos a continuación cuáles fueron los datos neurofisiológicos y psicofísicos escogidos para los 17 items de

referencia, así como las predicciones del modelo que debían aproximarse a estos datos.

6.1.2.1. Respuestas de células del LGN

El primer conjunto de datos de referencia está formado por las respuestas de células del LGN determinadas por Lee y colaboradores [Lee et al. (1987)]. En la tabla 4.1 se muestra un resumen de las características de cada tipo de célula y en el apartado 4.6.1 se explica el método para reproducirlas. Como se ha comentado en el capítulo 5, se escogieron las células +L-M(WL) para representar a T_{LM} , las +M-L(WS) para T_{ML} y las +S-L(NS) para D_{LGN} (ver figura 5.5). Debido a ciertos requerimientos del proceso de cálculo que se explicará más adelante, dividimos estas tres curvas por 20 para que sean del orden de la unidad.

Como referencia para $A_{LGN}(\lambda)$ se usó el Observador Patrón de la CIE modificado por Judd [Judd (1951)] y refinado por Vos [Vos (1978)], ya que reproduce con bastante precisión la sensibilidad espectral de las células ganglionares del macaco determinada mediante fotometría de parpadeo [Lee et al. (1988)].

Las 4 curvas de referencia se compararon con las curvas del LGN dadas por el modelo ATTD para una entrada correspondiente a estímulos monocromáticos de energía $10E_0$, con un fondo de coordenadas cromáticas y luminancia $xyY_b=(0.404,0.410,110)$. E_0 es la energía para la que están escaladas las funciones de igualación del Observador Patrón colorimétrico CIE1931, y expresada en vatios vale $1/K_m=1/683$. Para estas curvas del LGN y para las curvas del córtex usaremos una energía de entrada de $10E_0$ porque éste es el centro del intervalo logarítmico de energías en el que queremos que nuestro modelo sea estable.

Para estas curvas y las de los dos siguientes bloques empleamos un muestreo de 5 nm entre 400 y 700 nm. Aunque en $D_P(\lambda)$ consideraremos el amarillo positivo para seguir el criterio de signos de Jameson y Hurvich, en esta etapa intermedia del LGN consideramos positivo el azul, ya que las células son del tipo S-on.

6.1.2.2. Canales perceptuales con adaptación blanca

El segundo conjunto de datos utilizados en la referencia está formado por la $V(\lambda)$ de Judd-Vos y los canales perceptuales $T(\lambda)$ y $D(\lambda)$ de Jameson y Hurvich con adaptación blanca [Jameson y Hurvich (1955)] (ver figura 4.4). Estas curvas se compararon con las $ATD_P(\lambda)$ obtenidas con el modelo para una entrada espectral de energía $10E_0$, con fondo equienergético de 31.83 cd/m^2 (10 miliLamberts).

6.1.2.3. Canales perceptuales con adaptación de color

Un tercer grupo de datos son las sensibilidades espectrales de T y D con cuatro adaptaciones cromáticas de Jameson y Hurvich [Jameson y Hurvich (1956)]. Estas curvas se introdujeron para permitir la correcta selección de los parámetros libres relacionados con los mecanismos de adaptación multiplicativos y sustractivos, y se pueden derivar de las funciones de igualación XYZ CIE1931 así:

$$T_B(\lambda) = 1.009 \cdot r(\lambda) - 1.009 \cdot g(\lambda) \quad (6.1)$$

$$D_B(\lambda) = 1.028 \cdot y(\lambda) - 0.961 \cdot b(\lambda)$$

$$T_G(\lambda) = 1.017 \cdot r(\lambda) - 0.977 \cdot g(\lambda) \quad (6.2)$$

$$D_G(\lambda) = 1.004 \cdot y(\lambda) - 1.004 \cdot b(\lambda)$$

$$T_Y(\lambda) = 0.998 \cdot r(\lambda) - 0.998 \cdot g(\lambda) \quad (6.3)$$

$$D_Y(\lambda) = 0.988 \cdot y(\lambda) - 1.016 \cdot b(\lambda)$$

$$T_R(\lambda) = 0.974 \cdot r(\lambda) - 1.039 \cdot g(\lambda) \quad (6.4)$$

$$D_R(\lambda) = 0.994 \cdot y(\lambda) - 0.994 \cdot b(\lambda)$$

donde las sensibilidades espectrales de los mecanismos r, g, y, b se obtienen así:

$$b(\lambda) = 13.0682 \cdot \bar{y}(\lambda) + 0.2672 \cdot \bar{z}(\lambda) \quad (6.5)$$

$$g(\lambda) = -0.6736 \cdot \bar{x}(\lambda) + 14.0018 \cdot \bar{y}(\lambda) + 0.0040 \cdot \bar{z}(\lambda) \quad (6.6)$$

$$y(\lambda) = -0.0039 \cdot \bar{x}(\lambda) + 13.4680 \cdot \bar{y}(\lambda) - 0.1327 \cdot \bar{z}(\lambda) \quad (6.7)$$

$$r(\lambda) = 0.3329 \cdot \bar{x}(\lambda) + 13.0012 \cdot \bar{y}(\lambda) - 0.0011 \cdot \bar{z}(\lambda) \quad (6.8)$$

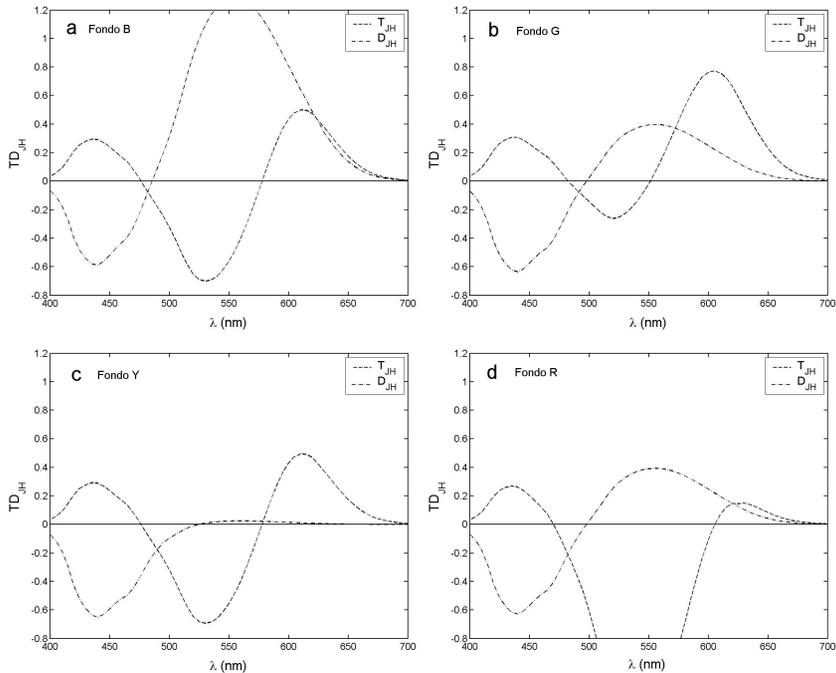


Figura 6.1. Sensibilidades espectrales de los canales T y D con cuatro adaptaciones cromáticas, de Jameson y Hurvich. a) Fondo B; b) Fondo G; c) Fondo Y; d) Fondo R.

Estas 8 curvas, mostradas en la figura 6.1, se compararon con las respuestas perceptuales del modelo para entradas espectrales de energía $10E_0$, sobre fondos de 31.83 cd/m^2 y de cromaticidades dadas por $p_c=1$ y $\lambda=475 \text{ nm}$, $\lambda=500 \text{ nm}$, $\lambda=580 \text{ nm}$, $\lambda_c=500 \text{ nm}$. Estas cuatro cromaticidades, que coinciden con los tonos únicos espectrales azul, verde, amarillo y rojo determinados por Jameson y Hurvich [Jameson y Hurvich (1955)], serán utilizadas repetidas veces a lo largo del presente estudio, de modo que nos referiremos a ellas con las notaciones abreviadas B, G, Y y R, respectivamente.

6.1.2.4. Luminosidad espectral de luminancia constante

Otra curva de referencia será la luminosidad espectral de luminancia constante obtenida como cociente de la $V(\lambda)$ de

comparación directa [CIE TC-1.4 (1978)] y la $V(\lambda)$ de Judd-Vos, considerada entre las longitudes de onda de 420 y 660 nm (figura 6.2). La compararemos con la predicción del modelo para la luminosidad espectral de luminancia constante 10 cd/m^2 , con un fondo equienergético de 1 cd/m^2 , y con un reescalado de la curva final dado por la constante c_Q , que será también un parámetro libre de la minimización aunque no pertenece al modelo propiamente dicho.

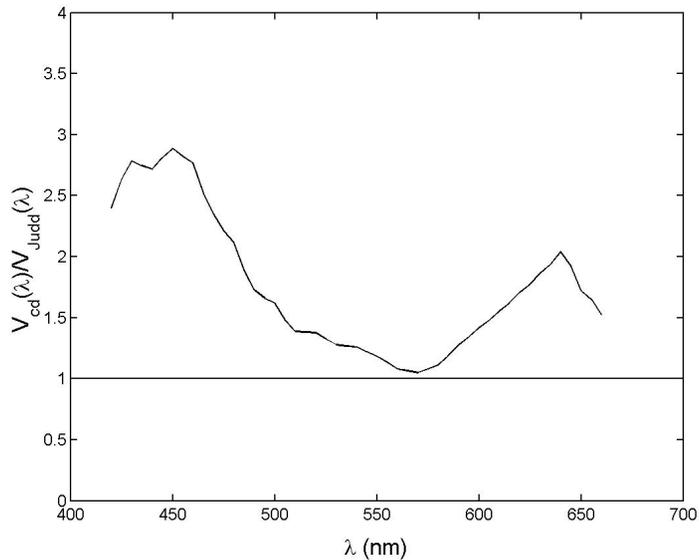


Figura 6.2. Cociente de la $V(\lambda)$ de comparación directa y la $V(\lambda)$ de Judd-Vos. El denominador es comparable a una $V(\lambda)$ medida por fotometría de parpadeo.

6.1.2.5. Estabilidad del blanco perceptual

Por último, deseamos que haya una buena estabilidad del blanco perceptual, es decir, queremos minimizar la distancia de éste al blanco equienergético, calculada en alguno de los espacios disponibles, para distintos valores de luminancia. Para ello ajustamos a una función nula el colorido dado por el modelo para tests equienergéticos de luminancias distribuidas uniformemente en una

escala logarítmica entre 1 cd/m² y 1000 cd/m², vistos sobre un fondo equienergético de 10 cd/m². De esta manera conseguimos nuestro objetivo, ya que el colorido no es más que la distancia entre el blanco perceptual y el equienergético, medida en el plano TD_p.

6.1.3. Coeficiente de ajuste

La divergencia entre los dos conjuntos de valores para una cualquiera de las 17 curvas antes mencionadas (que designaremos con el subíndice *i*) vendrá dada por el siguiente coeficiente de ajuste individual [Luo y Hunt (1998b)]:

$$CA_i = \sqrt{\frac{\sum (V_{ref_i} - V_{ATTD_i})^2}{n_p}} \quad (6.9)$$

que se puede interpretar como una desviación cuadrática promedio de los valores V_{ATTD} predichos por nuestro modelo respecto de los V_{ref} de referencia. El factor de peso es el mismo para todos los puntos de la curva. Como ambas colecciones de datos están normalizadas a un mismo orden de magnitud no es necesario dividir por el promedio de los valores de referencia. Se divide por el número de puntos del barrido n_p para poder comparar coeficientes de ajuste de minimizaciones hechas con distintos muestreos. Este coeficiente de ajuste individual se calculará por separado para las 17 curvas, y definimos el coeficiente de ajuste total CA asociado a un conjunto determinado de parámetros de ATTD como la media aritmética de los 17 coeficientes individuales:

$$CA = \frac{1}{17} \cdot \sum_{i=1}^{17} CA_i \quad (6.10)$$

Se trata por tanto de encontrar los valores de los parámetros que minimizan la función escalar CA , imponiendo restricciones en los signos o valores de algunos de ellos.

El programa de minimización de MATLAB empleado utiliza el algoritmo simplex de búsqueda del mínimo, recurriendo en alguna de

las iteraciones, si es necesario, al modo hessiano de búsqueda. La minimización termina cuando las variaciones del coeficiente de ajuste y de los parámetros entre dos iteraciones consecutivas son menores que unas ciertas tolerancias fijadas antes de iniciar el ajuste. Las tolerancias escogidas tanto para el CA como para los parámetros fueron de 0.001. El número máximo de iteraciones permitidas para cada minimización fue de 5000.

La selección del mejor entre los conjuntos de parámetros obtenidos por minimización se hará atendiendo no sólo al valor del CA total sino también al de los CA_i individuales por separado. No son deseables las soluciones que mejoren el ajuste de algunas de las curvas y empeoren excesivamente el de otras, aunque den lugar globalmente a una disminución del valor de CA. Se desea que el ajuste mejore a ser posible en todas las características consideradas.

6.2. Resultados

6.2.1. Parámetros óptimos del modelo

El conjunto de parámetros óptimos obtenidos para cada variante del modelo tras la minimización de CA queda reflejado en la tabla 6.II.

Los pesos W_R de los conos son muy pequeños, siendo W_L y W_M similares y W_S de valor más bajo. En las tres variantes el parámetro γ_R es del orden de 0'03 y σ_R del orden de 3'4. Los coeficientes de M_{LGN} son muy parecidos en los tres casos, y $M_{LGN}(4,2)$ tiende a cero, lo que es consistente con la elección de +S-L(NS) como referencia, aunque en la variante 1 sí hay una pequeña contribución inhibitoria de los conos M en D_{LGN} , lo cual es compatible con la fisiología conocida del sistema visual [De Monasterio y Gouras (1975), Derrington et al. (1984)]. Las γ_{LGN} presentan valores distintos según el canal considerado. Las γ_A y γ_D óptimas son aproximadamente iguales en las variantes 2 y 3. La K_{LGN} es del 3%, demasiado pequeña teniendo en cuenta que hace referencia a un mecanismo con antagonismo centro-periferia. La σ_{LGN} es del orden de 0'01 en las tres variantes. Las W_{LGN} son también parecidas en los tres casos.

Parámetro	Variante 1	Variante 2	Variante 3
W_L	0.000026	0.000019	0.000029
W_M	0.000027	0.000019	0.000029
W_S	0.000005	0.000007	0.000011
γ_R	0.0311	0.0323	0.0717
σ_R	3.4992	3.3821	3.3995
$M_{LGN}(1,1)$	0.8190	0.9312	0.9365
$M_{LGN}(1,2)$	0.6347	0.7171	0.7699
$M_{LGN}(2,1)$	1.6631	1.6100	1.7527
$M_{LGN}(2,2)$	-1.7934	-1.8111	-1.9499
$M_{LGN}(3,1)$	-0.7578	-0.6638	-0.7350
$M_{LGN}(3,2)$	0.9259	0.8547	0.9392
$M_{LGN}(4,1)$	-0.3517	-0.3730	-0.4398
$M_{LGN}(4,2)$	-0.0016	0	0
$M_{LGN}(4,3)$	1.4238	1.0648	1.1673
γ_A		0.7680	0.7880
γ_T		1.0586	
γ_D		1.3906	1.4382
$K_{LGN} (\%)$	3.39	3.49	3.41
σ_{LGN}	0.0181	0.0152	0.0247
W_A	3.3618	3.0377	3.2430
W_{LM}	4.1978	4.0640	4.2343
W_{ML}	2.9335	3.0275	3.0353
W_D	3.3437	2.9461	3.1579
$M_{V1}(1,1)$	0.3561	0.3529	0.3725
$M_{V1}(1,2)$	0.6505	0.6786	0.7047
$M_{V1}(2,2)$	-1.1854	-0.7736	-0.1469
$K_A (\%)$	100	87.62	100
$K_T (\%)$	11.19	13.02	14.20
$K_D (\%)$	23.31	24.64	24.51
$M_P(2,2)$	0.5400	0.6230	0.7734
$M_P(2,3)$	0.6269	0.6547	0.6324
$M_P(3,2)$	-0.0454	-0.0552	-0.0703
$M_P(3,3)$	-0.8964	-0.9481	-0.9113
c_Q	1.2453	1.3045	1.2985

Tabla 6.II. Parámetros óptimos obtenidos por minimización del coeficiente de ajuste para cada variante del modelo.

$M_{V_1}(1,1)$ y $M_{V_1}(1,2)$ son positivos, como cabía esperar de acuerdo con nuestra propuesta de considerar la combinación de L y M a la que dan lugar, la A_{V_1} anterior al mecanismo sustractivo, como una señal de Tipo III de sólo centro. El peso $M_{V_1}(2,2)$ de la contribución de T_{ML} a T_{V_1} es ligeramente distinto según la variante, pero no ha tendido a ser positivo en ninguna de las tres, lo cual es compatible con nuestras previsiones a la hora de exigir los signos de los parámetros. Las K_{CTX} presentan valores distintos según el canal considerado. K_A es alta en los tres casos; en dos de las variantes llega al 100%, es decir, se resta todo el fondo al test. La constante K_T está en torno al 10% y la K_D en torno al 24%.

Los elementos de M_P son muy parecidos entre variantes. Los coeficientes $M_P(2,2)$ y $M_P(2,3)$ resultantes son positivos. Teniendo en cuenta el cambio de polaridad del canal azul-amarillo, este resultado está de acuerdo con las indicaciones de distintos autores [Thorell et al (1984), Judd (1949)] de que la reemergencia del rojo en las cortas longitudes de onda del canal T_P requiere interacción sustractiva de los T y D anteriores, o sea, en nuestro caso combinación aditiva de T_{V_1} y D_{V_1} . En cuanto a los coeficientes $M_P(3,2)$ y $M_P(3,3)$ obtenidos, son ambos negativos, aunque $M_P(3,2)$ es muy pequeño comparado con $M_P(3,3)$, lo cual apunta en la dirección de que apenas hay cambios en la forma del canal D entre el LGN y el córtex, aparte del cambio de polaridad.

6.2.2. Predicciones óptimas del modelo

Las curvas óptimas obtenidas independientemente para cada variante del modelo son prácticamente iguales en los tres casos.

El ajuste para las curvas del LGN (figura 6.3) es bueno, excepto tal vez para $D_{LGN}(\lambda)$. En cuanto a los puntos neutros de las curvas oponentes, $T_{LM}(\lambda)$ y $T_{ML}(\lambda)$ reproducen bien los valores de referencia de 570 nm y 580 nm. El punto neutro del modelo para $D_{LGN}(\lambda)$ aparece a 504 nm, ligeramente por encima del de referencia, de 496 nm.

El modelo también predice correctamente las curvas de Jameson y Hurvich con adaptación blanca (figura 6.4), y reproduce razonablemente bien las longitudes de onda de sus puntos neutros (475, 500 y 580 nm), aunque la predicción de ATTD para el azul único, de 470 nm, es ligeramente inferior a la de referencia. Hay que hacer notar que tanto en el LGN como en el córtex, la curva acromática presenta en los extremos del espectro valores negativos aunque muy próximos a cero; este comportamiento es debido a la adaptación sustractiva. Es trivial comprobar en las gráficas que entre el LGN y el córtex el canal D cambia su polaridad pero apenas modifica su forma, mientras que el canal T sí altera radicalmente su aspecto, pasando a tener dos puntos neutros espectrales.

La curva de luminosidad a luminancia constante (figura 6.5) no llega, como la de referencia, a un entorno del valor 1 en su punto más bajo, pero su forma es similar. Tiene un mínimo local en 490 nm que no aparece en la curva de referencia, y un mínimo absoluto en 585 nm, por encima de la λ de referencia de 570 nm. No se aprecian las caídas en la luminosidad que presenta la curva de referencia en los dos extremos del espectro, aunque ambas sí coinciden en asignar mayor luminosidad al extremo azul del espectro que al rojo.

En cuanto a la estabilidad del blanco perceptual (figura 6.6), su colorido es casi nulo en todo el rango considerado. El mínimo abrupto que se aprecia en la gráfica se debe a que el blanco perceptual se encuentra, en el diagrama cromático, en lados opuestos respecto al blanco equienergético en función de la luminancia considerada.

En lo que respecta a las predicciones de las curvas de Jameson y Hurvich con fondos de color (figura 6.7), los canales T_P y D_P tienen en algunos casos una respuesta demasiado grande en los extremos del espectro, y a veces los puntos neutros no coinciden exactamente con los de referencia, pero sí se reproduce cualitativamente la variación en la contribución de los distintos lóbulos dependiendo del tipo de adaptación utilizada.

6. Determinación de los parámetros de ATTD

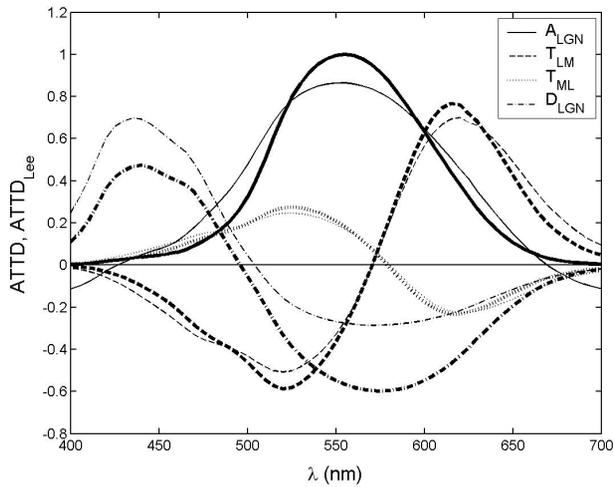


Figura 6.3. Predicciones óptimas de ATTD en cuanto a respuestas de células del LGN. Las predicciones del modelo se muestran en trazo normal, y los datos de referencia en trazo grueso.

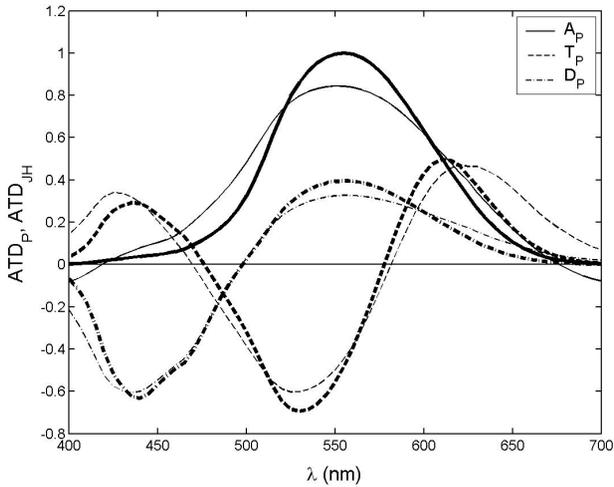


Figura 6.4. Predicciones óptimas de ATTD de los canales perceptuales de Jameson y Hurvich. Las predicciones del modelo se muestran en trazo normal, y los datos de referencia en trazo grueso.

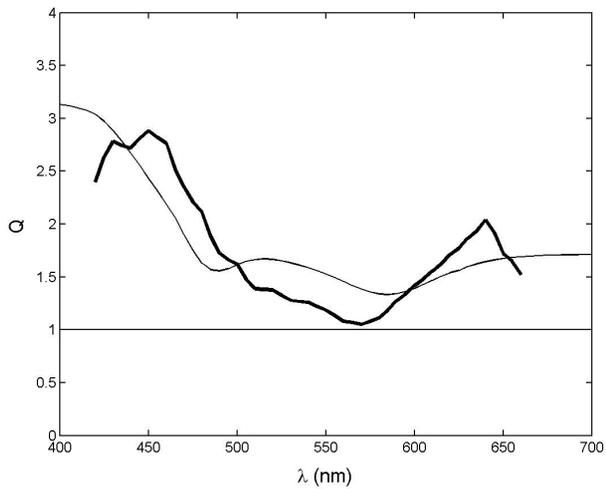


Figura 6.5. Predicción óptima de ATTD para la luminosidad espectral de luminancia constante. La predicción del modelo se muestra en trazo normal, y los datos de referencia en trazo grueso.

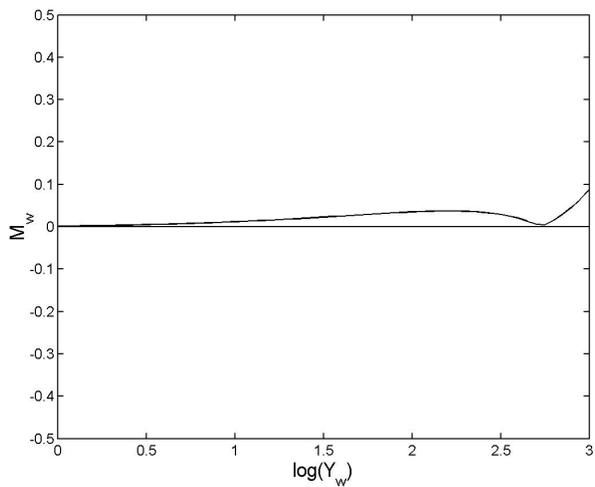


Figura 6.6. Predicción óptima de ATTD para la estabilidad del blanco perceptual.

6. Determinación de los parámetros de ATTD

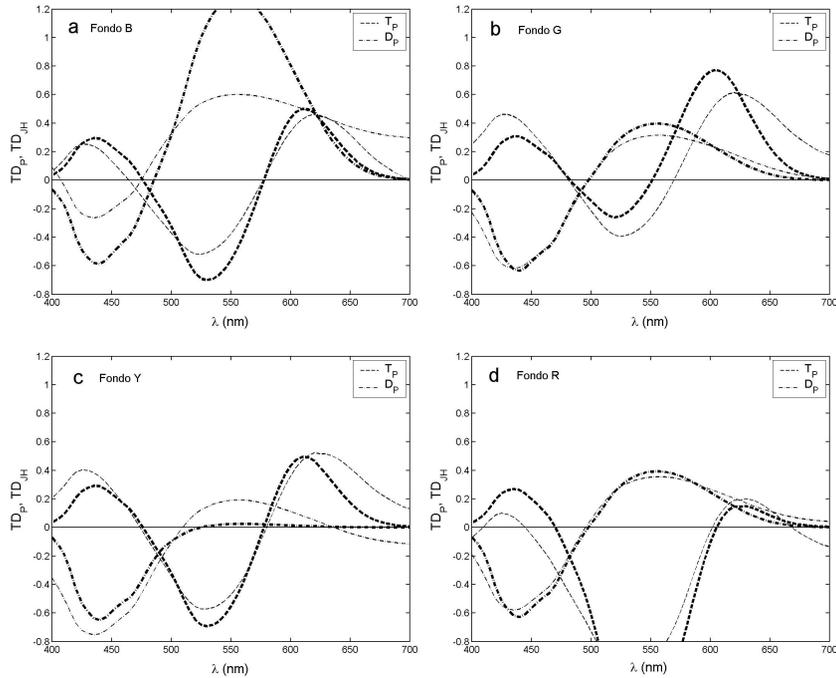


Figura 6.7. Predicciones óptimas de ATTD para las sensibilidades espectrales de T y D con cuatro adaptaciones cromáticas, de Jameson y Hurvich. Las predicciones del modelo se muestran en trazo normal, y los datos de referencia en trazo grueso. a) Fondo B; b) Fondo G; c) Fondo Y; d) Fondo R.

6.2.3. Coeficientes de ajuste mínimos

En la tabla 6.III se muestran los coeficientes de ajuste individuales obtenidos, y en la 6.IV los coeficientes parciales y total. Los coeficientes parciales del LGN y el córtex, que no participan de manera directa en la elección de los parámetros óptimos, se definen:

$$CA_{LGN} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 CA1_i \quad (6.11)$$

$$CA_{CTX} = \frac{1}{11} \cdot \sum_{i=1}^{11} CA2_i \quad (6.12)$$

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
CA1: Respuestas del LGN de Lee et al.			
CA_A	8.55	8.87	8.67
CA_{LM}	5.24	5.18	5.15
CA_{ML}	1.93	1.95	2.00
CA_D	19.78	18.84	17.75
CA2: Canales perceptuales de Jameson y Hurvich			
CA_{AW}	8.95	9.14	8.77
CA_{TW}	9.66	9.66	9.65
CA_{DW}	5.67	5.61	5.59
CA_{TB}	10.35	10.39	9.96
CA_{DB}	35.18	35.58	35.08
CA_{TG}	20.02	20.79	21.41
CA_{DG}	6.05	5.98	5.96
CA_{TY}	12.42	12.15	11.92
CA_{DY}	13.10	13.04	13.15
CA_{TR}	22.84	25.18	26.85
CA_{DR}	5.49	5.49	5.42
Luminosidad espectral de luminancia constante			
CA_Q	30.41	30.13	30.43
Estabilidad del blanco perceptual			
CA_M	2.61	1.85	2.28

Tabla 6.III. Coeficientes de ajuste individuales obtenidos (en tantos por ciento).

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
CA_{LGN}	8.87	8.71	8.39
CA_{CTX}	13.61	13.91	13.98
CA	12.84	12.93	12.94

Tabla 6.IV. Coeficientes de ajuste parciales y total obtenidos (en tantos por ciento).

Los coeficientes de ajuste individuales, parciales y total son similares en las tres variantes del modelo. Se comprueba que el ajuste ha sido ligeramente mejor en las curvas del LGN que en las del córtex. El alto valor de CA_D confirma el mal ajuste observado previamente para $D_{LGN}(\lambda)$. Las tres variantes presentan un mal ajuste de la curva de luminosidad. Los CA totales obtenidos han sido del 13%,

aproximadamente. Luo y colaboradores [Luo et al. (1991a)] comprobaron que la variabilidad entre observadores en su base de datos LUTCHI de estimación de magnitud era del 8% para el tono, del 13% para la claridad y del 17% para el colorido. Por tanto, aunque nuestro CA se haya obtenido como promedio de CA individuales asociados a descriptores diferentes, podemos considerar un valor del 13% como aceptable.

Como conclusiones finales del presente capítulo, podemos decir que los valores óptimos encontrados para los parámetros del modelo respaldan por un lado nuestra propuesta de considerar la A_{V1} anterior al mecanismo sustractivo como una señal de Tipo III de sólo centro, y permiten por otra parte que nuestro modelo reproduzca algunos fenómenos demostrados experimentalmente, tales como la reemergencia del rojo en las cortas longitudes de onda del canal T_P debida a la interacción de señales T y D de una etapa previa, o el hecho de que la sensibilidad espectral $D(\lambda)$ apenas experimenta cambios en su forma entre el LGN y el córtex. A pesar del elevado valor de CA_Q , el modelo consigue un buen ajuste de las respuestas de células del LGN y de las curvas de Jameson y Hurvich con adaptación blanca, siendo también buena la estabilidad de su blanco perceptual. En lo que respecta a las curvas de adaptación cromática, ATTD consigue reproducir cualitativamente la variación en la contribución de los distintos lóbulos según el caso. Los CA totales obtenidos han sido aproximadamente del 13%, valor que se puede considerar satisfactorio.

El hecho de que las curvas de predicciones del modelo y los coeficientes de ajuste sean similares para las tres variantes no implica necesariamente que las curvas de testeo vayan a ser también iguales, así que las calcularemos para los tres casos.

Capítulo 7. Análisis del modelo

Una vez conocidos los valores de los parámetros del modelo, realizaremos un análisis de diversos aspectos básicos de su funcionamiento. En primer lugar estudiaremos la evolución de la señal introducida a lo largo de las distintas etapas del modelo, haciendo especial hincapié en el funcionamiento de los mecanismos de adaptación cromática. A continuación analizaremos la estabilidad del modelo desde dos puntos de vista: en primer lugar comprobaremos la estabilidad de las sensibilidades espectrales con las variaciones de energía, y en segundo lugar estudiaremos la estabilidad del blanco perceptual del modelo con variaciones de la luminancia. Todos los cálculos descritos en este capítulo y el siguiente se realizaron para las distintas variantes del modelo, obteniéndose resultados similares en las tres. Por tanto, no podemos seleccionar una de ellas como mejor que las demás, aunque por razones de extensión sólo centremos nuestros comentarios en (y mostremos gráficas de) la variante 1.

7.1. Evolución de la señal en las distintas etapas del modelo

Representamos gráficamente las distintas etapas de la evolución de una entrada espectral de energía $10E_0$ al modelo. Nos centraremos en el caso en el que el fondo es equienergético (cromaticidad a la que de aquí en adelante nos referiremos de forma abreviada como W), pero en algunas etapas con mecanismos de adaptación cromática consideramos también los casos de fondos con las cromaticidades B y R definidas en el apartado 6.1.2.3. La luminancia del fondo será de 31.83 cd/m^2 para los tres casos. Tanto el valor de la energía de entrada como las cromaticidades y luminancia de los distintos fondos han sido utilizados previamente para diversas curvas del coeficiente de ajuste, por lo que las curvas perceptuales resultantes deben coincidir con las mostradas en el capítulo 6.

7. Análisis del modelo

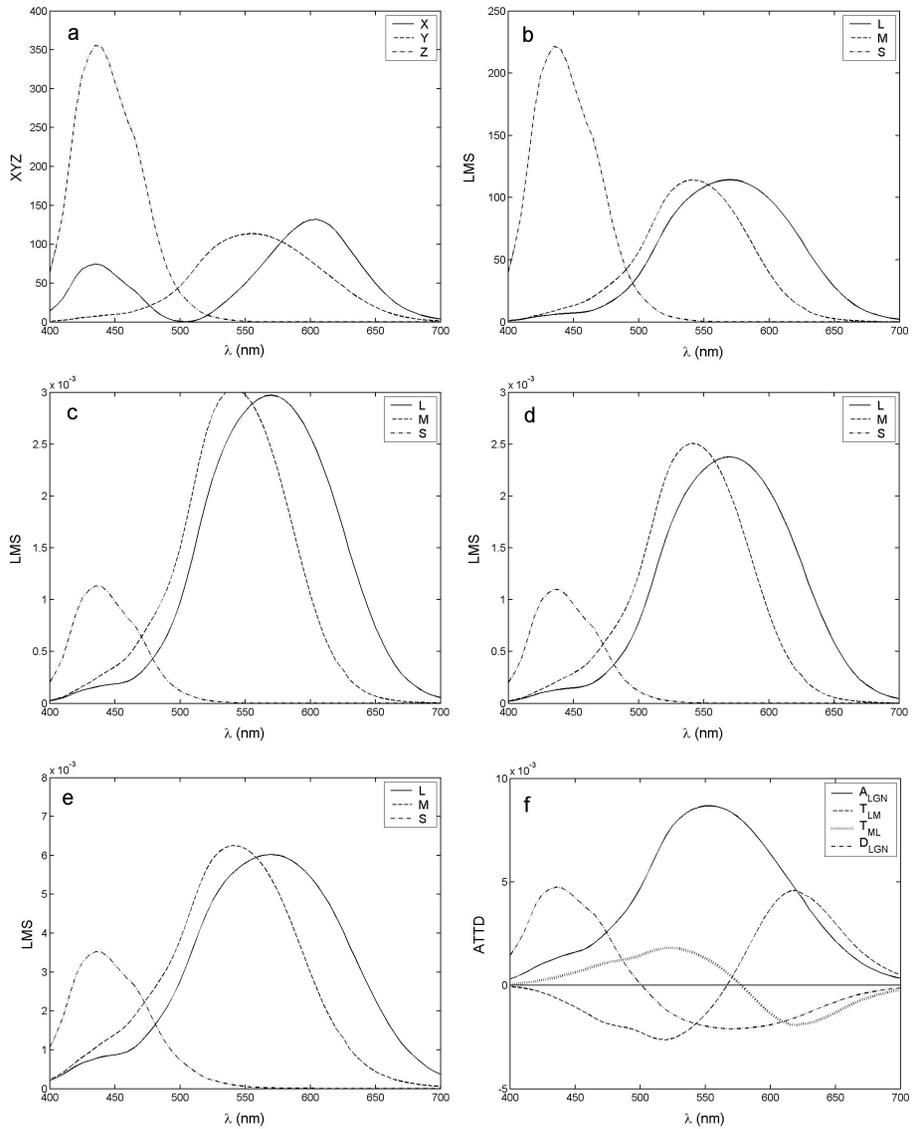


Figura 7.1. Etapas del modelo ATTD. a) Renormalización de la luminancia; b) Transformación lineal a señales de conos; c) Reescalado de los receptores; d) Adaptación multiplicativa de los receptores; e) No linealidad de los receptores; f) Transformación lineal de primera etapa oponente.

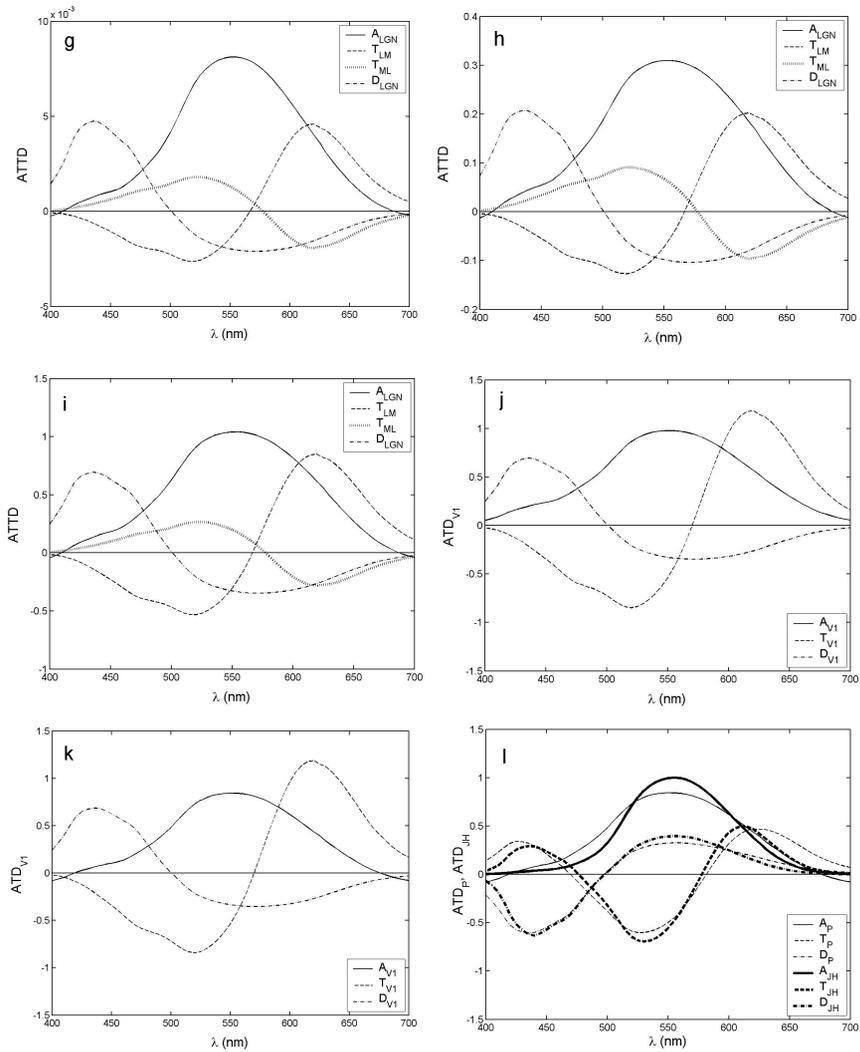


Figura 7.1. Etapas del modelo ATTD. g) Adaptación sustractiva del Magno; h) No linealidad opoente; i) Reescalado de la fase opoente; j) Transformación lineal de segunda etapa opoente; k) Adaptación sustractiva del Parvo; l) Transformación lineal de tercera etapa opoente (con las predicciones del modelo en trazo fino y los datos de Jameson y Hurvich en trazo grueso).

El punto de partida son las funciones de igualación XYZ(λ) (salvo el factor 10, son iguales a las de la figura 5.1). La normalización de luminancias asociada al tamaño de la pupila del ojo (figura 7.1a), además de cambiar el fondo de escala global, disminuye la altura relativa de Y(λ) y en menor medida del lóbulo de altas λ de X(λ) con respecto a Z(λ) y a la parte de cortas λ de X(λ). Nótese que no se trata de una transformación lineal, ya que la normalización es distinta para cada λ . La figura 7.1b muestra los LMS(λ) obtenidos tras aplicar la matriz M_R . Las curvas de L y M son de igual altura y más bajas que la de S. Al aplicar los pesos W_R (figura 7.1c), la altura relativa de S(λ) disminuye, pasando a ser más baja que las otras dos; recordemos que W_S es pequeño en comparación con W_L y W_M .

La adaptación multiplicativa de los receptores merece un estudio más detallado. Con fondo blanco (figura 7.1d) el efecto de este mecanismo es una ligera disminución de la altura de M(λ) y L(λ) en relación a S(λ). Si utilizamos fondo azul (figura 7.2a), se aprecia un decrecimiento en S(λ) y M(λ) mayor que en L(λ). Con fondo rojo (figura 7.2b) se aprecia más claramente que el modelo reproduce la ley de los coeficientes de Von Kries [Von Kries (1902)], disminuyendo la altura de L(λ) con respecto a las otras dos. Usando fondo rojo de 100 cd/m² (figura 7.2c) y de 1000 cd/m² (figura 7.2d) y comparando con el caso de 31.83 cd/m² se aprecia que la reducción de L(λ) relativa a M(λ) y S(λ) es tanto mayor cuanto mayor es el valor de Y_b .

Volviendo al caso de fondo blanco, la figura 7.1e nos muestra que la no linealidad de los receptores tan sólo aumenta un poco más la altura de S(λ) relativa a las otras dos curvas, además de cambiar el fondo de escala global. En la figura 7.4 podemos ver una representación logarítmica de estas salidas de la fase de receptores, justo antes de la primera transformación oponente. La curva del cono S no sobrepasa en altura a las otras dos como ocurría en los fundamentales del modelo de Boynton, también llamados de Boynton-Kambe [Boynton (1986)] (ver apartado 4.3.3). Sin embargo, S(λ) tampoco está tan baja como en los fundamentales de MacLeod-Boynton [MacLeod y Boynton (1979)], en los que se impone como condición de escalado para S que se cumpla $L(\lambda)+M(\lambda)=S(\lambda)$ en $\lambda=400$

nm (ver figura 7.3). El nuestro es un caso intermedio, aunque más cercano al de Boynton-Kambe. En estos dos sistemas de conos con los que estamos comparando se cumplía $L(\lambda)+M(\lambda)=V(\lambda)$, mientras que en ATTD los pesos obtenidos para las contribuciones de L y M a A_{LGN} han sido, respectivamente, 0.8 y 0.6.

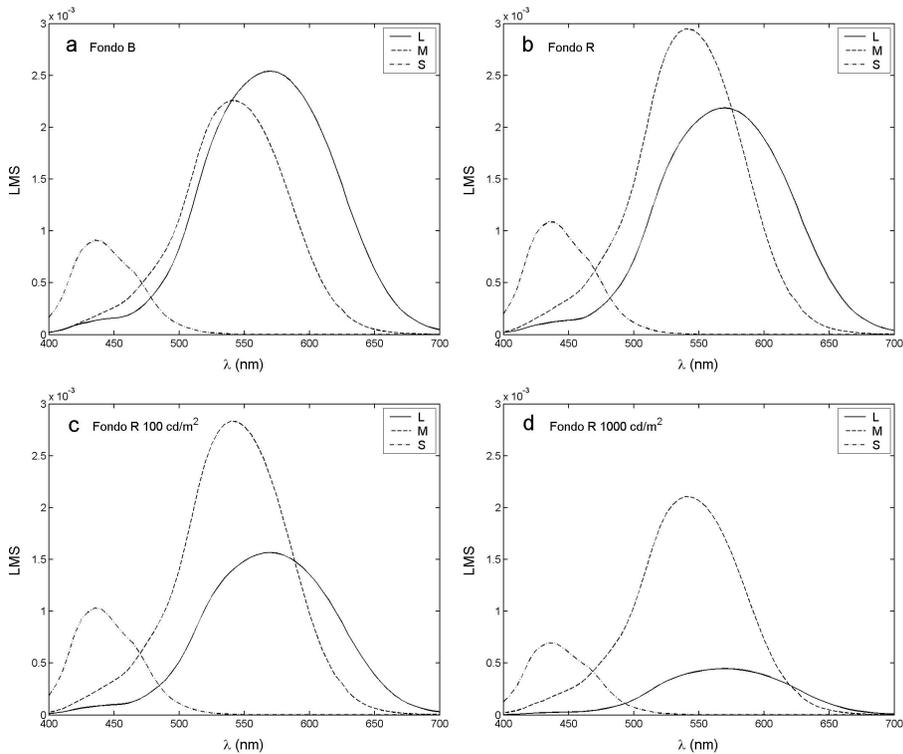


Figura 7.2. Comportamiento de la adaptación multiplicativa de los receptores con fondos de color. a) Fondo B de 31.83 cd/m^2 ; b) Fondo R de 31.83 cd/m^2 ; c) Fondo R de 100 cd/m^2 ; d) Fondo R de 1000 cd/m^2 .

A continuación aplicamos la matriz M_{LGN} , que da lugar a tres curvas oponentes y una no oponente (figura 7.1f). La curva $A_{LGN}(\lambda)$ se parece ya bastante a una $V(\lambda)$. $T_{LM}(\lambda)$ y $T_{ML}(\lambda)$ tienen polaridades contrarias y sus puntos neutros están cercanos, tanto en ésta como en posteriores etapas. $D_{LGN}(\lambda)$ presenta un valor demasiado grande en el extremo de las cortas λ . El siguiente paso es la adaptación sustractiva

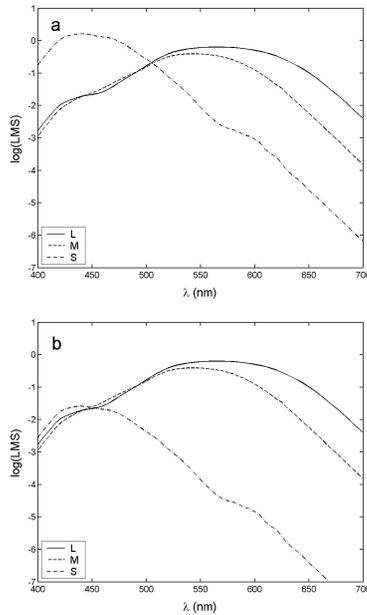


Figura 7.3. Representación logarítmica de los fundamentales de Boynton-Kambe (a) y MacLeod-Boynton (b).

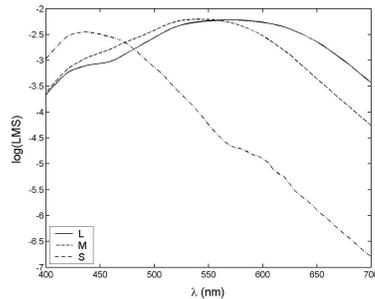


Figura 7.4. Representación logarítmica de las señales de salida de la fase de receptores.

del Magno (figura 7.1g), que desplaza ligeramente hacia abajo la curva de A_{LGN} , sin modificación de las otras tres. Aplicamos la no linealidad del LGN (figura 7.1h), que apenas modifica la forma de las curvas, ensanchando un poco la $A_{LGN}(\lambda)$. La aplicación de los escalados W_{LGN} (figura 7.1i) hace que aumente la altura de $T_{LM}(\lambda)$ respecto a las otras

tres curvas. Llegamos entonces a la transformación lineal dada por M_{V_1} (figura 7.1j), que transforma las cuatro curvas en tres: $A_{V_1}(\lambda)$, ligeramente más ancha que la $A_{LGN}(\lambda)$ anterior y ligeramente desplazada hacia arriba; $T_{V_1}(\lambda)$, de igual polaridad que $T_{LM}(\lambda)$ pero con mayor amplitud; y $D_{V_1}(\lambda)$, que no experimenta cambios.

Es el turno de la adaptación sustractiva del Parvo, que en el caso de fondo blanco (figura 7.1k) apenas afecta a las curvas, produciendo sólo un desplazamiento apenas perceptible de $A_{V_1}(\lambda)$ hacia abajo. Con fondo azul (figura 7.5a), la curva de T_{V_1} se desplaza hacia arriba y la de D_{V_1} hacia abajo, disminuyendo sus amplitudes en las cortas longitudes de onda, como cabría esperar. Con fondo rojo (figura 7.5b), la curva de T se desplaza hacia abajo, disminuyendo su amplitud en las largas longitudes de onda.

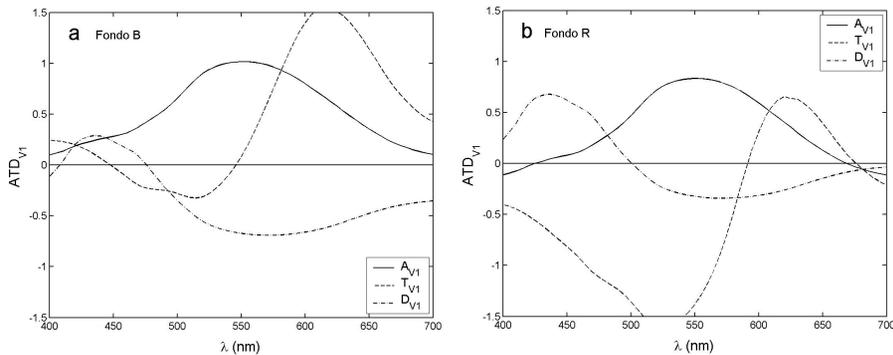


Figura 7.5. Comportamiento de la adaptación sustractiva del camino Parvocelular con fondos de color. a) Fondo B de 31.83 cd/m^2 ; b) Fondo R de 31.83 cd/m^2 .

Por último, actúa la matriz M_p dando lugar a los $ATD_p(\lambda)$ finales del modelo, que hemos representado en la figura 7.1l junto a las curvas de referencia utilizadas en la minimización del CA. $A_p(\lambda)$ apenas ha modificado su forma, mientras que $D_p(\lambda)$ ha invertido su polaridad, con apenas cambios en la forma. En cuanto a $T_p(\lambda)$, sí se aprecia un cambio radical, con la aparición de una importante componente roja en las cortas longitudes de onda. Podemos comprobar si la $A_p(\lambda)$ de nuestro modelo se deforma apreciablemente

con respecto a la $V(\lambda)$ al usar fondos de color. Según Jameson y Hurvich, cambia de altura pero no de forma [Jameson y Hurvich (1956)]. Se puede comprobar que con fondo azul $A_P(\lambda)$ aparece ligeramente desplazada hacia arriba, pero que por lo demás presenta la misma forma en los tres fondos utilizados.

7.2. Estabilidad del modelo

7.2.1. Estabilidad de las sensibilidades espectrales

Comprobamos cómo varían las sensibilidades espectrales de $ATTD_{LGN}$ y ATD_P al cambiar la energía de entrada. La minimización de los parámetros de ATTD estaba hecha suponiendo entradas de energía $10E_0$, y ahora vamos a calcular las salidas correspondientes a entradas de energía $0.01E_0$, $0.1E_0$, $1E_0$, $10E_0$, $100E_0$ y $1000E_0$, en los casos de fondo nulo y fondo no nulo. En el caso de fondo no nulo, para las gráficas de $ATTD_{LGN}(\lambda)$ usamos un fondo de $xyY_b = (0.404, 0.410, 110)$ y para las de $ATD_P(\lambda)$ uno de $xyY_b = (1/3, 1/3, 31.83)$.

En lo sucesivo, y a no ser que se diga lo contrario, supondremos que la adaptación multiplicativa de receptores está siempre gobernada por el fondo, incluso en el caso de fondo nulo. Esta suposición es correcta si el test considerado es de pequeño tamaño. De este modo evitamos el salto brusco que experimentan las predicciones del modelo en la transición de fondo no nulo a fondo nulo cuando la función de distribución de pesos de fondo y test es binaria. No hemos considerado la posibilidad de usar una función de distribución de pesos sigmoide porque la introducción de datos experimentales para la determinación de los dos parámetros asociados a esta función complicaría excesivamente el procedimiento [Gómez (1999)].

Con fondos no nulos se aprecia que tanto la $A_{LGN}(\lambda)$ como la $A_P(\lambda)$ están desplazadas hacia abajo en las bajas energías, debido a la adaptación sustractiva (figura 7.6a). Por tanto, habrá que tener cuidado a la hora de utilizar nuestro modelo con tests oscuros vistos en fondos luminosos. Por otra parte, en las altas energías las curvas comienzan a deformarse (figura 7.6b). Se puede decir que las

sensibilidades espectrales de A_{LGN} y A_P para energías un orden de magnitud por encima y por debajo de la utilizada en la minimización ($1E_0$ y $100E_0$) se siguen pareciendo a la $V(\lambda)$, no presentan deformaciones importantes.

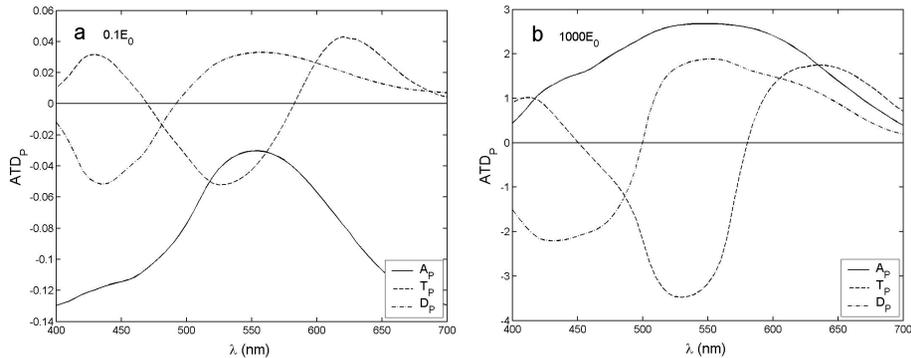


Figura 7.6. Sensibilidades espectrales $ATD_P(\lambda)$ con $Y_b=31.83 \text{ cd/m}^2$. a) Entrada de energía $0.1E_0$; b) Entrada de energía $1000E_0$.

7.2.2. Estabilidad del blanco perceptual

Calculamos para ATTD la posición en el plano $u'v'$ del blanco perceptual (el estímulo que según el modelo se percibe acromático, con colorido nulo) para distintas combinaciones de luminancias del test ($Y_t=1, 10, 100, 1000 \text{ cd/m}^2$) y del fondo ($Y_b=0, 1, 10, 100 \text{ cd/m}^2$). Efectuaremos este cálculo en el caso de mayor interés, en el que el fondo es de igual cromaticidad que el propio estímulo, y en un segundo caso en el que el fondo es equienergético. Estas posiciones se obtienen mediante un proceso de minimización del colorido, comprobando siempre que el valor final es nulo.

Según Werner y Walraven [Werner y Walraven (1982)], el estímulo que visto sobre fondo oscuro se percibe acromático es invariante en cuanto a cromaticidad para un rango amplio de Y_t e Y_b ; es decir, hay estabilidad del blanco perceptual visto en un fondo de igual cromaticidad para cualquier combinación de luminancias de test y fondo. Nuestro modelo cumple esto, y además su blanco perceptual con fondo de igual cromaticidad coincide con el blanco equienergético,

siendo también estable, por tanto, su posición con fondo equienergético. Sólo para $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$ se aprecian ligeras desviaciones respecto al equienergético, en los dos supuestos de fondo utilizado.

Como conclusiones finales del presente capítulo, podemos destacar que la adaptación multiplicativa de receptores de ATTD reproduce la ley de los coeficientes de Von Kries y que la adaptación sustractiva del Parvo se comporta también como cabría esperar. El canal acromático no cambia apreciablemente su forma al usar fondos de color, de acuerdo con las conclusiones de Jameson y Hurvich, y tampoco se deforma para energías un orden de magnitud por encima o por debajo de la utilizada en la minimización del coeficiente de ajuste. Otra muestra de la buena estabilidad de nuestro modelo es que el blanco perceptual sobre fondo oscuro coincide con el blanco equienergético, y además su posición no varía en un rango amplio de luminancias del propio blanco perceptual o de un fondo de igual cromaticidad.

Capítulo 8. Testeo del modelo

Comenzaremos el presente capítulo estudiando los espectros de acción de Q , A_P y A_{LGN} proporcionados por ATTD. A continuación analizaremos el comportamiento de la luminosidad, tono, colorido y saturación en función de los distintos parámetros colorimétricos: luminancia de test y fondo, longitud de onda dominante y pureza colorimétrica. En cuanto a la luminosidad, testaremos su dependencia con Y_t (ley de Stevens), con Y_b (inducción acromática) y con la cromaticidad del test (efecto Helmholtz-Kohlrausch). En lo referente al tono, estudiaremos su dependencia de primer orden con λ y su dependencia con p_c (efecto Aubert-Abney) y con Y_t (efecto Bezold-Brücke), así como las características de los tonos únicos. En cuanto al colorido, analizaremos cómo varía con la cromaticidad del test y con su luminancia (efecto Hunt), y cuáles son las diferencias que presenta con respecto a la saturación.

El tercer bloque de testeo consistirá en analizar la uniformidad del plano perceptual del modelo, representando en él la posición de las muestras Munsell de distintos valores. A continuación se estudiarán dos fenómenos de inducción cromática: se calculará la posición del estímulo percibido acromático con fondos de color en función de las luminancias de fondo y test, y se representarán gráficamente los descriptores perceptuales de un test blanco en función de la cromaticidad del inductor. Para concluir el capítulo de testeo del modelo, se obtendrán sus sensibilidades espectrales determinadas mediante umbrales de detección y discriminación.

En la mayoría de items de testeo compararemos las predicciones de ATTD con las del modelo ATD95 de Guth [Guth (1995)] (ver Apéndice A) y las del modelo de Hunt en sus versiones de

colores no relacionados [Hunt (1991)] y de colores relacionados [Hunt (1994)] (ver Apéndice B).

8.1. Espectros de acción

Calcularemos a continuación los espectros de acción de Q , A_P y A_{LGN} de nuestro modelo. Para obtener el espectro de acción de una determinada variable se calcula para cada λ , por medio de una minimización, cuál es la luminancia (definida positiva) de un estímulo espectral de dicha λ que iguala la variable considerada a un valor constante de referencia. A partir de la luminancia óptima resultante, se calcula y se representa la inversa de la energía en función de λ . Como valores de referencia utilizamos las variables calculadas para un blanco equienergético de 10 cd/m^2 . Utilizamos un fondo equienergético de 1 cd/m^2 tanto para la referencia como para los estímulos espectrales. El espectro de acción obtenido para Q es normalizado a 1 en 570 nm y comparado con la $V(\lambda)$ de comparación directa [CIE (1978)]. Los de A_P y A_{LGN} los normalizamos a 1 en el máximo y los comparamos con la $V(\lambda)$ de Judd-Vos.

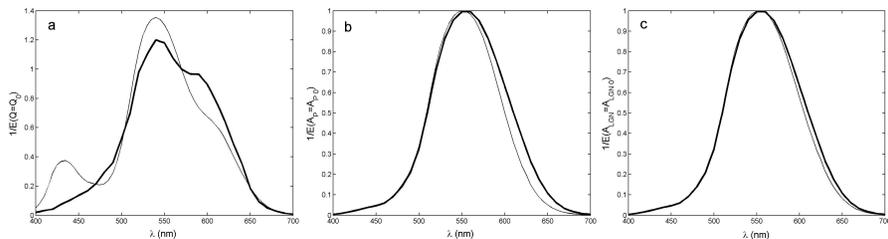


Figura 8.1. Predicciones de ATTD para diversos espectros de acción. Las predicciones del modelo se muestran en trazo normal y los datos de referencia en trazo grueso. a) Espectro de acción de Q ; b) Espectro de acción de A_P ; c) Espectro de acción de A_{LGN} .

Para A_P (figura 8.1b) y A_{LGN} (figura 8.1c) el ajuste es bueno tanto en la forma como en la posición del máximo (555 nm en ambos casos), aunque hay que recordar que las predicciones del modelo están normalizadas. Para Q (figura 8.1a), el ajuste a la $V(\lambda)$ de comparación directa es bueno en cuanto a la posición del máximo (540 nm), pero no tan bueno en cuanto a la forma de la curva, ya que

aparece un máximo local anómalo en torno a los 435 nm que no presenta la curva de referencia.

Se ha demostrado experimentalmente que el espectro de acción de las células ganglionares determinado mediante un criterio de mínimo parpadeo es idéntico a la $V(\lambda)$ de Judd-Vos. Sin embargo, recordemos que en la determinación de los parámetros del modelo habíamos comparado esta $V(\lambda)$ de Judd-Vos con la sensibilidad espectral $A_{LGN}(\lambda)$, haciendo lo mismo con $A_P(\lambda)$. La bondad de esta aproximación dependerá del papel que jueguen las no linealidades de nuestro modelo. Si la aproximación es aceptable, la respuesta de A_{LGN} y A_P a un espectro de luminancia constante debería ser aproximadamente constante. Calculamos por tanto los $A_{LGN}(\lambda)$ y $A_P(\lambda)$ de ATTD correspondientes a tests espectrales de luminancia 10 cd/m^2 , con un fondo equienergético también de 10 cd/m^2 , y las mismas curvas en ATD95, considerando A_1 y A_2 como descriptores equivalentes, respectivamente, a efectos de comparación entre ambos modelos. En el caso de A_{LGN} el resultado es alentador, con una curva aproximadamente plana y parecida en forma a la de ATD95, como se muestra en la figura 8.2a. Siendo A_P un canal de mayor complejidad, no era trivial predecir lo que iba a ocurrir en este caso; sin embargo, en la figura 8.2b puede comprobarse que también para A_P la respuesta a un espectro de luminancia constante es aproximadamente constante, siendo aceptable por tanto la aproximación introducida.

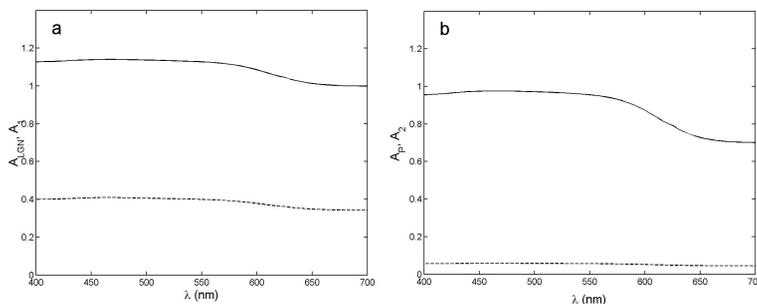


Figura 8.2. Respuesta de A_{LGN} y A_P y de sus equivalentes en el modelo de Guth a estímulos espectrales de luminancia constante 10 cd/m^2 . Las predicciones de ATTD se muestran en trazo continuo y las de ATD95 en trazo discontinuo. a) Respuesta de A_{LGN} y A_1 ; b) Respuesta de A_P y A_2 .

8.2. Descriptores perceptuales vs. parámetros colorimétricos

En diversos puntos del presente apartado mostraremos y comentaremos una serie de conjuntos de gráficas de luminosidad, tono, colorido o saturación de los modelos ATTD, ATD95 y Hunt en función de la longitud de onda dominante (λ_d), la pureza colorimétrica (p_c), la luminancia del test (Y_t) y la luminancia del fondo equienergético (Y_b). Los valores discretos de los parámetros colorimétricos utilizados para la obtención de estas gráficas son:

$$Y_t=1, 10, 100, 1000 \text{ cd/m}^2$$

$$Y_b=0, 1, 10, 100 \text{ cd/m}^2$$

$$\lambda_d=475 \text{ nm}, \lambda_d=500 \text{ nm}, \lambda_d=580 \text{ nm}, \lambda_c=500 \text{ nm}, \lambda_c=550 \text{ nm}$$

$$p_c=1, 0.5, 0.1$$

Las longitudes de onda dominantes y complementarias utilizadas corresponden, de manera aproximada, a un azul, un verde, un amarillo, un rojo y un púrpura, respectivamente. Todas las gráficas de un conjunto dado tendrán el mismo fondo de escala, excepto para el modelo de Hunt, cuyos descriptores en el caso $Y_b=0 \text{ cd/m}^2$ no se calcularán con Hunt94 sino con Hunt91u, habiendo por tanto dos fondos de escala distintos en el mismo conjunto de gráficas.

También mostraremos en el presente apartado una serie de representaciones en un plano equiluminante $u'v'$ (diagrama cromático CIE 1976 UCS) de las curvas de nivel de Q, H y M asociadas a estímulos de luminancias Y_t de 1, 10, 100 y 1000 cd/m^2 , calculadas para los tres modelos en los casos de fondo nulo y fondos de las cromaticidades W, B y R (ver apartado 6.1.2.3) con una luminancia $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$.

8.2.1. Luminosidad

8.2.1.1. Ley de Stevens (dependencia con Y_t)

La dependencia de primer orden de la luminosidad es en función de la luminancia del test, y se relacionan entre sí por una función potencial, lo que se conoce como ley de Stevens [Stevens

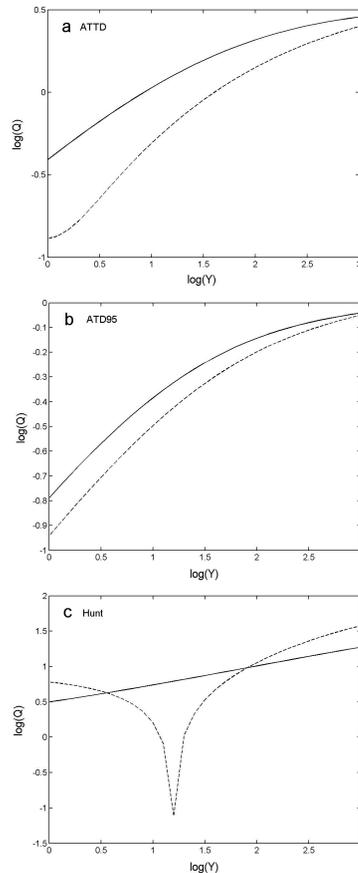


Figura 8.3. Predicciones de los modelos de la ley de Stevens para la luminosidad. Se representan las predicciones para fondo nulo en trazo continuo y las predicciones para fondo de 300 cd/m^2 en trazo discontinuo. a) ATTD; b) ATD95; c) Hunt91u y Hunt94.

(1975)]. Vamos a obtener para los distintos modelos gráficas de $\log Q$ vs. $\log Y_t$ para un blanco equienergético visto en un fondo también equienergético, y compararemos los casos de $Y_b=0 \text{ cd/m}^2$ y de $Y_b=300 \text{ cd/m}^2$. Según los datos experimentales de Bodmann y colaboradores [Bodmann et al. (1980)], la curva con fondo nulo debería ser una recta de pendiente positiva 0.3, y la de fondo no nulo debería ser convexa y estar situada por debajo de la recta, tendiendo asintóticamente a la misma en las altas luminancias (ver figura 2.1).

El modelo ATTD (figura 8.3a) presenta una disposición de las curvas bastante similar a la de los datos experimentales, aunque la de $Y_b=0$ cd/m² no es del todo recta. La curva de $Y_b=300$ cd/m² presenta una pequeña anomalía en las cercanías de 1 cd/m², que desaparece para luminancias del fondo ligeramente inferiores. Las otras dos variantes del modelo no presentan dicha anomalía ni siquiera a $Y_b=300$ cd/m². Utilizando los valores de los extremos de la curva con fondo cero, podemos calcular de forma aproximada su pendiente promedio m . Obtenemos un valor de 0.29, prácticamente igual al 0.3 de los datos experimentales.

Las predicciones de ATD95 (figura 8.3b) son similares a las de ATTD, aunque la curva de $Y_b=300$ cd/m² debería estar más separada de la de fondo nulo en las bajas Y_t . Si se cumple que ambas curvas tienden asintóticamente al mismo valor. La pendiente promedio, de valor 0.25, no es tan próxima a 0.3 como la de ATTD.

La curva de $Y_b=0$ cd/m² de Hunt91u (figura 8.3c) es más recta que en los otros dos modelos, pero la de $Y_b=300$ cd/m² de Hunt94 presenta un mínimo anómalo muy pronunciado y está en muchos puntos por encima de la otra curva, lo cual no es consistente con los datos experimentales. Considerando aisladamente el caso de $Y_b=0$ cd/m², podemos decir que la pendiente promedio, de valor 0.26, es bastante cercana al valor experimental.

Aunque su curva de fondo nulo debería ser un poco más recta, podemos decir que ATTD es el modelo que mejor reproduce los datos de Bodmann et al..

Podemos seguir nuestro estudio de la ley de Stevens desde otro punto de vista obteniendo un conjunto de gráficas de Q vs. $\log Y_t$. Se puede deducir que estas gráficas deberían ser similares a una función exponencial, al menos a luminancias no muy altas.

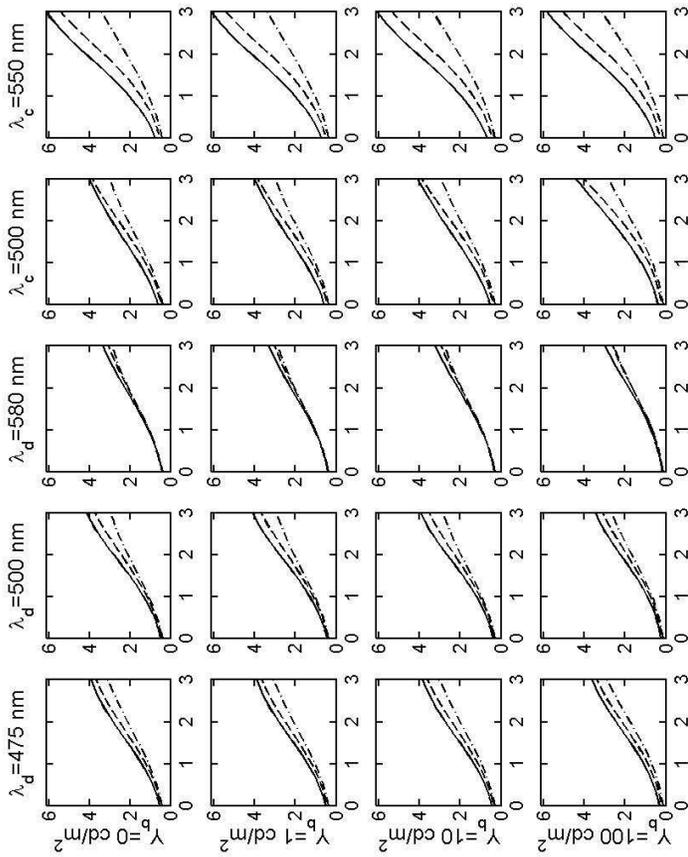


Figura 8.4. Gráficas de Q vs. $\log Y_t$ para ATTD. Todas las gráficas tienen el mismo fondo de escala. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

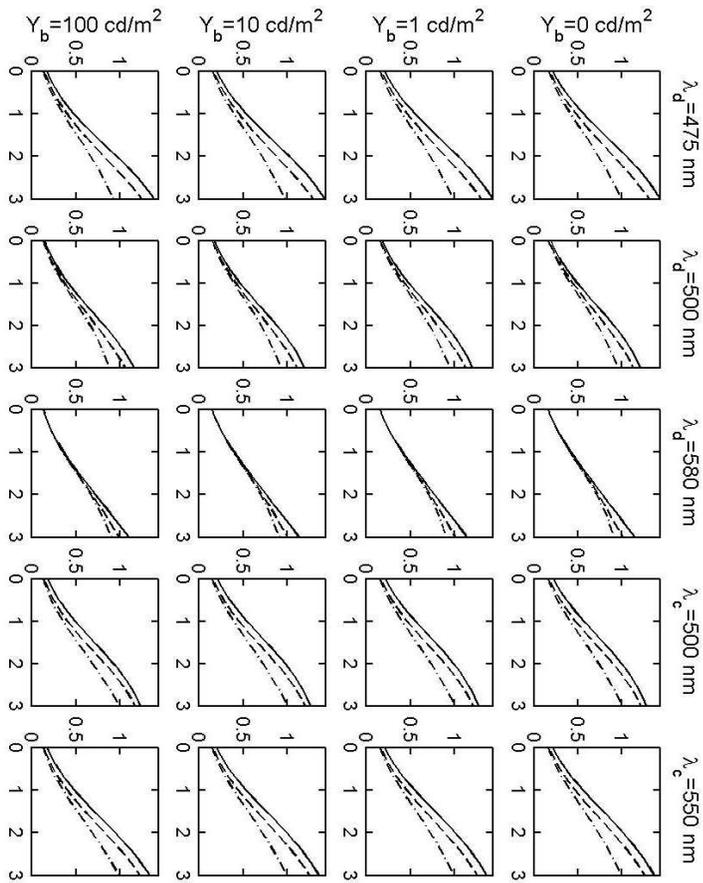


Figura 8.5. Gráficas de Q vs. $\log Y$ para ATD95. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

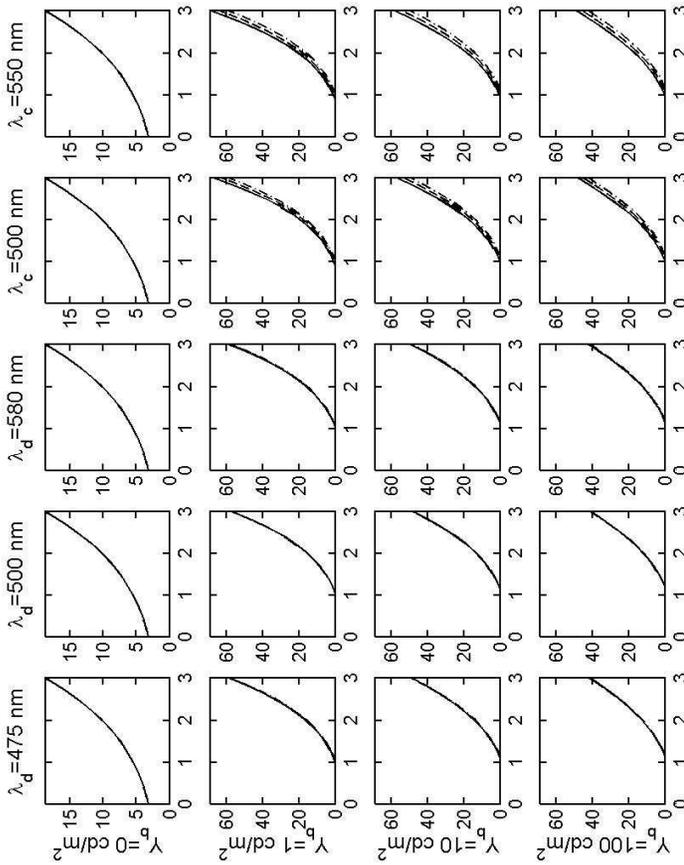


Figura 8.6. Gráficas de Q vs. $\log Y_t$ para Hunt94. En los casos con $Y_b=0 \text{ cd/m}^2$ las curvas se han calculado con Hunt94u. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

Los resultados obtenidos para ATTD (figura 8.4) y ATD95 (figura 8.5) son muy parecidos. Los dos dan curvas crecientes, como cabe esperar, y bastante rectas. Presentan las curvas de menor p_c por debajo de las otras, de acuerdo con el efecto Helmholtz-Kohlrausch, que estudiaremos más adelante. En los dos se cumple que Q va tendiendo a 0 conforme Y_t tiende a 0, como era de esperar, aunque en ATD95 el valor de Q a 1 cd/m^2 es, relativamente, un poco mayor que en ATTD. No se aprecia un comportamiento asintótico, aunque se atisban en ambos modelos ligerísimos cambios de curvatura que podrían presagiar un comportamiento asintótico para luminancias mayores.

Hunt (figura 8.6) da también curvas crecientes, con más aspecto de exponencial. Apenas presenta variación con p_c . En las gráficas de fondo nulo Hunt91u da, para luminancias del test bajas, un valor de Q distinto de cero y relativamente grande. Para fondos no nulos, Hunt94 da tramos de Q negativa en las bajas luminancias, lo cual es inaceptable. No se aprecia comportamiento asintótico, tal vez porque no hemos considerado valores suficientemente grandes de Y_t .

Podemos concluir que ATTD y ATD95 funcionan mejor que Hunt en este ítem.

8.2.1.2. Gráficas de Q vs $\log Y_b$ (Inducción Acromática)

Las curvas de ATTD (figura 8.7) y ATD95 (figura 8.8) son muy parecidas, ligeramente decrecientes pero casi constantes para valores de Y_b bajos y claramente decrecientes para Y_b altos si se representan para Y_b hasta 1000 cd/m^2 . Cuanto mayor es la luminancia del fondo, más oscuro se percibe el test; se trata por tanto de un efecto de contraste. No se aprecia que haya porciones ligeramente crecientes para Y_b bajos, ni que el descenso se produzca apreciablemente para $Y_b > Y_t$, tal y como indica Heinemann [Heinemann (1955)]. El decrecimiento comienza a apreciarse siempre a partir de la misma región de Y_b , independientemente del valor de Y_t . La reducción en la luminosidad del test con el aumento de Y_b , aun siendo pequeña, indica la existencia de un efecto de realzado cuando $Y_b < Y_t$.

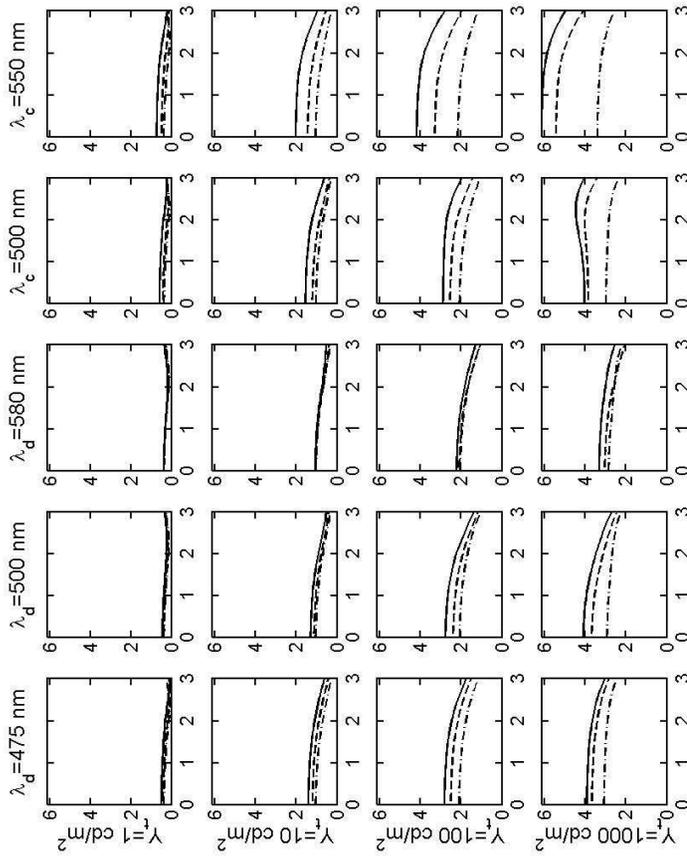


Figura 8.7. Gráficas de Q vs. $\log Y_b$ para ATTD. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.1$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

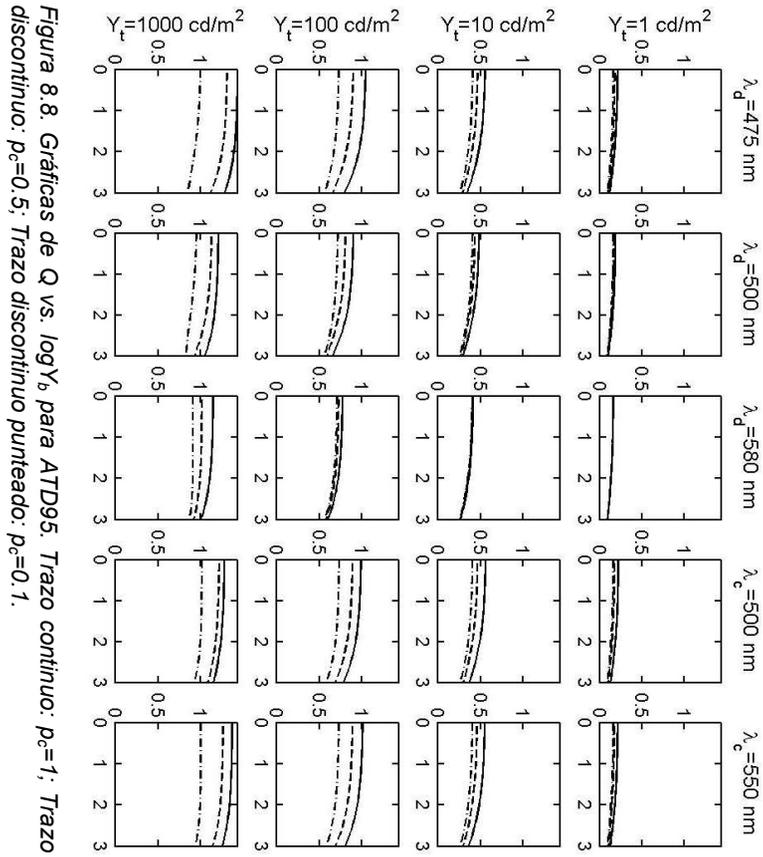


Figura 8.8. Gráficas de Q vs. $\log Y_b$ para ATD95. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

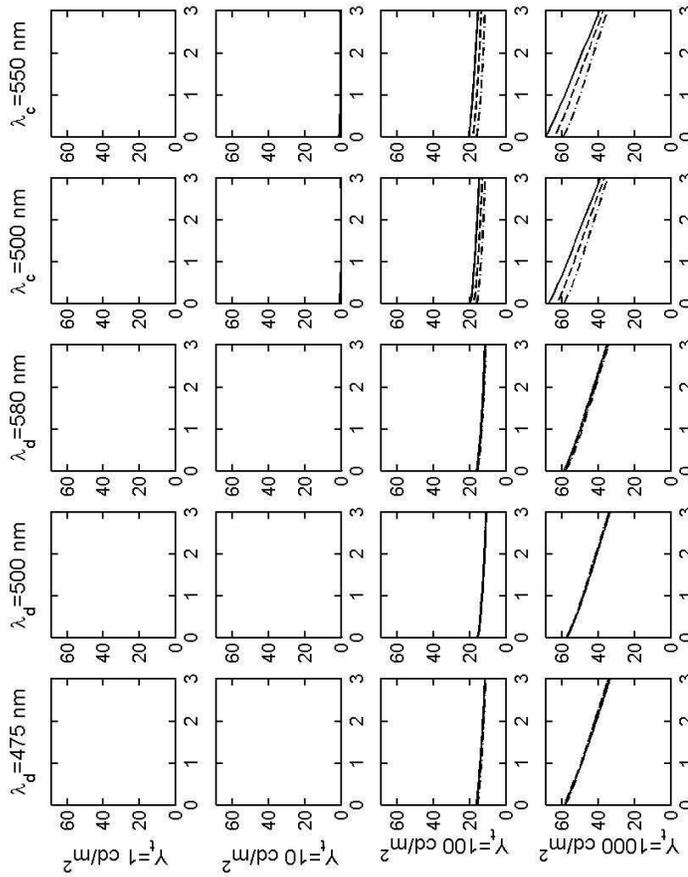


Figura 8.9. Gráficas de Q vs. $\log Y_b$ para Hunt94. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

Es un dato positivo que nuestro modelo reproduzca, al menos cualitativamente, el efecto de inducción acromática sin haber utilizado datos de este tipo en el conjunto de entrenamiento; es posible que la presencia de mecanismos sustractivos en la estructura haya favorecido este hecho. Por último, se aprecia que las curvas tanto de ATTD como de ATD95 presentan dependencia en p_c .

Las curvas de Hunt94 (figura 8.9) son más rectas y decrecientes que las de ATTD, y con menos diferencias entre curvas de distinta p_c . Son menos parecidas a los datos de Heinemann que las curvas de ATTD y ATD95, ya que no presentan tramos constantes a bajas Y_b . De hecho, los efectos de realzado encontrados en la base de datos LUTCHI, en la cual se basan algunas características del modelo de Hunt, son mayores que los encontrados por Heinemann y otros autores [Luo et al. (1995)].

8.2.1.3. Efecto Helmholtz-Kohlrausch. Curvas de nivel de luminosidad en un plano equiluminante

En general se puede definir el efecto Helmholtz-Kohlrausch como la variación de la luminosidad con la cromaticidad del estímulo. Una primera forma de estudiar este efecto consiste en calcular un conjunto de gráficas de Q vs. p_c .

ATTD (figura 8.10) y ATD95 (figura 8.11) dan resultados muy parecidos y sí predicen el efecto Helmholtz-Kohlrausch, con curvas crecientes, tanto más cuanto mayor es Y_t . En ellas se puede comprobar además que, a igual luminancia, los azules, rojos y púrpuras son más luminosos que los verdes y amarillos. También se aprecia que el aumento de Q no se produce de la misma forma en las distintas λ_d : para los azules las curvas son convexas, lo cual supone superaditividad, de acuerdo con los datos de Burns y colaboradores [Burns et al. (1982)]; para los amarillos el aumento es bastante lineal, propio de la aditividad, también de acuerdo con los datos experimentales; para los rojos se aprecia superaditividad, en contra de Burns et al., que encuentran subaditividad; y para los púrpuras hay superaditividad según los dos modelos.

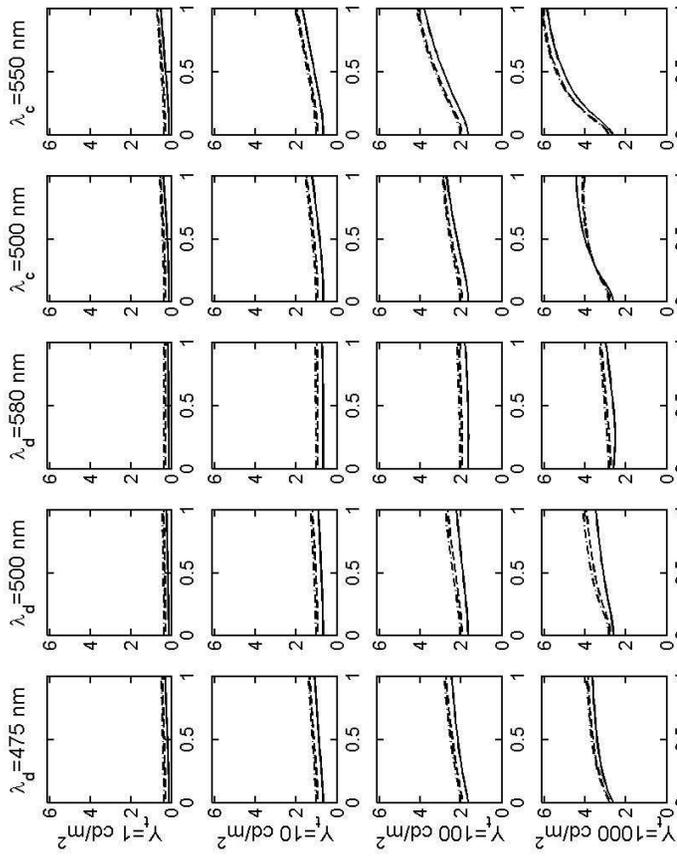


Figura 8.10. Gráficas de Q vs. p_c para ATTD. Trazo continuo: $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo: $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo punteado: $Y_b=1 \text{ cd/m}^2$.

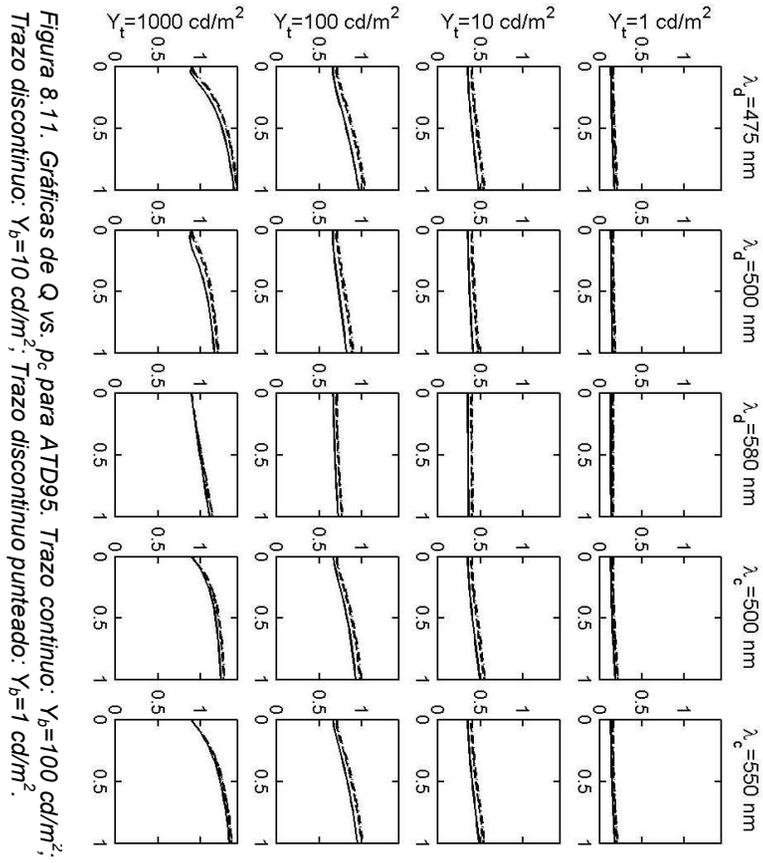


Figura 8.11. Gráficas de Q vs. p_c para ATD95. Trazo continuo: $Y_b = 100 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo: $Y_b = 1 \text{ cd/m}^2$.

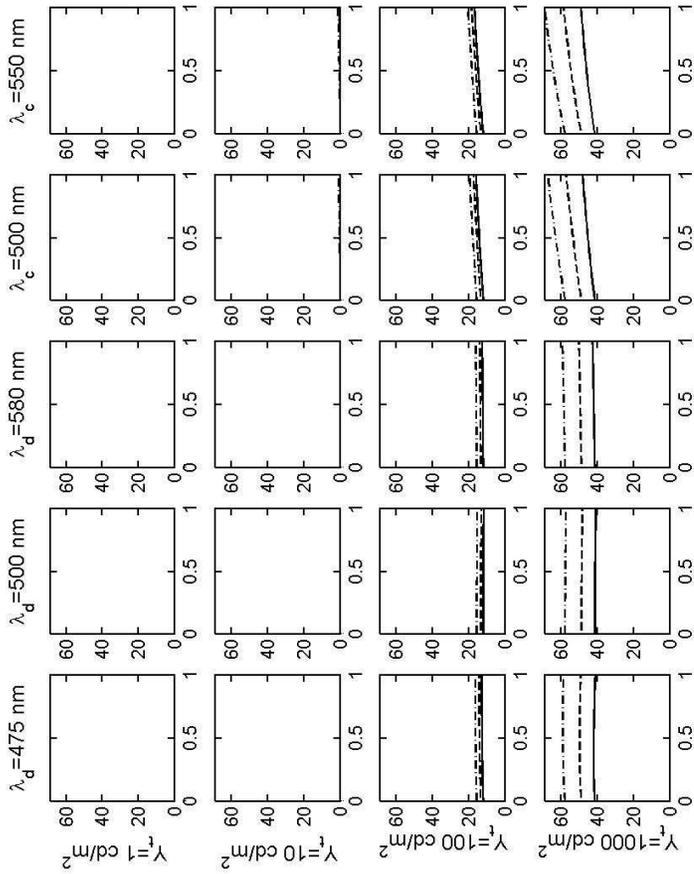


Figura 8.12. Gráficas de Q vs. p_c para Hunt94. Trazo continuo: $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo: $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo punteado: $Y_b=1 \text{ cd/m}^2$.

Hunt94 (figura 8.12) no predice el efecto Helmholtz-Kohlrausch: da curvas constantes en la mayoría de los casos, y de valor negativo para luminancias bajas. Sí se aprecia en estas curvas la dependencia en Y_b correspondiente al efecto de inducción acromática. Por tanto, el funcionamiento de ATTD y ATD95 en este ítem es claramente mejor que el de Hunt94.

También podemos estudiar el efecto Helmholtz-Kohlrausch calculando para los tres modelos la luminosidad espectral de luminancia constante $Y_t=10 \text{ cd/m}^2$ con fondo equienergético de 10 cd/m^2 . Es lo que llamamos efecto Helmholtz-Kohlrausch espectral (ver figura 2.4).

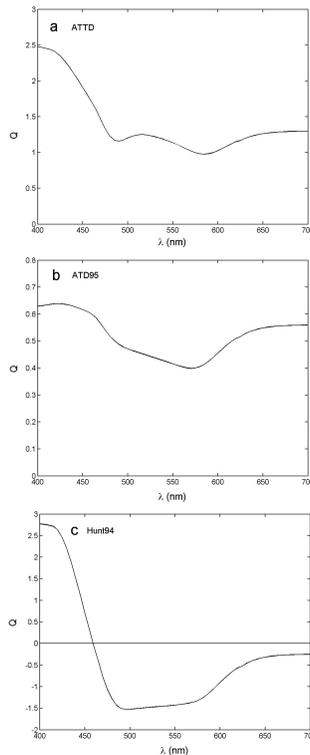


Figura 8.13. Predicciones de los modelos para la luminosidad espectral de luminancia constante 10 cd/m^2 . a) ATTD; b) ATD95; c) Hunt94.

La curva de luminosidad espectral de ATTD (figura 8.13a) es casi igual a la predicción de nuestro modelo vista en el apartado 6.2.2, ya que sólo ha cambiado la luminancia del fondo. No llega a acercarse al valor 1 en su punto más bajo, que se encuentra en una λ de 585 nm, superior a los 570 nm de la referencia. Tiene un mínimo secundario en torno a 490 nm que no aparece en los datos de referencia. No se aprecian en ella las caídas en la luminosidad de los dos extremos del espectro, aunque sí asigna mayor luminosidad al extremo azul que al rojo.

En el caso de ATD95 (figura 8.13b) la curva de $Q(\lambda)$ se aproxima más que la de ATTD a la forma del cociente de las $V(\lambda)$: es una curva en forma de V con el mínimo cercano a 570 nm y dos tramos de variación más suave en los dos extremos del espectro. Se aprecia un poco la caída en la luminosidad en el extremo azul del espectro, aunque no la del extremo rojo. Aunque la luminosidad de ATD95 para las cortas longitudes de onda es mayor que la de las largas longitudes de onda, como corresponde, la diferencia de estas luminosidades no es tan grande como la de ATTD o la curva de referencia.

La $Q(\lambda)$ de Hunt94 (figura 8.13c), a pesar de que en un principio su forma podría recordar a la de la curva de referencia, presenta valores negativos de la luminosidad, siendo por tanto incorrecta.

Si calculamos estas mismas curvas de luminosidad espectral con fondo nulo, se puede comprobar que los resultados para ATTD y ATD95 son casi iguales a los obtenidos con fondo de 10 cd/m^2 , mientras que la $Q(\lambda)$ calculada con Hunt91u es constante en todo el espectro, no prediciendo por tanto el efecto deseado.

Se puede concluir que ATD95 proporciona los mejores resultados en cuanto a luminosidad espectral de luminancia constante. Los resultados de ATTD no son tan buenos, pero sí son aceptables.

Por último, obtendremos las curvas de nivel de luminosidad en un plano equiluminante, estudiando así la dependencia combinada de

Q en función de p_c y λ_d , es decir, en función de la cromaticidad del test. Tomaremos como datos de referencia los resultados de Sanders y Wyszecki [Sanders y Wyszecki (1964)] (ver figura 2.6). La luminosidad debería ser mayor cerca del locus espectral (sobre todo en sus extremos) y menor en el centro del diagrama cromático [Sanders y Wyszecki (1964), Kaiser y Smith (1972), Burns et al. (1982)].

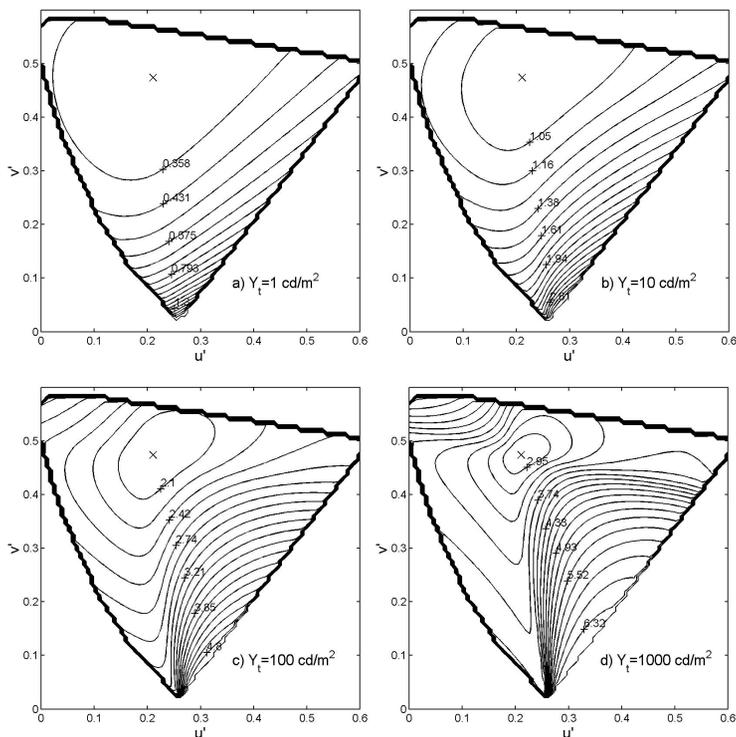


Figura 8.14. Representación en un plano $u'v'$ de los loci de Q constante asociados a estímulos de luminancias $Y_t=1, 10, 100$ y 1000 cd/m^2 , calculados con ATTD en el caso de fondo blanco de $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$. Señalamos con un aspa la posición del blanco equienergético, e indicamos el valor numérico de Q asociado a algunos de los loci.

Con fondo W, ATTD presenta loci deformados a $Y_t=100 \text{ cd/m}^2$, y sobre todo a 1000 cd/m^2 (figura 8.14). Las deformaciones se deben a la diferencia de comportamiento del modelo en dos de los “cuadrantes”

determinados por los tonos únicos. Recordemos que hemos entrenado el modelo con entradas de $10E_0$; podríamos mejorar estos resultados añadiendo en las minimizaciones curvas con energías mayores. En las gráficas correspondientes a 1 cd/m^2 y 10 cd/m^2 sí se reproduce el efecto Helmholtz-Kohlrausch, con loci de Q de forma redondeada, con el blanco equienergético aproximadamente en su centro. Calculando las gráficas con $Y_b=0 \text{ cd/m}^2$ apenas se notan diferencias con respecto a los loci de fondo blanco.

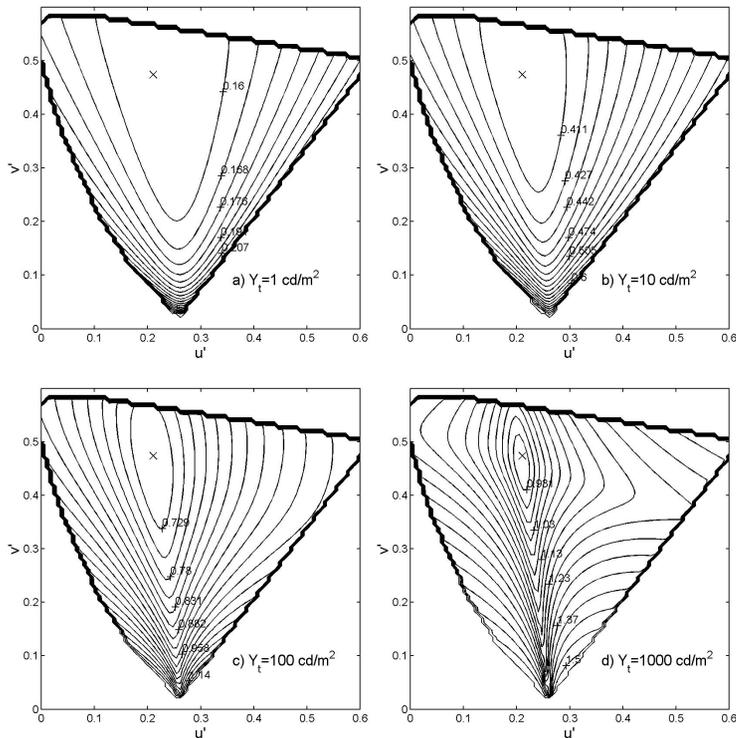


Figura 8.15. Loci de Q constante calculados con ATD95 para fondo W .

ATD95 (figura 8.15) presenta deformaciones a 1000 cd/m^2 con fondo W . La Q reproduce el efecto Helmholtz-Kohlrausch, y los loci correspondientes no son redondeados como los de ATTD, sino en forma de V con el pico apuntando hacia el extremo azul del locus espectral. Apenas hay diferencias entre fondo nulo y fondo blanco.

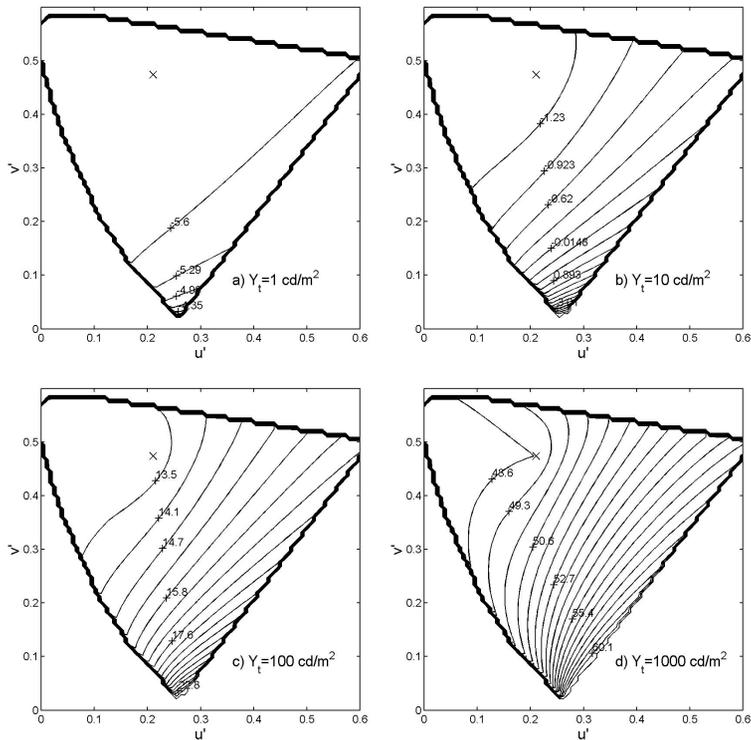


Figura 8.16. Loci de Q constante calculados con Hunt94 para fondo W .

Hunt94 con fondo W (figura 8.16) no predice el efecto deseado; sólo para $Y_t=100 \text{ cd/m}^2$ da resultados remotamente parecidos. Además, proporciona valores negativos de Q en algunos casos. En el caso de fondo nulo (figura 8.17), Hunt91u tampoco predice el efecto Helmholtz-Kohlrausch, dando una Q casi constante en todo el plano.

Concluyendo, ATD95 da las mejores predicciones de curvas de nivel de luminosidad. ATTD también predice bien el efecto Helmholtz-Kohlrausch, aunque presenta deformaciones debidas a un desequilibrio entre canales a altas luminancias del test.

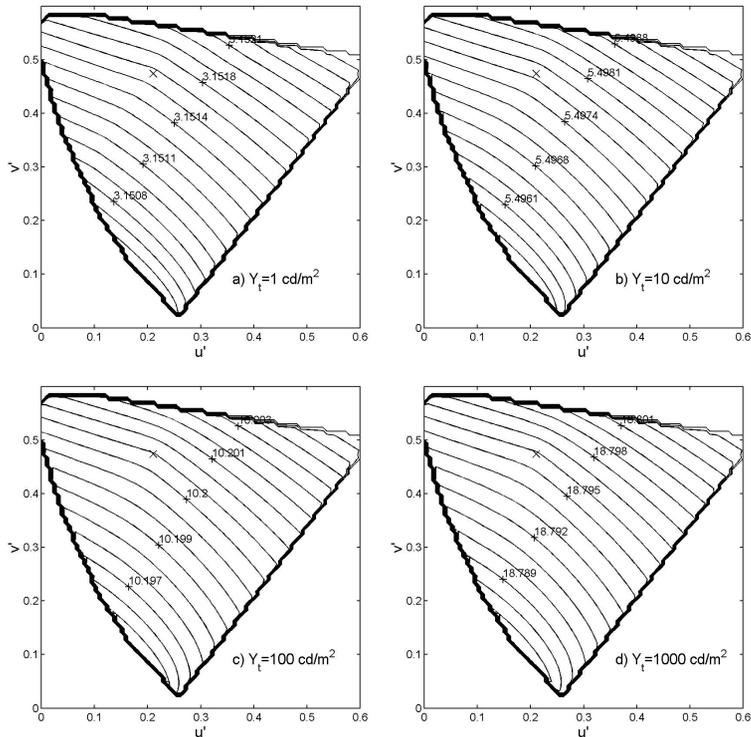


Figura 8.17. Loci de Q constante calculados con Hunt91u para fondo nulo.

Como conclusiones generales acerca de los fenómenos relacionados con la luminosidad, podemos decir que ATTD es el modelo que mejor predice los datos de Bodmann y colaboradores sobre el efecto Stevens. También es un dato positivo que reproduzca al menos cualitativamente el efecto de inducción acromática sin haber utilizado datos de este tipo en el conjunto de entrenamiento. A diferencia del modelo de Hunt, ATTD sí predice el efecto Helmholtz-Kohlrausch, aunque ATD95 proporciona mejores resultados en cuanto a luminosidad espectral de luminancia constante y nuestro modelo presenta loci de luminosidad constante deformados a altas luminancias del test.

8.2.2. Tono

8.2.2.1. Gráficas de H vs. λ

La dependencia de primer orden del tono es en función de la longitud de onda. Calculamos el tono para tests espectrales de luminancia constante $Y_t=10 \text{ cd/m}^2$ con fondo equienergético de 10 cd/m^2 (figura 8.18). Las curvas resultantes en los tres modelos son decrecientes, con dos tramos de descenso más brusco, antes de los 500 nm y antes de los 600 nm. ATTD no toma el valor $H=0$ en el espectro, lo cual quiere decir que presenta su rojo único en la zona de los púrpuras; esto está de acuerdo, al menos cualitativamente, con las conclusiones de Burns y colaboradores [Burns et al. (1984)]. ATD95 es bastante parecido a ATTD en este ítem. Según Hunt94, el tono toma el valor cero en $\lambda=630 \text{ nm}$, siendo por tanto su rojo único un estímulo espectral. Las diferencias observadas entre Hunt y los otros dos modelos en el extremo rojo del espectro se deben en parte a la ya comentada diferencia en la concepción de H como un ángulo o una cuadratura, y se extienden a la región de los púrpuras, no representada en estas gráficas. Repitiendo todos estos cálculos con fondo de 0 cd/m^2 y utilizando Hunt91u obtenemos resultados muy similares a los anteriormente descritos en los tres modelos.

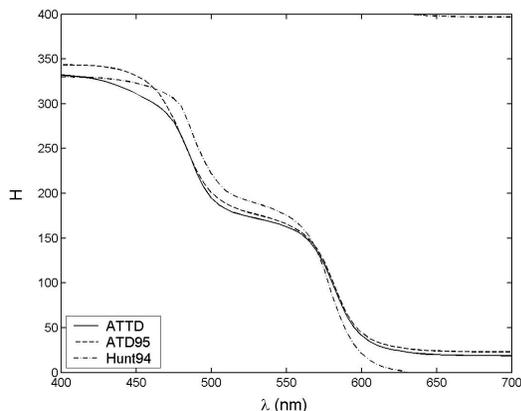


Figura 8.18. Predicciones de los modelos para el tono de tests espectrales de luminancia constante $Y_t=10 \text{ cd/m}^2$.

8.2.2.2. Curvas de nivel de tono en un plano equiluminante. Tonos únicos. Efecto Aubert-Abney (dependencia con p_c)

El efecto Aubert-Abney se concibe como la variación del tono con la p_c a lo largo de una recta de λ_d constante [Aubert (1865), Abney (1910)], y las λ_d están definidas en el plano xy . El hecho de que los datos experimentales sobre este efecto [Newhall et al. (1943)] y sobre los loci de los tonos únicos [Burns et al. (1984)] estén referidos al diagrama cromático xy podría hacernos pensar que nuestros loci de H , al estar representados en un plano $u'v'$, no nos proporcionan información sobre las prestaciones de ATTD, ATD95 o Hunt. Sin embargo, se puede demostrar que una recta en xy sigue siendo una recta en $u'v'$. En el apartado 2.2.2.2 vimos que, según las conclusiones

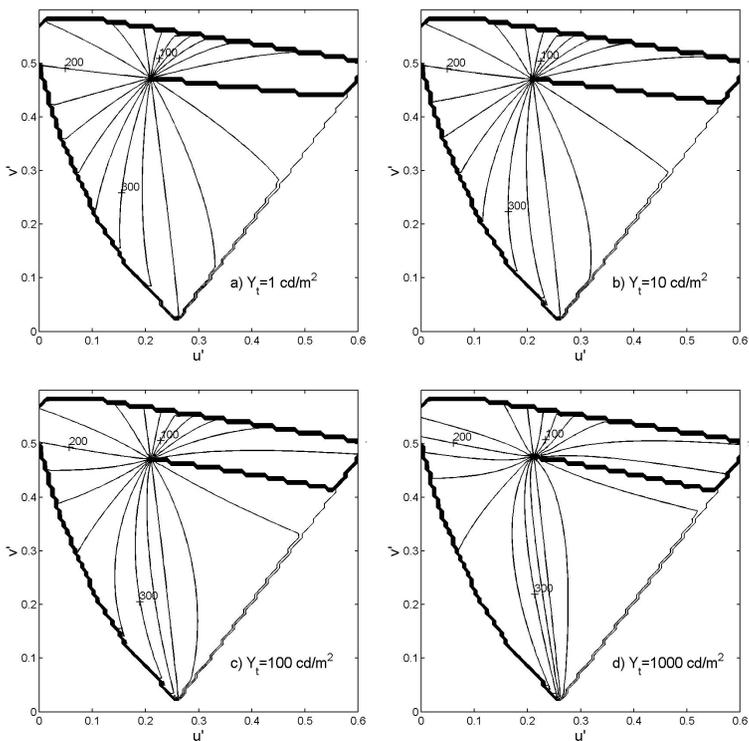


Figura 8.19. Loci de H constante de ATTD para fondo W . El locus con trazo grueso corresponde a los puntos en los que H pasa de 400 a 0.

de Newhall y colaboradores (ver figura 2.8) sólo las direcciones de $\lambda_d=572$ nm y $\lambda_c=559$ nm presentaban loci de tono constante rectos. En el diagrama $u'v'$, estas direcciones se convierten en las que unen el blanco con los puntos de coordenadas $u'v'=(0.2141,0.5676)$ y $u'v'=(0.3265,0.1071)$, respectivamente. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el paso a $u'v'$ suavizará la curvatura de los loci pero no cambiará la dirección de curvatura, podemos utilizar estas dos direcciones como referencia para hacer un análisis del efecto Aubert-Abney.

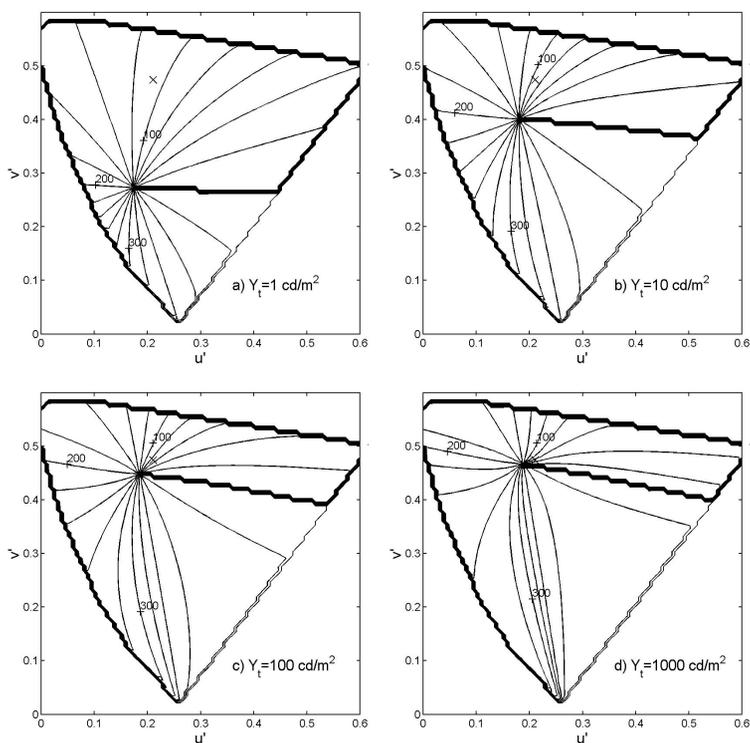


Figura 8.20. Loci de H constante calculados con ATTD para fondo B.

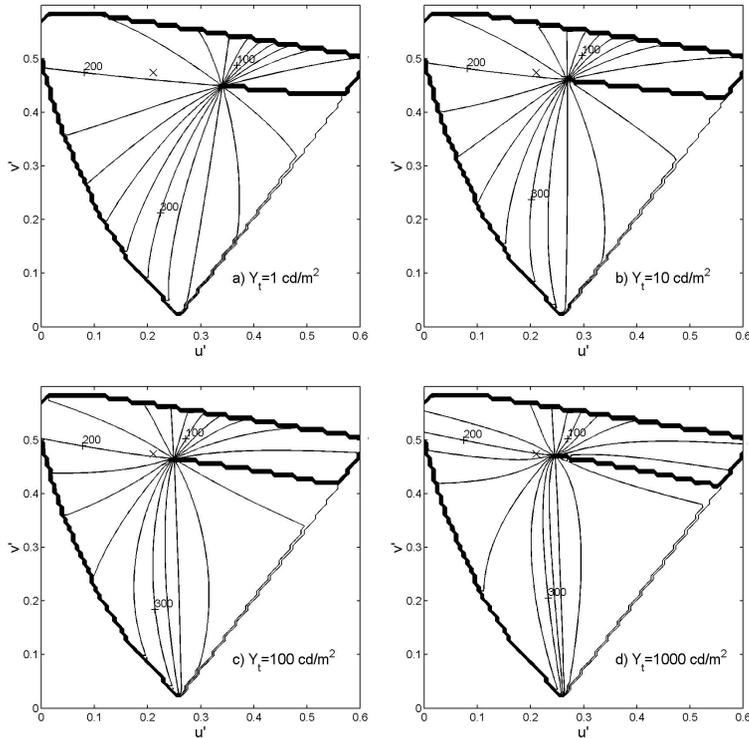


Figura 8.21. Loci de H constante calculados con ATTD para fondo R .

En ATTD con fondo W (o con fondo nulo, ya que apenas hay diferencia entre ambos casos) se aprecia una distribución anómala de los loci de tono a $Y_t=1000 \text{ cd/m}^2$ (figura 8.19). Para los otros valores de Y_t las curvas de nivel son bastante equidistantes angularmente, lo cual concuerda con el hecho de que en ATTD la H está definida como un ángulo de tono centesimal, no como una cuadratura de tono similar a la de Hunt: esto favorece la uniformidad perceptual de los loci, pero empeora las predicciones sobre los tonos únicos. En todo caso, es conveniente recalcar que, aunque la escala de tono dada por ATTD fuera perceptualmente muy uniforme, los loci en $u'v'$ no tendrían por qué ser completamente equidistantes, ya que el espacio $u'v'$ no es totalmente uniforme, aunque sí más que xy . Se puede comprobar que la mayoría de los loci están curvados, con lo que el modelo reproduce,

al menos cualitativamente, el efecto Aubert-Abney. La curvatura es más apreciable para los estímulos de mayor colorido, en la zona de los azules, mientras que apenas se manifiesta en los amarillos y los verdes. Aun así, se comprueba que las zonas donde se produce el cambio en la dirección de la curvatura coinciden aproximadamente con los datos de Newhall et al..

Los tonos únicos rojo y verde de ATTD determinan una sola línea casi recta que corta a los púrpuras. Esto no es compatible con los datos de Burns et al., que presentan un locus rectilíneo de verdes únicos y un locus rectilíneo de rojos únicos, pero quebrándose éstos en el blanco, no alineados entre sí (ver figura 2.9). El hecho de que nuestros ejes neutros rojo y verde sean colineales es inherente a la

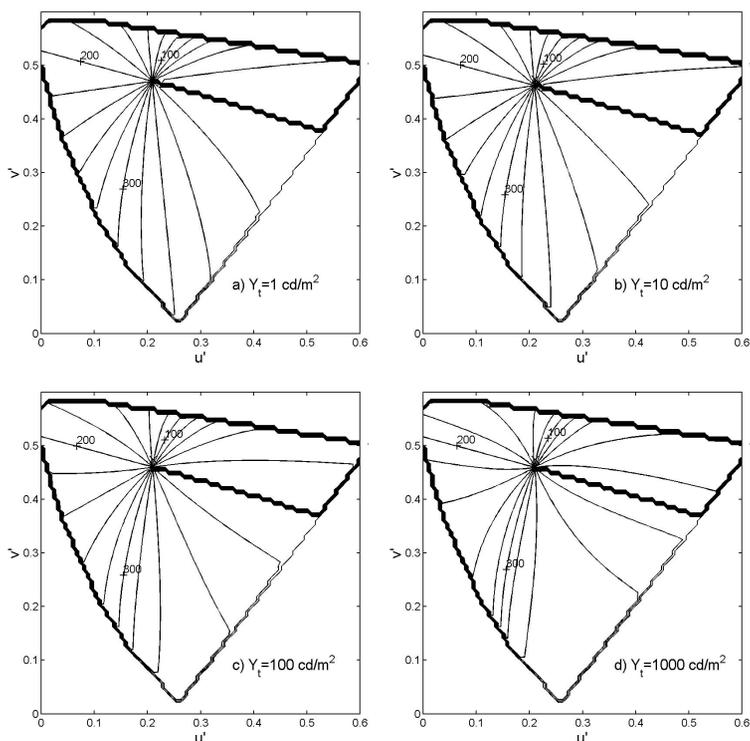


Figura 8.22. Loci de H constante calculados con ATD95 para fondo W .

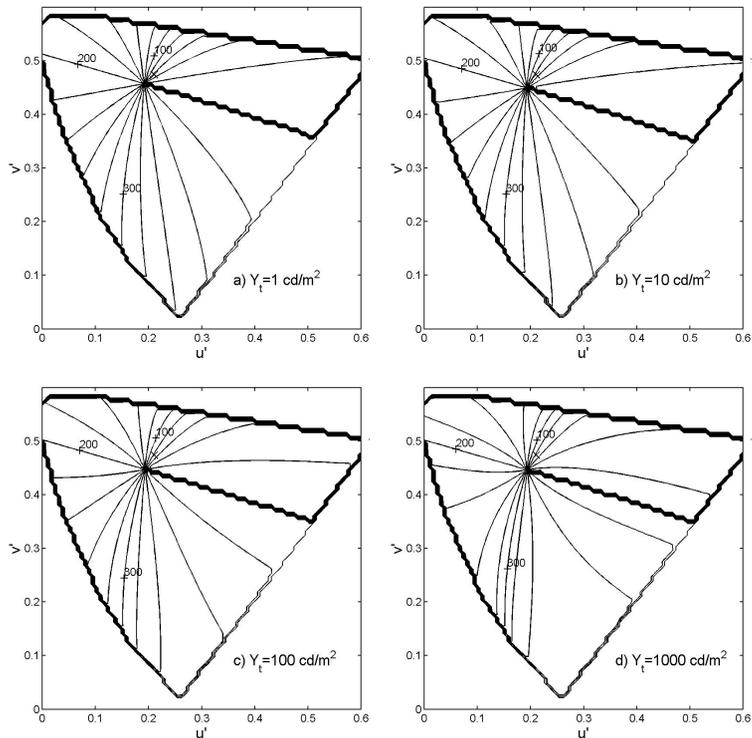


Figura 8.23. Loci de H constante calculados con ATD95 para fondo B.

estructura escogida para ATTD. Para quebrarlos harían falta dos canales oponentes T_P distintos no sólo en polaridad sino también en forma, posteriormente rectificadas para dar lugar a un mecanismo rojo y un mecanismo verde independientes. Estructuras de este tipo han sido utilizadas por otros autores, no sólo en el caso del canal rojo-verde sino también para el azul-amarillo [DeValois y DeValois (1997)]. En nuestro caso no es posible porque hemos usado un $-T_{LM}$ simétrico a T_{LM} y un $-T_{ML}$ simétrico a T_{ML} .

En cuanto a los tonos únicos azul y amarillo predichos por ATTD, determinan una sola línea, ligeramente curva, que corta al otro eje neutro en el blanco equienergético. Esto sí está de acuerdo con los datos experimentales. Se comprueba en las gráficas que los tonos únicos de ATTD son bastante estables ante los cambios de

luminancia. Con fondos azul (figura 8.20) o rojo (figura 8.21), las curvas de nivel tienen las mismas características descritas antes, pero desplazado su punto de confluencia en la dirección del color del fondo, tanto más cuanto menor es la luminancia del test; los tonos únicos rojo y verde siguen determinando una línea recta, y los tonos únicos azul y amarillo una línea curva.

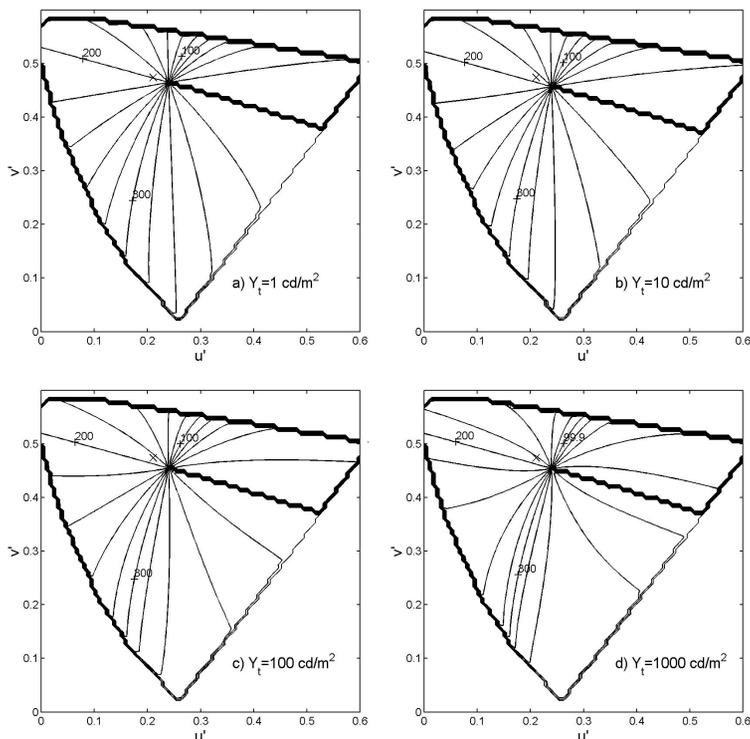


Figura 8.24. Loci de H constante calculados con ATD95 para fondo R.

ATD95 (figura 8.22) también presenta una distribución anómala de los loci de tono a $Y_t = 1000 \text{ cd/m}^2$. Apenas hay diferencias entre el caso de fondo nulo y el de fondo blanco. Los loci presentan curvatura, con el cambio en la dirección de curvatura en las zonas propuestas por Newhall et al., cerca del amarillo único y cerca del extremo azul del espectro. Los loci son en buena aproximación equidistantes

angularmente, igual que en ATTD. El comportamiento de los tonos únicos es también similar al de nuestro modelo, aunque el rojo único de ATD95 tiene un poco más de componente azul sobre la recta de los púrpuras, y por consiguiente el verde único, alineado con el anterior, aparece en una λ mayor que la de ATTD. Los tonos únicos de ATD95 también son bastante estables frente a cambios de luminancia. Con fondos de colores (figuras 8.23 y 8.24) el desplazamiento del centro de los loci respecto al blanco equienergético es menor que el apreciado en ATTD.

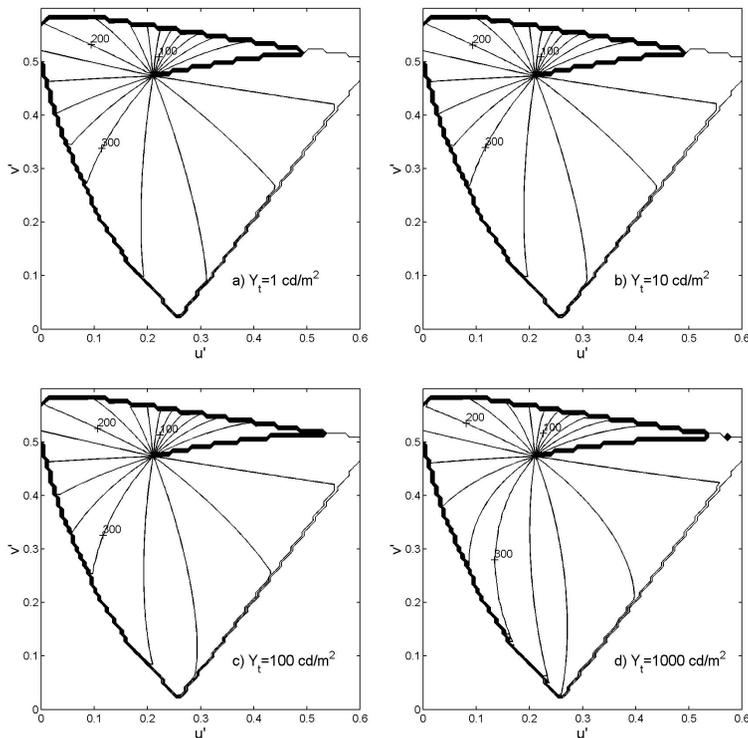


Figura 8.25. Loci de H constante calculados con Hunt94 para fondo W .

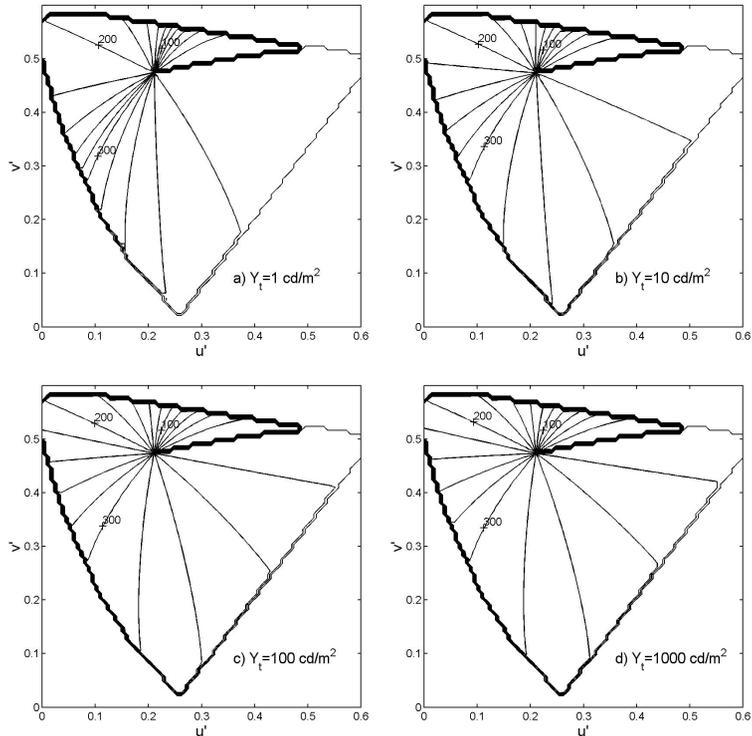


Figura 8.26. Loci de H constante calculados con Hunt91u para fondo nulo.

Hunt91u con fondo nulo (figura 8.26) presenta una distribución anómala de los loci de H en el caso de 1 cd/m^2 de test. Como los dos modelos anteriores, el de Hunt produce curvaturas de los loci que, aun siendo menos apreciables que en el diagrama xy, están de acuerdo con los resultados de Newhall y colaboradores. Tanto para Hunt91u con fondo nulo como para Hunt94 con fondo W (figura 8.25), se aprecia que la separación entre loci en la zona de los púrpuras es sensiblemente mayor, lo cual es lógico teniendo en cuenta que en el modelo de Hunt sí trabajamos con una cuadratura de tono que, recordemos, no persigue tanto la uniformidad perceptual como la correcta posición de los tonos únicos. Éstos ya no son colineales dentro del mismo canal, sino que se quiebran en el blanco, aunque los loci de los tonos únicos rojo y verde siguen siendo más rectos que el

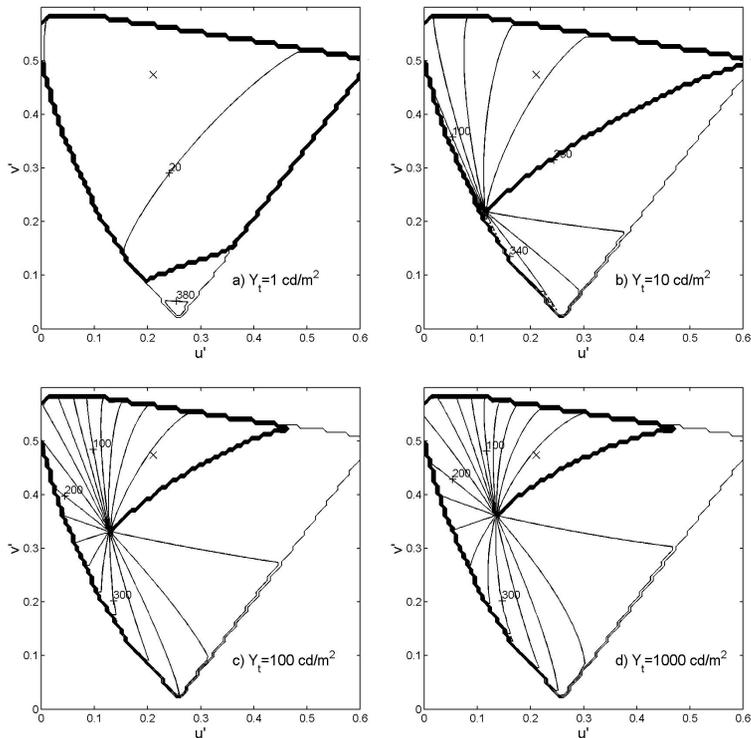


Figura 8.27. Loci de H constante calculados con Hunt94 para fondo B .

azul y el amarillo. El rojo único de pureza unidad predicho es espectral. Todo esto coincide con los datos de Burns et al., excepto en que según dichos datos el amarillo y el azul son colineales, y el rojo único de $p_c=1$ está en la recta de los púrpuras. Al igual que en los otros modelos, los tonos únicos son estables ante cambios de luminancia. Con fondos de colores (figuras 8.27 y 8.28), el desplazamiento del centro de las curvas de nivel es muy grande, saliéndose a veces del diagrama.

Podemos concluir sobre este punto que, si bien ninguno de los modelos reproduce por completo los datos experimentales disponibles acerca de los tonos únicos, el de Hunt, con una cuadratura de tono definida expresamente para ello, es el que más se aproxima a los mismos.

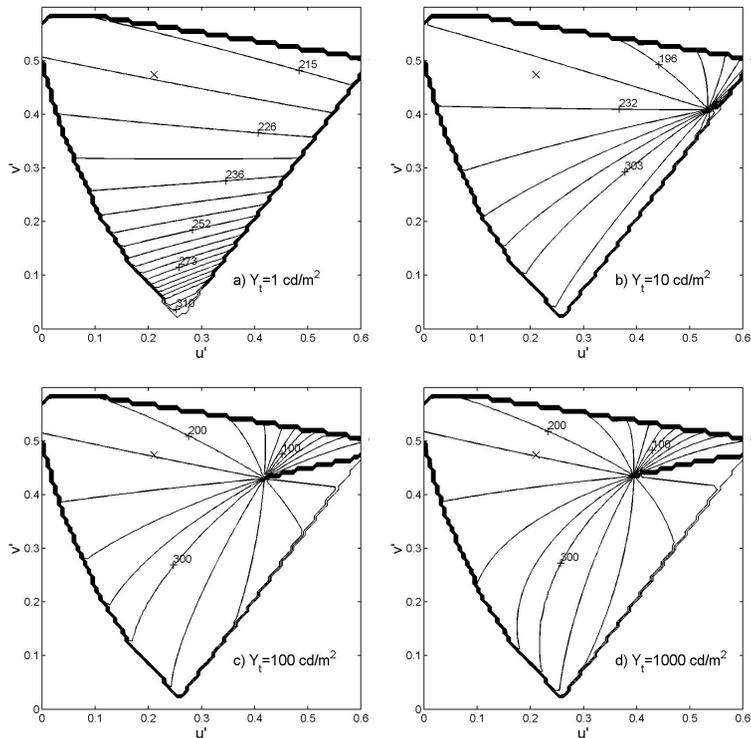


Figura 8.28. Loci de H constante calculados con Hunt94 para fondo R .

8.2.2.3. Efecto Bezold-Brücke (dependencia con Y_t)

Dado un estímulo espectral de una λ determinada, su tono percibido varía en función de su luminancia [Walraven (1961), Boynton y Gordon (1965), Nagy (1980), Cohen (1975)]. A este fenómeno se le conoce con el nombre de efecto Bezold-Brücke (ver figura 2.7). Para comprobar hasta qué punto los distintos modelos predicen este efecto se simula en ellos el siguiente experimento [Purdy (1931b)]: Para cada λ espectral entre 450 nm y 650 nm, con paso de 1 nm, se calcula el tono H correspondiente a una iluminación retiniana del test de 1000 trolands y un fondo de 0 td, y se busca la λ' que a 100 td y con igual fondo proporciona el mismo tono. Esto se consigue mediante una minimización, con límites de variación de λ' de 380 y 780 nm.

Representamos gráficamente $\Delta\lambda=\lambda-\lambda'$ en función de λ . Nótese que la diferencia en la concepción de H según el modelo no influye en el resultado de estas curvas porque estamos buscando longitudes de onda que igualan H a distintas iluminaciones retinianas, sin preocuparnos por el valor numérico que tenga esa H en cada caso, y la relación entre el ángulo de tono y la cuadratura de tono es biunívoca.

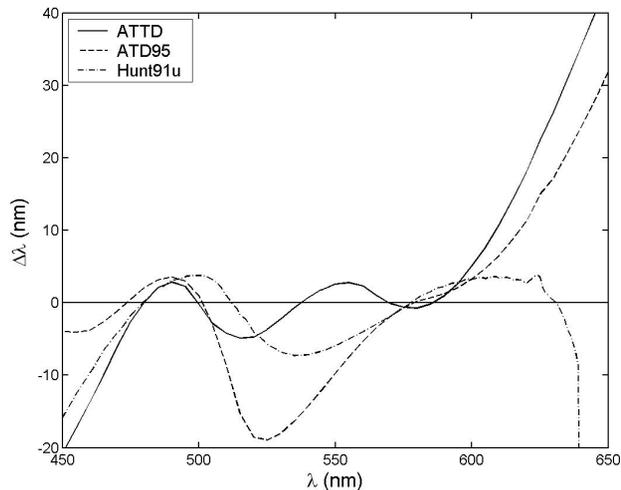


Figura 8.29. Predicciones de los modelos para el efecto Bezold-Brücke.

En la figura 8.29 podemos observar que la curva de ATTD se parece a los datos experimentales, aunque presenta en las cercanías de 575 nm más ceros de lo previsto, y a consecuencia de esto su lóbulo negativo de las medias longitudes de onda es demasiado pequeño. ATD95, empleando autoadaptación del test, da una curva que reproduce bastante bien los datos experimentales, aunque no tan negativa como éstos en las cortas longitudes de onda. Hunt91u da una curva correcta, excepto en las largas longitudes de onda, que presentan una caída de $\Delta\lambda$ hacia valores negativos. No calculamos la curva correspondiente a Hunt94 porque este efecto sólo se da en colores no relacionados [Hunt (1989)].

En resumen, el ajuste a los datos de Purdy y los de Cohen es mejor en ATD95, que reproduce bien el signo y el orden de magnitud de $\Delta\lambda$ en las distintas regiones del espectro. Los otros dos modelos también dan predicciones aproximadas del fenómeno, aunque no tan buenas.

Resumimos a continuación las conclusiones del apartado referente al tono: las curvas de nivel de ATTD son bastante equidistantes angularmente, y la mayoría de los loci están curvados, con lo que el modelo reproduce, al menos cualitativamente, el efecto Aubert-Abney. El rojo único de ATTD, de acuerdo con los datos de Burns, está en la zona de los púrpuras, pero sus loci de tonos rojo y verde determinan una línea recta, lo cual no es compatible con los loci quebrados en el blanco de los datos experimentales. Sus tonos únicos azul y amarillo determinan una sola línea ligeramente curva, de acuerdo con Burns et al.. En cuanto al efecto Bezold-Brücke, las predicciones de ATTD son aceptables, aunque no tan buenas como las de ATD95.

8.2.3. Colorido y saturación

8.2.3.1. Gráficas de M vs. p_c

La dependencia de primer orden del colorido es en función de la pureza colorimétrica. La relación entre M (que, a luminancia constante, es equivalente a la saturación) y p_c es de tipo potencial [Onley et al. (1963), Indow y Stevens (1966), Guirao y DeMattiello (1974)]. Las curvas proporcionadas por los tres modelos en este sentido son muy parecidas, con una especial afinidad entre ATTD (figura 8.30) y ATD95 (figura 8.31). Son curvas crecientes, como cabía esperar, y podrían ajustarse sin duda a funciones potenciales. Para pureza nula se obtiene colorido nulo en los tres modelos; sólo para altas luminancias del test se obtienen en ATTD y ATD95 coloridos ligeramente distintos de cero en $p_c=0$. Hunt94 (figura 8.32) es el único que predice alguna dependencia con Y_b , sobre todo para valores altos de Y_t , siendo mayor el colorido para los Y_b más bajos.

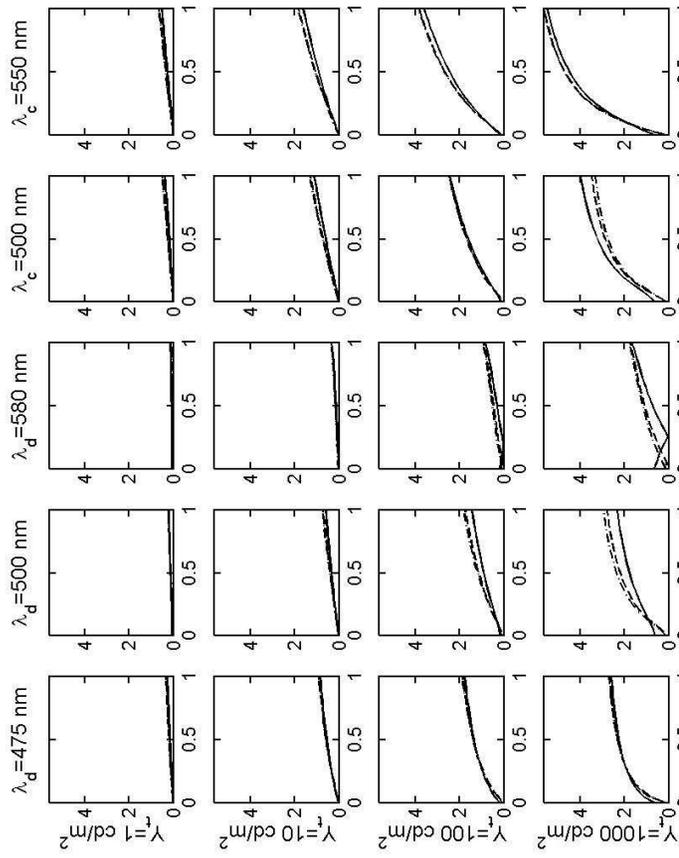


Figura 8.30. Gráficas de M vs. p_c para ATTD. Trazo continuo: $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo: $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo punteado: $Y_b=1 \text{ cd/m}^2$.

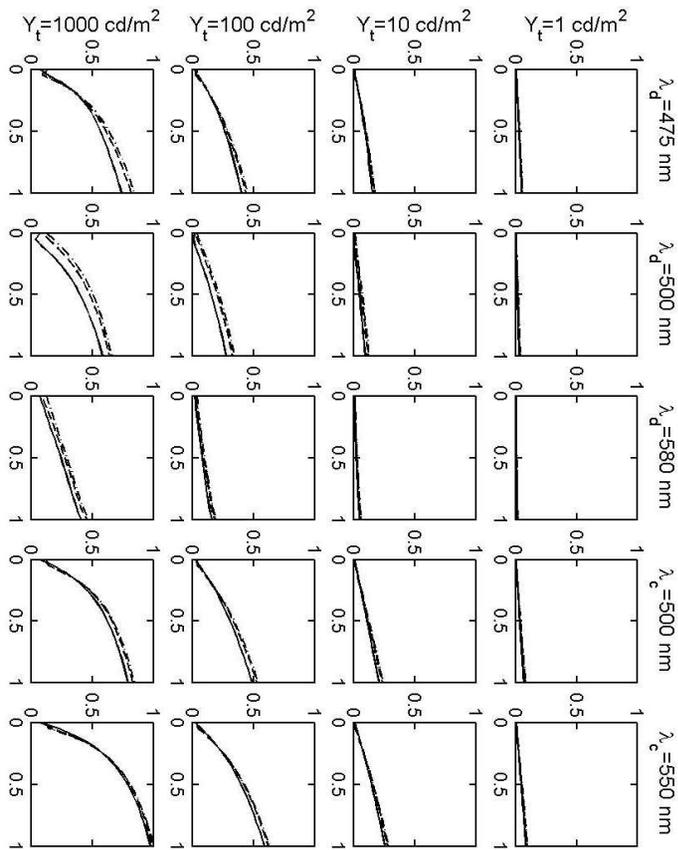


Figura 8.31. Gráficas de M vs. p_c para ATD95. Trazo continuo: $Y_b=100$ cd/m²; Trazo discontinuo: $Y_b=10$ cd/m²; Trazo discontinuo punteado: $Y_b=1$ cd/m².

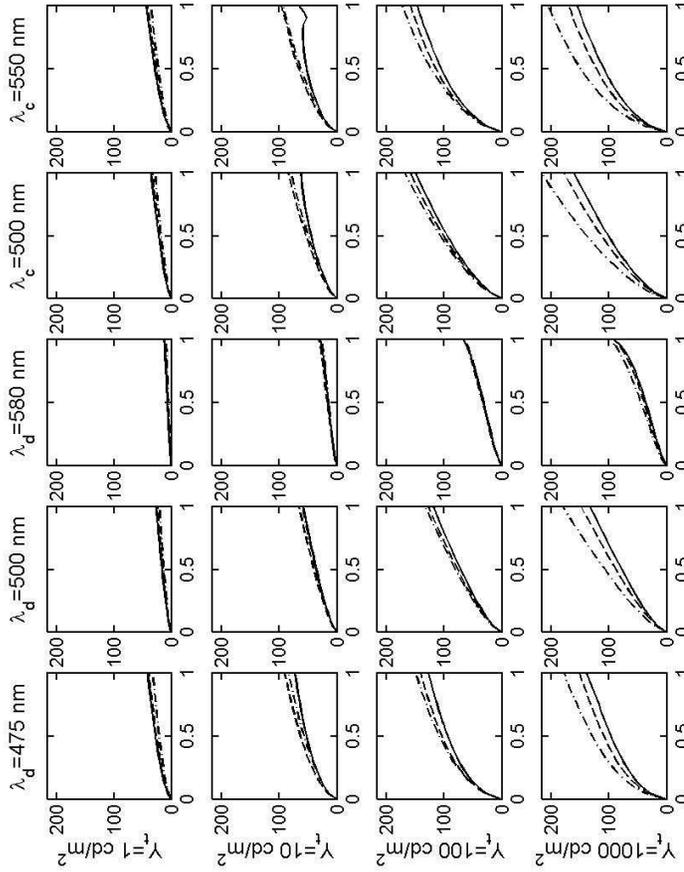


Figura 8.32. Gráficas de M vs. p_c para Hunt94. Trazo continuo: $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo: $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; Trazo discontinuo punteado: $Y_b=1 \text{ cd/m}^2$.

8.2.3.2. Gráficas de M vs. λ_d

Para bajas y medias Y_t son parecidos los resultados de ATTD (figura 8.33), ATD95 (figura 8.34) y Hunt (figura 8.35): el colorido mínimo aparece en torno a 580 nm, con un mínimo secundario en torno a 490 nm y el colorido máximo en el extremo azul del espectro. Esto está de acuerdo con los datos experimentales [Indow y Stevens (1966), Jacobs (1967), Kaiser et al. (1976)] (ver figura 2.10). En altas Y_t los tres modelos presentan anomalías de distintos tipos: ATTD da colorido máximo en la parte central del espectro, ATD95 genera un tercer mínimo local y Hunt94 presenta colorido máximo en el extremo rojo del espectro, además de generar también un tercer mínimo (no ocurre así con Hunt91u, que presenta curvas aparentemente correctas). En cuanto a la variación con p_c , los tres modelos presentan coloridos más bajos para purezas menores, siendo mayor la disminución de M en los extremos del espectro. El extremo azul sigue teniendo mayor colorido para purezas menores a la unidad. En cuanto a los dos mínimos locales de $M(\lambda_d)$, siguen apareciendo aproximadamente en las mismas longitudes de onda, aunque se suavizan bastante al disminuir p_c en los tres modelos.

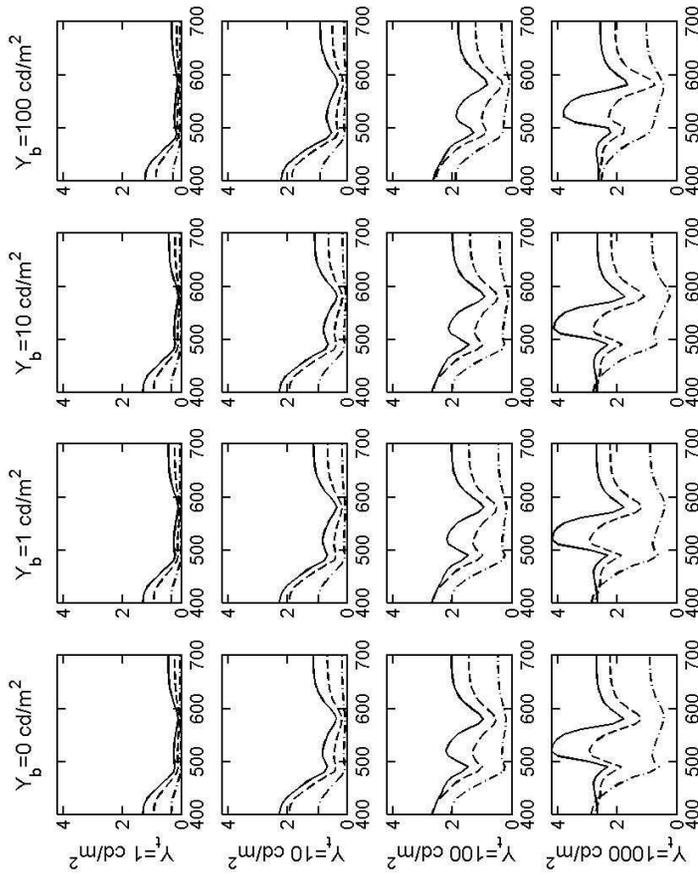


Figura 8.33. Gráficas de M vs. λ_d para ATTD. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

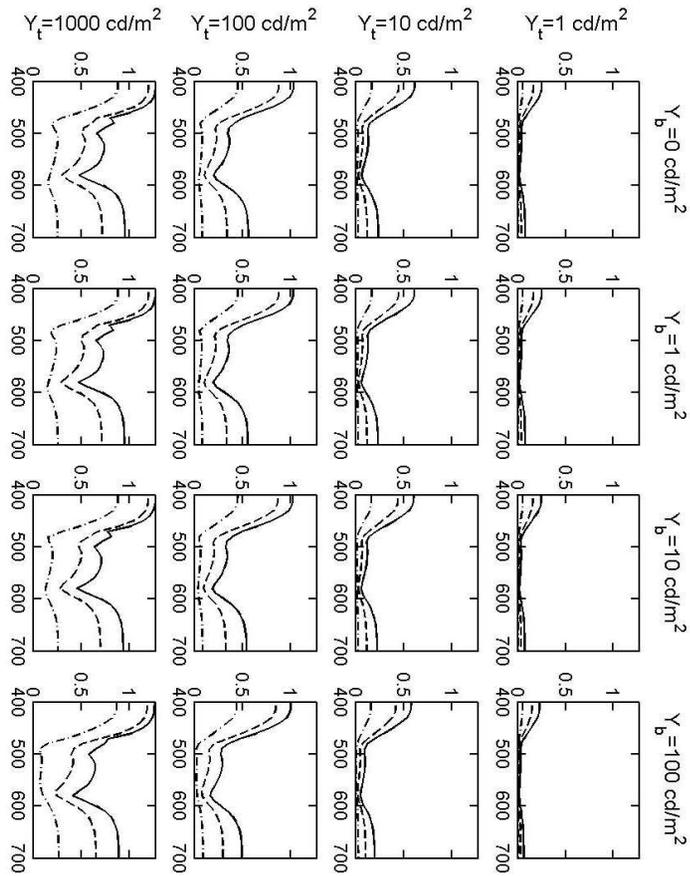


Figura 8.34. Gráficas de M vs. λ_d para ATD95. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

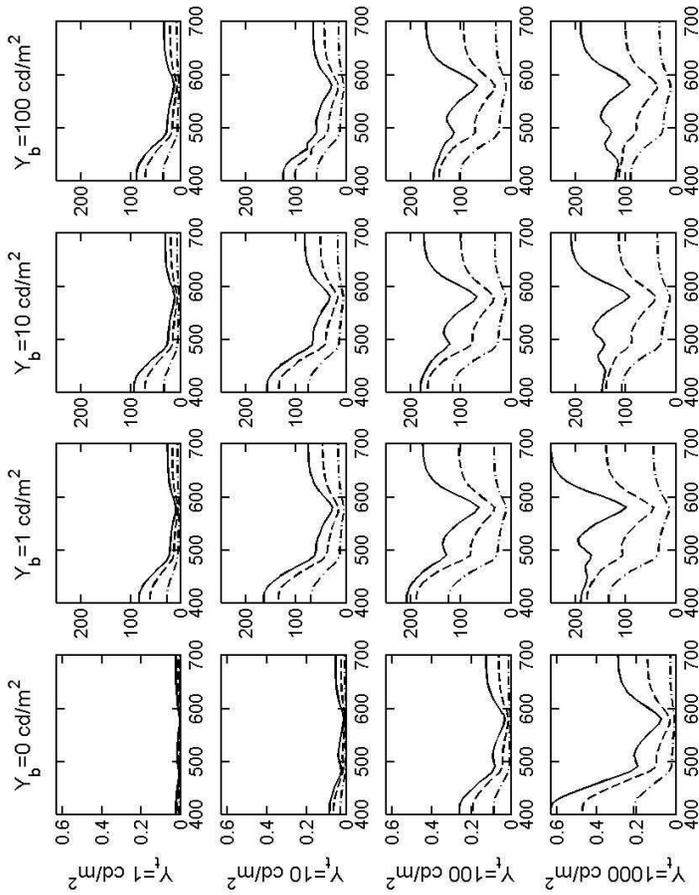


Figura 8.35. Gráficas de M vs. λ_d para Hunt. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

8.2.3.3. Curvas de nivel de colorido en un plano equiluminante

No representaremos las curvas de nivel de saturación porque, en la práctica, en un plano equiluminante el comportamiento de s y M es equivalente.

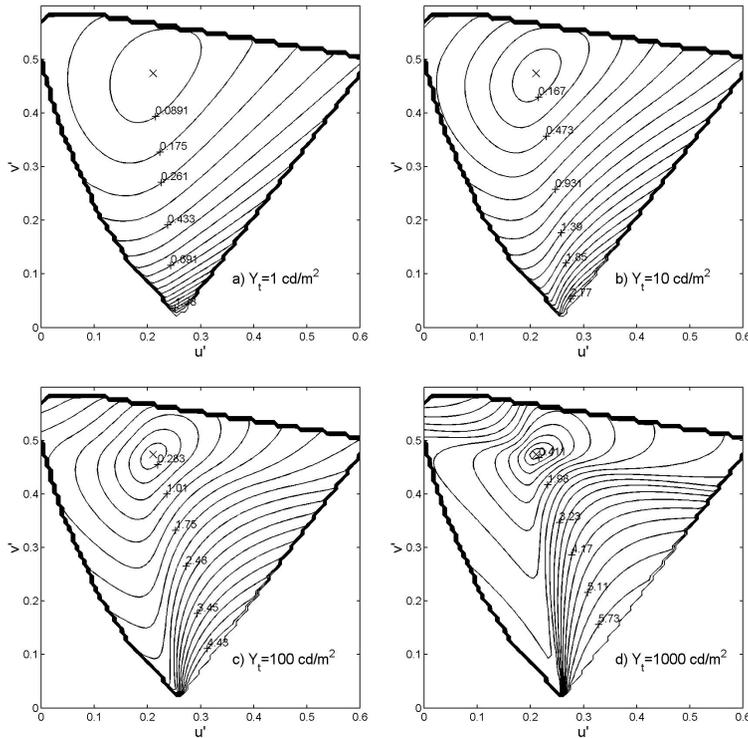


Figura 8.36. Loci de M constante calculados con ATTD para fondo W .

Para ATTD con fondo W (figura 8.36) apreciamos que también los loci de colorido aparecen deformados a 100 cd/m^2 , y sobre todo a 1000 cd/m^2 , como ocurría con los de Q . El modelo funciona bien con $Y_b=0 \text{ cd/m}^2$; apenas hay diferencias entre los loci de fondo nulo y los de fondo blanco. Las curvas de nivel están razonablemente equiespaciadas, al menos cerca del blanco; hay una mayor densidad de líneas de contorno en la región de los azules. El equiespaciado es

menor, y por tanto la densidad de líneas mayor, conforme aumenta la luminancia. Las curvas de nivel más próximas al blanco no son circunferencias, sino pseudoelipses, aunque este hecho no es especialmente significativo, porque $u'v'$ no es un espacio totalmente uniforme, como ya se ha comentado anteriormente. En cuanto a la excentricidad de las pseudoelipses, el blanco equienergético está en el centro de las mismas.

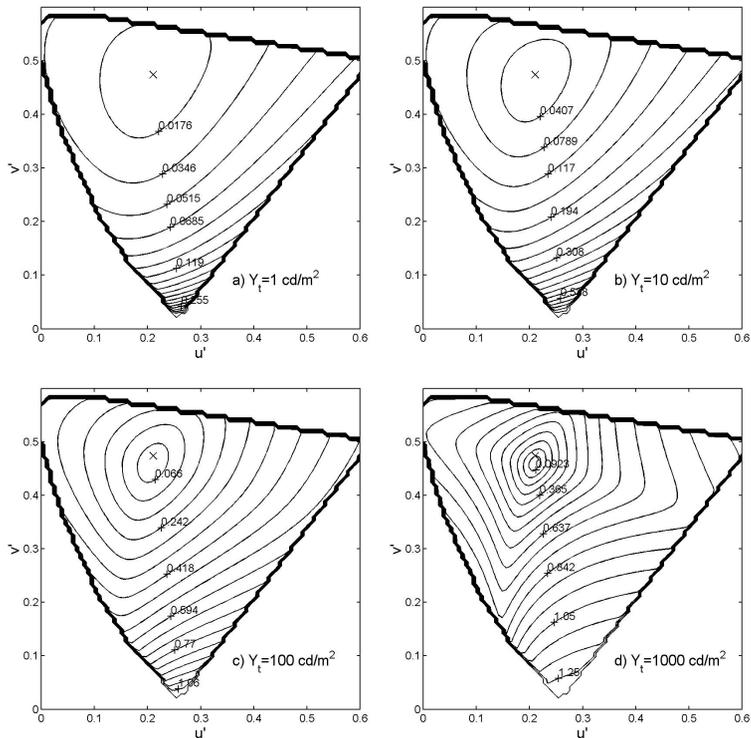


Figura 8.37. Loci de M constante calculados con ATD95 para fondo W .

ATD95 (figura 8.37) se comporta mal a 1000 cd/m^2 ; aparentemente las deformaciones de los loci también tienen relación con los “cuadrantes” determinados por los tonos únicos. Como ATTD, ATD95 apenas presenta diferencias entre los loci de fondo nulo y los de fondo blanco. Para los dos valores más bajos de la luminancia, el

colorido se comporta casi igual que el de ATTD; a luminancias altas se aprecian diferencias entre ambos modelos. Tampoco se observa excentricidad (descentramiento con respecto al blanco equienergético) en las pseudoelipses de M . Igual que en ATTD, la densidad de líneas de contorno aumenta al acercarnos a la región de los azules o al aumentar la luminancia.

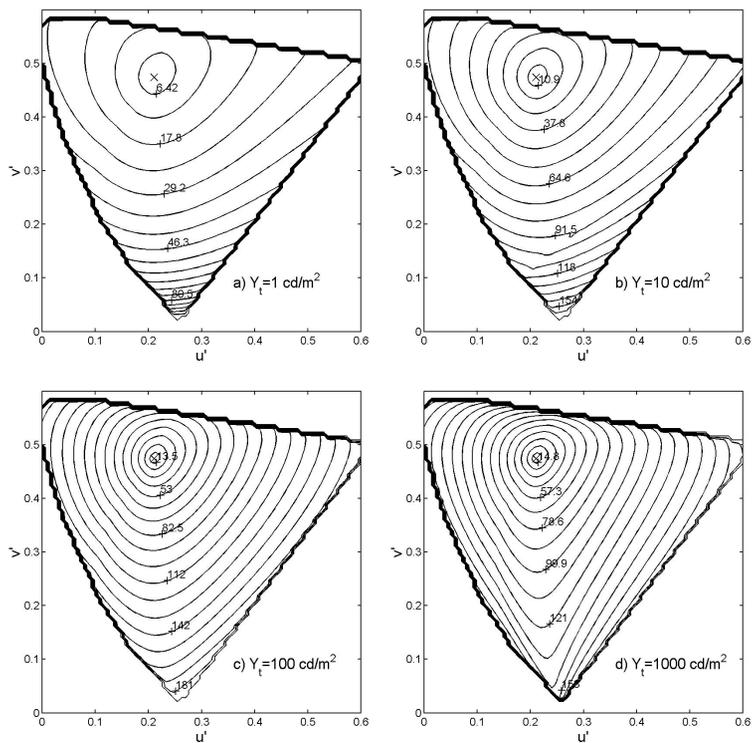


Figura 8.38. Loci de M constante calculados con Hunt94 para fondo W .

Hunt94 con fondo W (figura 8.38) también presenta deformaciones a 1000 cd/m^2 , aunque mucho más leves que las de ATTD o ATD95. Los loci de M son más circulares y más equidistantes que en los otros dos modelos. La densidad de líneas de contorno es mayor a Y_t altas, como en los otros dos modelos; sin embargo, dicha densidad no es tan grande en la región azul como la de ATTD o ATD95. No hay una excentricidad apreciable de los loci respecto al blanco equienergético.

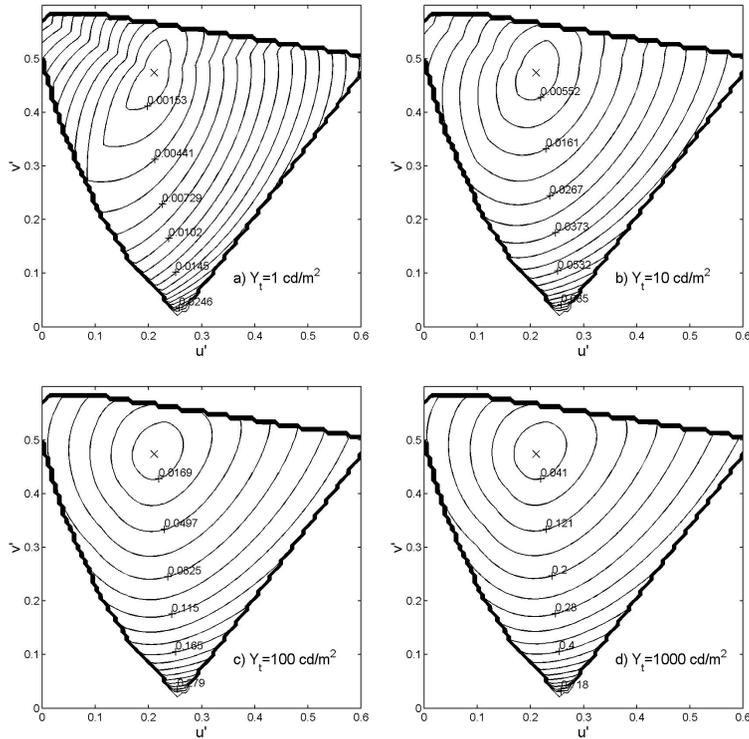


Figura 8.39. Loci de M constante calculados con Hunt91u para fondo nulo.

En Hunt91u con fondo nulo (figura 8.39) aparecen ligeras deformaciones a 10 cd/m^2 y grandes deformaciones a 1 cd/m^2 , con loci quebrados en algunos puntos dados por las direcciones de los tonos únicos. Al contrario que en ATTD, ATD95 o Hunt94, la densidad de líneas de contorno es mayor a luminancias bajas. A 100 cd/m^2 y 1000 cd/m^2 el comportamiento es bueno, con loci circulares y equidistantes, sin apenas excentricidad.

Podemos concluir que, en cuanto a las curvas de nivel de colorido, el modelo de Hunt es el que presenta un mejor funcionamiento, especialmente en los casos de fondo no nulo. El comportamiento de ATTD es aceptable para luminancias no muy altas.

8.2.3.4. Gráficas de M vs. $\log Y_t$ (Efecto Hunt)

El efecto Hunt consiste en el aumento del colorido con la luminancia del test. Algunos estudios respaldan la existencia de valores óptimos de la luminancia para los que el colorido es máximo, valores que varían en función de la cromaticidad del estímulo [Guirao y DeMattiello (1977), Purdy (1931b), Hunt (1952, 1953)]. En otras palabras: probablemente hay efecto Hunt sólo hasta un determinado valor de la luminancia, para una cromaticidad dada.

ATTD (figura 8.40) presenta curvas crecientes, ligeramente cóncavas. Predice por tanto el aumento de M con Y_t , es decir, el efecto Hunt. Sin embargo, no se aprecian en las predicciones de nuestro modelo máximos locales de colorido. M tiende a cero conforme disminuye Y_t , y disminuye con la pureza colorimétrica, como es lógico. Los resultados de ATD95 (figura 8.41) son similares a los de ATTD en todos los aspectos comentados.

Tanto Hunt91u como Hunt94 predicen el efecto Hunt (figura 8.42). En el caso de fondo cero, Hunt91u presenta curvas de características similares a las de ATTD. Hunt94, sin embargo, sí presenta valores óptimos de la luminancia, comprendidos entre 100 y 1000 cd/m^2 , para los que el colorido es máximo. La luminancia óptima es la misma para las tres purezas colorimétricas representadas, disminuye conforme aumenta Y_b y varía su posición en función de λ_d . También en este modelo la M tiende a cero al disminuir Y_t y varía con p_c , aunque a diferencia de los otros, Hunt94 presenta algunas anomalías en las curvas de Y_b alto.

Podemos decir, pues, que los tres modelos predicen el efecto Hunt pero sólo Hunt94 produce máximos locales de M .

En cuanto a la variación de M con $\log Y_b$, se puede comprobar que Hunt94 proporciona curvas ligeramente crecientes para Y_t bajas, ligeramente decrecientes para Y_t medias y notablemente decrecientes para Y_t altas, y que ATTD y ATD95 presentan curvas ligeramente decrecientes, casi constantes, bastante parecidas a las de Hunt94 sobre todo para Y_t medias.

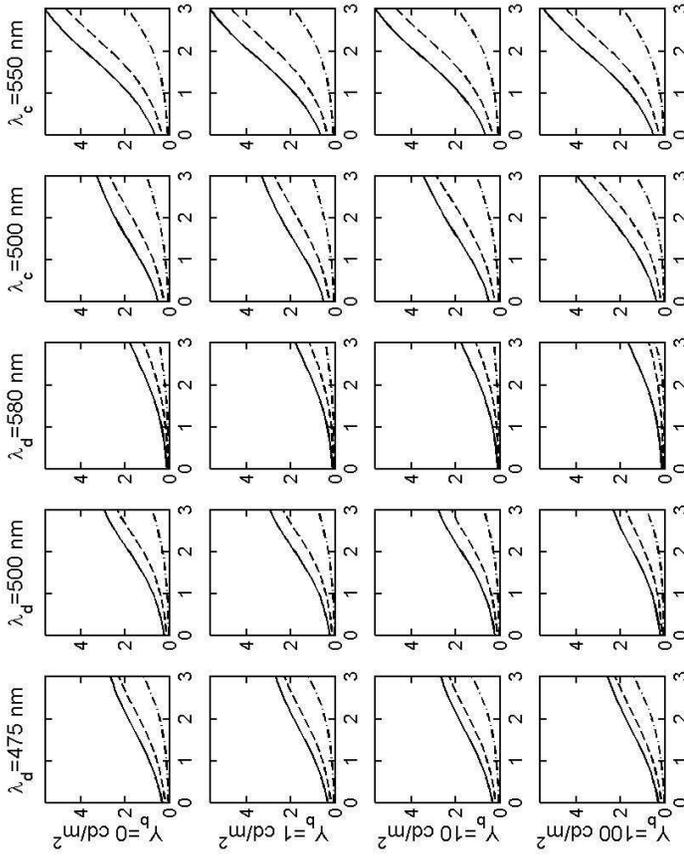


Figura 8.40. Gráficas de M vs. $\log Y_t$ para ATTD. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

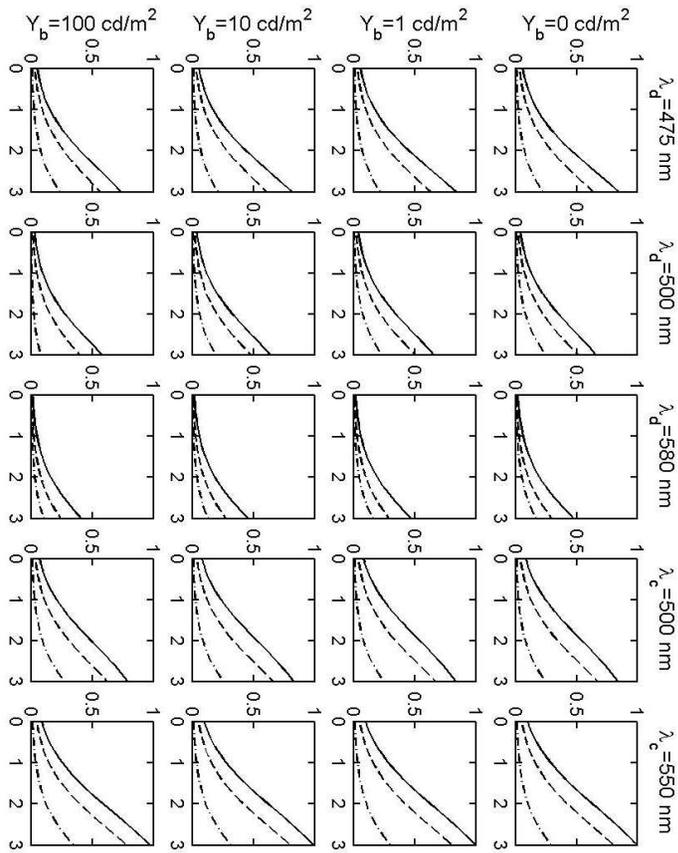


Figura 8.41. Gráficas de M vs. $\log Y_i$ para ATD95. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

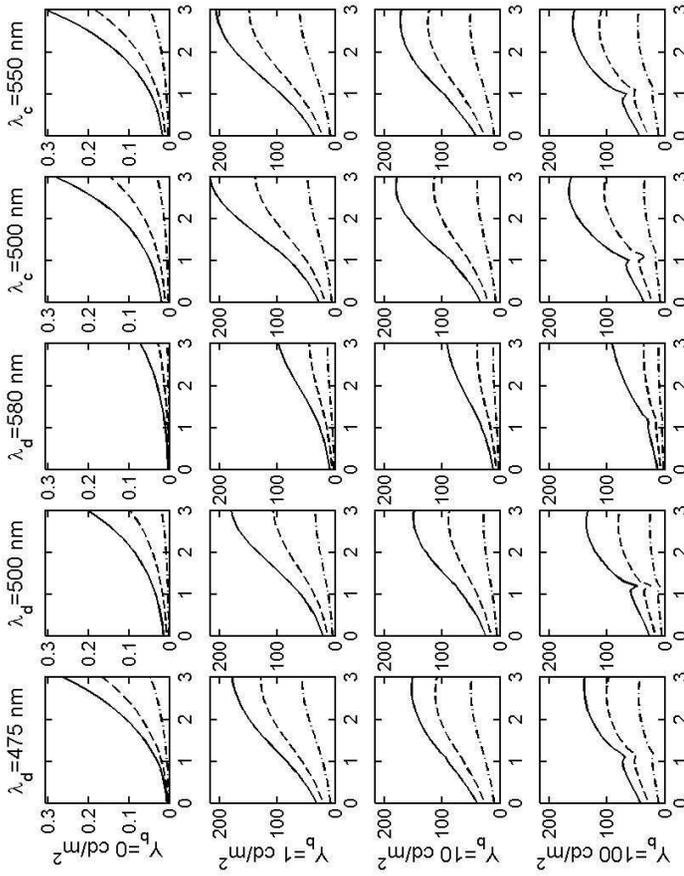


Figura 8.42. Gráficas de M vs. $\log Y$, para Hunt. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

Ninguno de los tres modelos reproduce los resultados experimentales que animaron a Hunt a modificar las definiciones de croma y colorido de la versión para colores relacionados de su modelo [Luo et al. (1993), Hunt (1994)]. Según estos datos, las curvas de M vs. $\log Y_b$ deberían ser crecientes para Y_t altas y decrecientes para los restantes valores de Y_t . Es posible que ATTD y ATD95 no sean capaces de reproducir este comportamiento, pero Hunt94 sí debería hacerlo; la razón más plausible para que no lo haga consiste en que las condiciones de observación que estamos suponiendo para todos nuestros items de testeo (y simulando mediante la elección de determinados parámetros de entrada del Hunt94 implementado en entorno MATLAB) son diferentes de las condiciones en las que Hunt observó dicho efecto.

8.2.3.5. Gráficas de s vs. $\log Y_t$

Al aumentar la luminancia del test crecen tanto M como Q , y por tanto su cociente s permanece constante en primera aproximación. El resultado esperado en este ítem son, pues, curvas relativamente constantes. Las curvas de ATTD (figura 8.43) tienen algunos tramos crecientes y decrecientes, pero son constantes en primera aproximación. ATD95 (figura 8.44) presenta curvas constantes para purezas bajas y decrecientes para purezas altas. Las gráficas de Hunt (figura 8.45) son en general similares a las de M vs. $\log Y_t$, lo cual no es correcto. Los tres modelos presentan variación con p_c .

Resumiendo las conclusiones del presente apartado, hemos comprobado que las predicciones en cuanto a la variación de M con λ_d y con p_c son correctas y similares para los tres modelos. Al igual que los de luminosidad, también los loci de colorido constante de ATTD aparecen deformados a altas luminancias; esta inestabilidad del modelo podría corregirse añadiendo en el conjunto de entrenamiento de sus parámetros curvas con energías mayores. ATTD predice el efecto Hunt, pero no los máximos locales de colorido para determinadas luminancias. Y por último, nuestro modelo tiende a mantener constante la saturación al variar la luminancia, requisito que no cumple el modelo de Hunt.

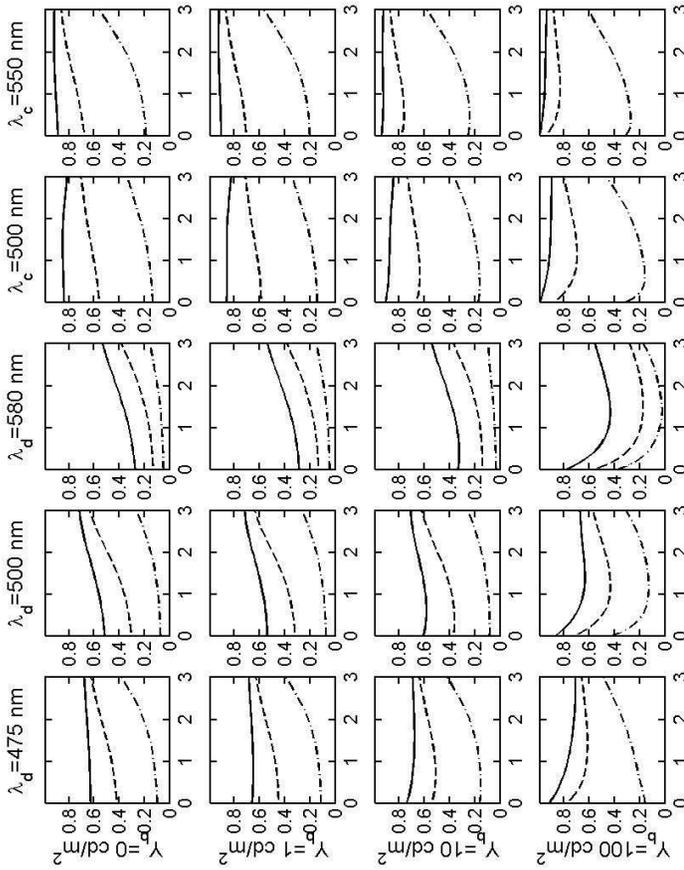


Figura 8.43. Gráficas de s vs. $\log Y_t$ para ATTD. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

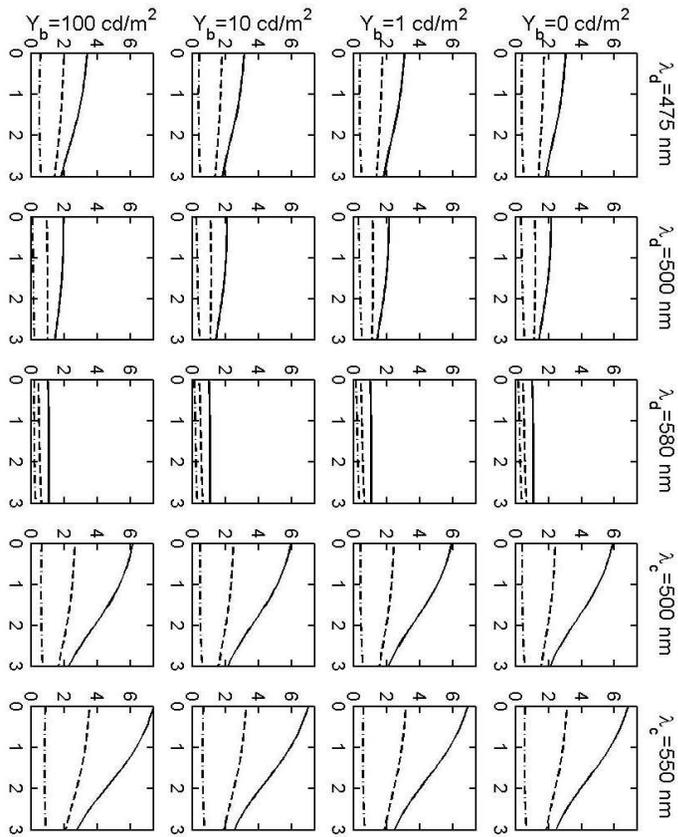


Figura 8.44. Gráficas de s vs. $\log Y_t$ para ATD95. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

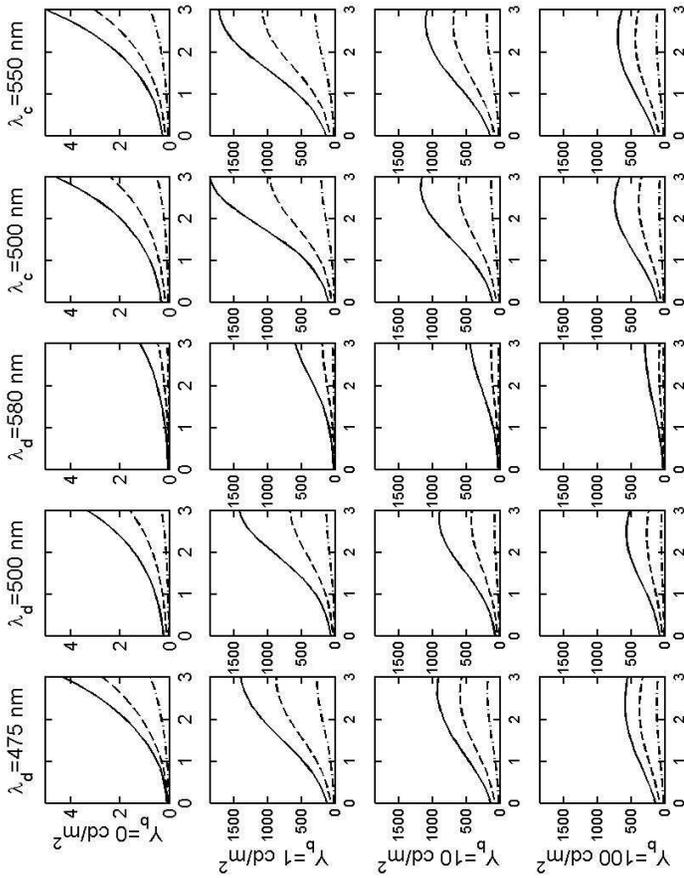


Figura 8.45. Gráficas de s vs. $\log Y_t$ para Hunt. Trazo continuo: $p_c=1$; Trazo discontinuo: $p_c=0.5$; Trazo discontinuo punteado: $p_c=0.1$.

8.3. Uniformidad del plano perceptual

Representaremos a continuación los loci de tono y croma Munsell constante en el plano TD_P , así como en los planos equivalentes de ATD95 y Hunt94. Cuanto más regular sea la distribución de las muestras Munsell en el plano, con loci de tono constante radiales y loci de croma constante circulares, mayor será su uniformidad perceptual. Deseamos que la métrica de nuestro espacio de color sea lo más euclídea posible.

Cálculo de las coordenadas de las muestras Munsell en el plano perceptual:

Partimos de las reflectancias de las muestras Munsell deseadas. Usamos los valores $V=3, 5$ y 7 , todos los cromas C (el 1 , y de 2 en 2 desde el 2 hasta el 16), los diez tonos principales Munsell y los tonos secundarios Munsell $2.5, 5, 7.5$ y 10 (es decir, la mitad de los disponibles). Para $C=1$ sólo existen los tonos secundarios 5 y 10 . Suponemos que las muestras son iluminadas por un iluminante D_{65} de 100 cd/m^2 . Calculamos los valores triestímulo XYZ correspondientes. Como fondo usamos un estímulo equienergético de reflectancia 20% en todo el espectro (equivalente a valor 5) iluminado también por D_{65} de 100 cd/m^2 . Para cada value y croma comprobamos qué tonos hay disponibles, y vemos qué anillos de igual croma están completos. Decidimos que en los dos anillos en los que faltan sólo 5 de los 40 tonos también se pueden calcular los coeficientes. El resto de anillos incompletos sí aparecen en las gráficas, pero no en la tabla de coeficientes.

Calcularemos los descriptores TD_P de las muestras para ATTD, y sus equivalentes de ATD95 y Hunt94. Para ATD95 consideraremos TD_2 como descriptores equivalentes, cambiando el signo de D_2 para poder comparar más cómodamente los resultados. ¿Y qué variables utilizaremos en Hunt94? El ángulo de tono se define en este modelo como:

$$h_s = \text{arctg} \left(\frac{M_{YB}/F_t}{M_{RG}} \right) \quad (8.1)$$

siendo F_t el factor de tritanopía a baja luminancia. Este factor es muy próximo a la unidad para valores de luminancia del test mayores o iguales a 1 cd/m^2 como los considerados en nuestro estudio. Por tanto, podemos considerar el contenido rojo-verde M_{RG} y el contenido amarillo-azul M_{YB} como las coordenadas cartesianas asociadas a la coordenada polar de ángulo de tono h_s . En consecuencia, usando $M_{RG}M_{YB}$ como descriptores equivalentes a TD_P obtendremos un plano lo más uniforme posible desde el punto de vista perceptual en el que podremos analizar la posición de las muestras Munsell [Nayatani et al. (1990b)]. Para más detalles, ver el razonamiento sobre los descriptores asociados al tono en el apéndice B.

Para facilitar la comparación, en cada modelo y value renormalizamos T_P y D_P (o sus equivalentes) por la misma constante, de forma que la distancia promedio de las muestras de croma Munsell 6 a su propio “centro de masas” valga 6. Este radio promedio se calcula de la siguiente forma:

$$R_{C=6} = \frac{1}{N_{C=6}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{C=6}} \sqrt{(T_i - T_{C=6})^2 + (D_i - D_{C=6})^2} \quad (8.2)$$

donde la posición del centro viene dada por:

$$\begin{aligned} T_{C=6} &= \frac{1}{N_{C=6}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{C=6}} T_i \\ D_{C=6} &= \frac{1}{N_{C=6}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{C=6}} D_i \end{aligned} \quad (8.3)$$

$N_{C=6}$ es el número total de muestras que hay en el anillo de croma 6.

Una vez hecha la normalización, calculamos para cada modelo y value los TD_0 promedio, desde los cuales mediremos los radios de todos los anillos de croma correspondientes a ese value:

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{1}{N_V} \cdot \sum_{i=1}^{N_V} T_i \\ D_0 &= \frac{1}{N_V} \cdot \sum_{i=1}^{N_V} D_i \end{aligned} \quad (8.4)$$

N_V es el número total de muestras de ese value, contando los distintos cromas. Los TD_0 promedio no tienen por qué coincidir con el blanco perceptual del modelo, ni tienen por qué ser los mismos para distintos values, pero sí tendrían que coincidir para los distintos cromas de un value dado.

También obtenemos por el procedimiento antes explicado las TD_P de las muestras Munsell neutras de values 3, 5 y 7 a través de los tres modelos. Sería deseable que coincidieran lo máximo posible con los TD_0 promedio.

Observamos en las figuras 8.46, 8.47 y 8.48 que en los tres modelos el promedio se va desplazando hacia arriba y hacia la izquierda con respecto a la muestra neutra a medida que aumenta el value. La muestra neutra está en el centro del anillo de $C=1$ cuando el value es bajo, y se va descentrando conforme aumenta V .

En Hunt94 las muestras Munsell están más desplazadas hacia el azul del modelo que en los planos equivalentes de ATD95 y ATTD. Tanto el plano $M_{RG}M_{YB}$ de Hunt94 como el plano TD_2 de ATD95 y el plano TD_P de ATTD están asociados a un ángulo de tono, y por consiguiente tienden a proporcionar, como se puede comprobar en las gráficas, una distribución uniforme de las muestras Munsell y una posición de los tonos únicos Munsell (5R, 5G, 5Y, 5B) fuera de los ejes.

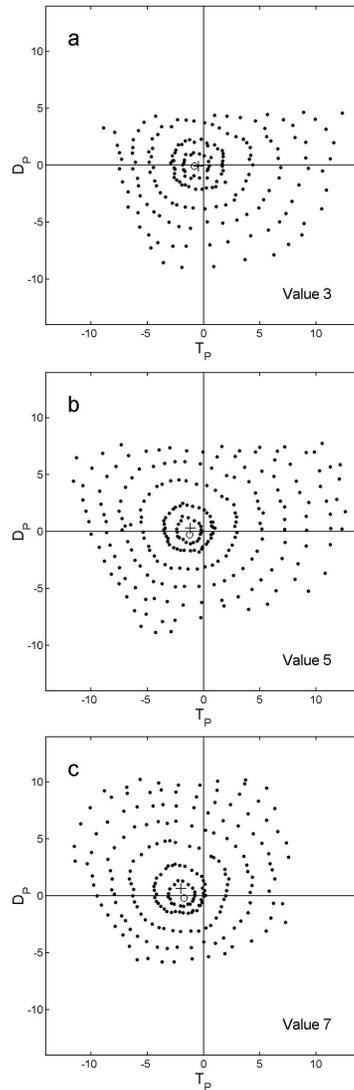


Figura 8.46. Loci de tono y cromas Munsell constante en el plano TD_P de ATTD. Los TD_0 promedio se indican con una cruz, y las TD_P de las muestras Munsell neutras con un círculo. a) Value 3; b) Value 5; c) Value 7.

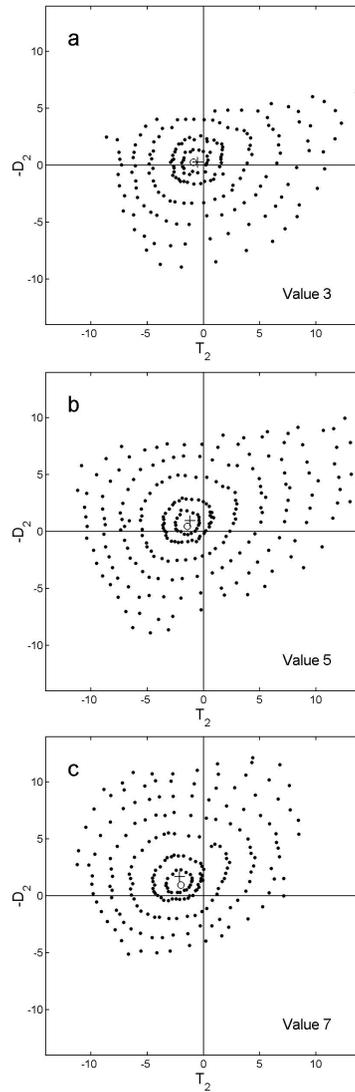


Figura 8.47. Loci de tono y croma Munsell constante en el plano TD_2 de ATD95. Los TD_{20} promedio se indican con una cruz, y las TD_2 de las muestras Munsell neutras con un círculo. a) Value 3; b) Value 5; c) Value 7.

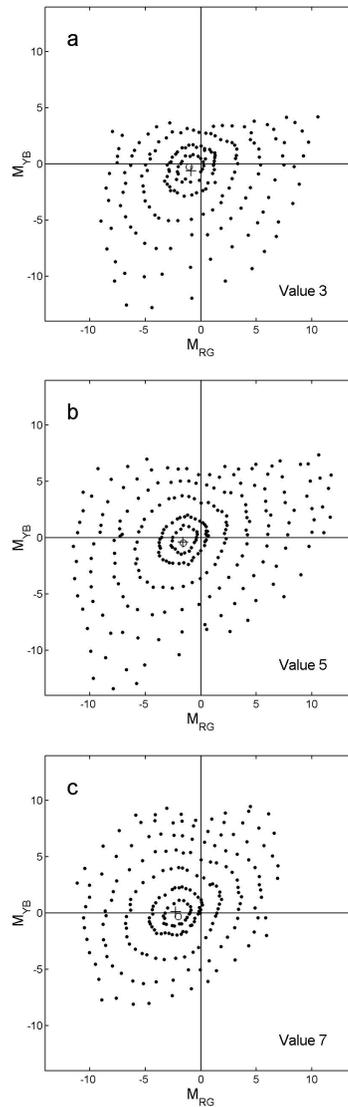


Figura 8.48. Loci de tono y croma Munsell constante en el plano $M_{RG}M_{YB}$ de Hunt94. Los $M_{RG}M_{YB}_0$ promedio se indican con una cruz, y las $M_{RG}M_{YB}$ de las muestras Munsell neutras con un círculo. a) Value 3; b) Value 5; c) Value 7.

Cálculo de los coeficientes de uniformidad en cada anillo completo:

-Promedio: Es el centro aproximado del anillo. Sería deseable que se acercara lo máximo posible a TD_0 .

$$\begin{aligned} T_0' &= \frac{1}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{N_C} T_i \\ D_0' &= \frac{1}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{N_C} D_i \end{aligned} \quad (8.5)$$

-Excentricidad: Estima cuánto se desvía el promedio de cada anillo de cromita con respecto al promedio de todo el valor correspondiente. Queremos valores lo más pequeños posibles.

$$e = \sqrt{(T_0' - T_0)^2 + (D_0' - D_0)^2} \quad (8.6)$$

-Radio: Es la distancia promedio de las muestras al centro de ese valor. Lo ideal sería que, dada la normalización realizada, coincidiese con el valor del cromita del anillo en cuestión. Se calcula:

$$R_0 = \frac{1}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{N_C} R_i \quad (8.7)$$

donde R_i es:

$$R_i = \sqrt{(T_i - T_0)^2 + (D_i - D_0)^2} \quad (8.8)$$

-Circularidad: Este coeficiente nos indica lo mucho o poco que se acerca la forma del anillo a la de una circunferencia perfecta. Cuanto menor sea el coeficiente, mejor.

$$\epsilon_C = \frac{1}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{N_C} (R_i - R_0)^2 \quad (8.9)$$

-Uniformidad en tono: Coeficiente que nos indica si las muestras de los distintos tonos dentro del anillo son más o menos equidistantes. Cuanto menor sea, mayor uniformidad. Se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{N_C} \left(\frac{\Delta H_i}{R_i} - \frac{2\pi}{N_C} \right)^2 \quad (8.10)$$

donde:

$$\Delta H_i = \sqrt{(T_{i+1} - T_i)^2 + (D_{i+1} - D_i)^2} \quad (8.11)$$

ΔH_i no es una variación de tono, sino una distancia medida en el plano TD_p . Para anillos incompletos hay que modificar las fórmulas de ΔH_i y ε_H , evitando las dos zonas donde faltan tonos. Los coeficientes ε_C y ε_H son similares a los de Seim y Valberg [Seim y Valberg (1986)].

Cálculo de los coeficientes de uniformidad en cada value y modelo:

-Estabilidad del centro: Nos indica si los centros de los anillos son muy diferentes en posición para los distintos cromas. Nos interesa que el coeficiente sea próximo a cero.

$$\varepsilon_e = \frac{1}{n_C} \cdot \sum_{j=1}^{n_C} e_j^2 \quad (8.12)$$

n_C es el número de anillos de croma que participan en el cálculo del coeficiente, en cada value.

-Uniformidad en croma: Coeficiente que nos indica si los distintos cromas dentro del value son más o menos equidistantes. Cuanto menor sea, mayor uniformidad.

$$\varepsilon_R = \frac{1}{n_C} \cdot \sum_{j=1}^{n_C} \left(\frac{R_{0j} - C_j}{C_j} \right)^2 \quad (8.13)$$

Dividimos por el cromograma porque aquí el valor de referencia es distinto en cada sumando.

Resultados y conclusiones:

Los resultados obtenidos para los distintos modelos se presentan en las tablas 8.I, 8.II y 8.III. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

-Los coeficientes ε_C de circularidad de ATTD son menores que los de ATD95, lo que quiere decir que los loci de cromograma de nuestro modelo son más circulares. Hunt94 es peor a este respecto que ATD95, y por tanto peor también que nuestro modelo.

V	T ₀	D ₀	C	T ₀ '	D ₀ '	e	R ₀	ε _C	ε _H	ε _e	100ε _R
3	-0.45	-0.09	1	-0.70	-0.02	0.26	1.20	0.04	0.23	0.13	1.51
			2	-0.58	0.06	0.20	2.27	0.03	0.19		
			4	-0.50	0.16	0.25	4.26	0.11	0.20		
			6	-0.11	-0.58	0.60	6.03	0.41	0.19		
5	-1.15	0.29	1	-1.26	0.01	0.30	1.14	0.03	0.20	0.18	0.53
			2	-1.30	0.19	0.18	2.14	0.03	0.20		
			4	-1.34	0.46	0.25	4.16	0.13	0.19		
			6	-1.19	0.62	0.32	6.00	0.22	0.21		
			8	-1.10	0.65	0.36	7.68	0.44	0.21		
			10	-0.72	-0.39	0.81	9.22	0.91	0.18		
7	-1.99	0.65	1	-1.87	0.04	0.62	1.25	0.10	0.33	0.15	1.51
			2	-1.99	0.32	0.33	2.21	0.03	0.21		
			4	-2.07	0.63	0.08	4.17	0.08	0.20		
			6	-2.03	0.86	0.22	6.00	0.20	0.21		
			8	-1.94	1.08	0.43	7.61	0.54	0.20		

Tabla 8.I. Coeficientes de uniformidad obtenidos para el modelo ATTD.

V	T ₀	D ₀	C	T ₀ '	D ₀ '	e	R ₀	ε _C	ε _H	ε _e	100ε _R
3	-0.51	0.28	1	-0.78	0.33	0.27	1.16	0.05	0.27	0.12	0.97
			2	-0.65	0.41	0.19	2.21	0.04	0.21		
			4	-0.55	0.51	0.24	4.19	0.15	0.21		
			6	-0.16	-0.17	0.57	6.03	0.56	0.19		
5	-1.22	0.97	1	-1.41	0.72	0.31	1.08	0.04	0.20	0.19	0.20
			2	-1.43	0.88	0.22	2.07	0.06	0.22		
			4	-1.43	1.12	0.26	4.10	0.17	0.21		
			6	-1.25	1.27	0.31	6.00	0.32	0.22		
			8	-1.14	1.31	0.35	7.78	0.66	0.22		
			10	-0.70	0.30	0.85	9.50	1.23	0.18		
7	-2.13	1.66	1	-2.10	1.14	0.53	1.16	0.08	0.33	0.12	0.61
			2	-2.19	1.37	0.30	2.11	0.06	0.22		
			4	-2.20	1.62	0.08	4.10	0.12	0.21		
			6	-2.13	1.85	0.19	6.00	0.29	0.22		
			8	-2.01	2.07	0.42	7.71	0.68	0.21		

Tabla 8.II. Coeficientes de uniformidad obtenidos para el modelo ATD95.

V	T ₀	D ₀	C	T ₀ '	D ₀ '	e	R ₀	ε _C	ε _H	ε _e	100ε _R
3	-0.91	-0.59	1	-0.92	-0.30	0.29	1.24	0.04	0.27	0.17	1.82
			2	-0.86	-0.32	0.28	2.23	0.04	0.21		
			4	-0.92	-0.42	0.18	4.14	0.20	0.22		
			6	-0.95	-1.28	0.69	6.02	0.68	0.20		
5	-1.64	-0.37	1	-1.47	-0.23	0.22	1.16	0.04	0.23	0.23	0.56
			2	-1.50	-0.17	0.25	2.16	0.05	0.22		
			4	-1.64	-0.10	0.27	4.15	0.18	0.22		
			6	-1.63	-0.12	0.25	6.02	0.36	0.23		
			8	-1.71	-0.26	0.13	7.84	1.01	0.23		
			10	-1.84	-1.42	1.07	9.74	1.56	0.21		
7	-2.25	0.11	1	-2.08	-0.13	0.30	1.18	0.03	0.32	0.04	0.88
			2	-2.12	0.01	0.17	2.18	0.05	0.22		
			4	-2.25	0.11	0.01	4.12	0.16	0.22		
			6	-2.35	0.18	0.12	6.00	0.44	0.23		
			8	-2.39	0.27	0.21	7.71	0.72	0.22		

Tabla 8.III. Coeficientes de uniformidad obtenidos para el modelo Hunt94.

-En cuanto a uniformidad en la distribución de los tonos (ϵ_H), nuestro modelo es ligeramente mejor que ATD95, que a su vez es ligeramente mejor que Hunt94.

-En lo referente a la estabilidad del centro de los anillos de croma (ϵ_e), para value 3 la de ATTD es mejor que la de Hunt pero ligeramente peor que la de Guth; para value 5 es mejor que las de Guth y Hunt y para value 7 es peor que las de los otros dos modelos.

-La uniformidad en la distribución de los cromas (ϵ_R) de ATTD es para values 3 y 5 mejor que la de Hunt y peor que la de Guth, y para value 7 es peor que las de los otros dos modelos.

Por tanto, podemos concluir que aunque los tres modelos se comportan de manera similar, proporcionando una distribución razonablemente uniforme de las muestras Munsell, el nuestro genera loci de croma Munsell constante más parecidos a una circunferencia perfecta, y con los distintos tonos más equidistantes dentro de cada anillo, si bien su distribución de los distintos anillos de croma no es la más uniforme.

8.4. Inducción cromática

8.4.1. Percepción de un test blanco en función de la cromaticidad del inductor

Considerando como test el blanco perceptual (el estímulo de luminancia Y_t que se percibe neutro visto en un fondo de su misma cromaticidad y de luminancia Y_b), representaremos la variación de sus descriptores perceptuales al cambiar el color del fondo. Nos centraremos en las dos dependencias de primer orden: primero obtendremos gráficas de H del test en función de la λ_d del fondo, para los casos de $p_{cb}=1, 0.5, 0.1$; en segundo lugar obtendremos gráficas de M del test en función de la p_c del fondo, en los casos de $\lambda_{db}=475$ nm (azul), $\lambda_{db}=500$ nm (verde), $\lambda_{db}=580$ nm (amarillo), $\lambda_{cb}=500$ nm (rojo). Hacemos los cálculos para los tres modelos en los casos de fondo de luminancia menor ($Y_t=100$ cd/m², $Y_b=10$ cd/m²), igual ($Y_t=10$ cd/m², $Y_b=10$ cd/m²) y mayor que la del test ($Y_t=10$ cd/m², $Y_b=100$ cd/m²).

Para cada modelo y combinación Y_t - Y_b usamos unas nuevas λ_{db} y p_{cb} definidas desde el blanco perceptual (con fondo de su mismaromaticidad) correspondiente a cada caso, de coordenadas xyz_t . Así, los valores triestímulo de los inductores a utilizar se calcularán, con ayuda de las funciones de igualación, de esta manera:

$$\begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{pmatrix} = Y_b \cdot p_{cb} \cdot \frac{1}{y(\lambda_{db})} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda_{db}) \\ \bar{y}(\lambda_{db}) \\ \bar{z}(\lambda_{db}) \end{pmatrix} + Y_b \cdot (1 - p_{cb}) \cdot \frac{1}{y_t} \cdot \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} \quad (8.14)$$

El uso de estas λ_{db} , p_{cb} permite estudiar de forma aislada los fenómenos de estabilidad del blanco y de inducción cromática en cada modelo. En este ítem de testeo es particularmente conveniente descontar la posible inestabilidad del blanco perceptual, ya que estamos calculando los descriptores de un estímulo deromaticidad aproximadamente blanca. De todos modos, los tres modelos considerados en nuestro estudio proporcionan un blanco perceptual con fondo de su mismaromaticidad muy estable, y coincidente con el blanco equienergético, de forma que las curvas de inducción cromáticas obtenidas, mostradas en las figuras 8.49, 8.50 y 8.51, habrían sido las mismas si no se hubiera tomado esta precaución al escoger λ_{db} y p_{cb} .

Curvas de tono inducido:

Las gráficas de H son similares a las de H vs. λ vistas en el apartado 8.2.2.1, pero con un desfase de unos 200 grados centesimales de tono. Esto indica que el tono percibido para el test es el complementario al del fondo inductor. Esta predicción es consistente con las conclusiones generales de diversos estudios [Werner y Walraven (1982), Ware y Cowan (1982), Luo et al. (1995), Krauskopf et al. (1986), Valberg (1974)], según las cuales la percepción del test se desplaza alejándose de la posición del color del inductor. ATTD y ATD95 dan resultados similares, con diferencias apreciables entre las curvas de distintos p_{cb} sólo en la zona de las cortas λ_{db} . Las curvas de Hunt94 son parecidas a las de los otros dos modelos, aunque predicen diferencias apreciables entre distintos p_{cb} para todo el espectro.

8. Testeo del modelo

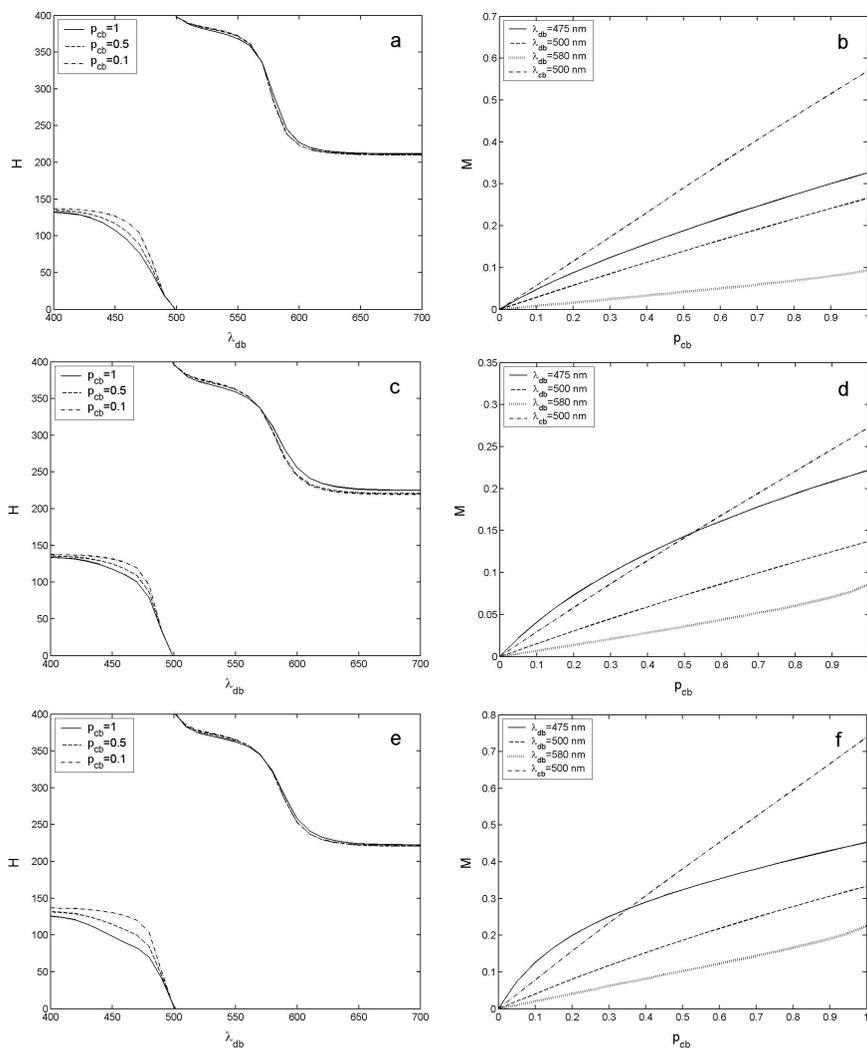


Figura 8.49. Predicciones de ATTD de tono percibido en función de la longitud de onda dominante del fondo, y de colorido del test en función de la pureza colorimétrica del fondo. a) y b) $Y_t=100$ cd/m^2 , $Y_b=10$ cd/m^2 ; c) y d) $Y_t=10$ cd/m^2 , $Y_b=10$ cd/m^2 ; e) y f) $Y_t=10$ cd/m^2 , $Y_b=100$ cd/m^2 .

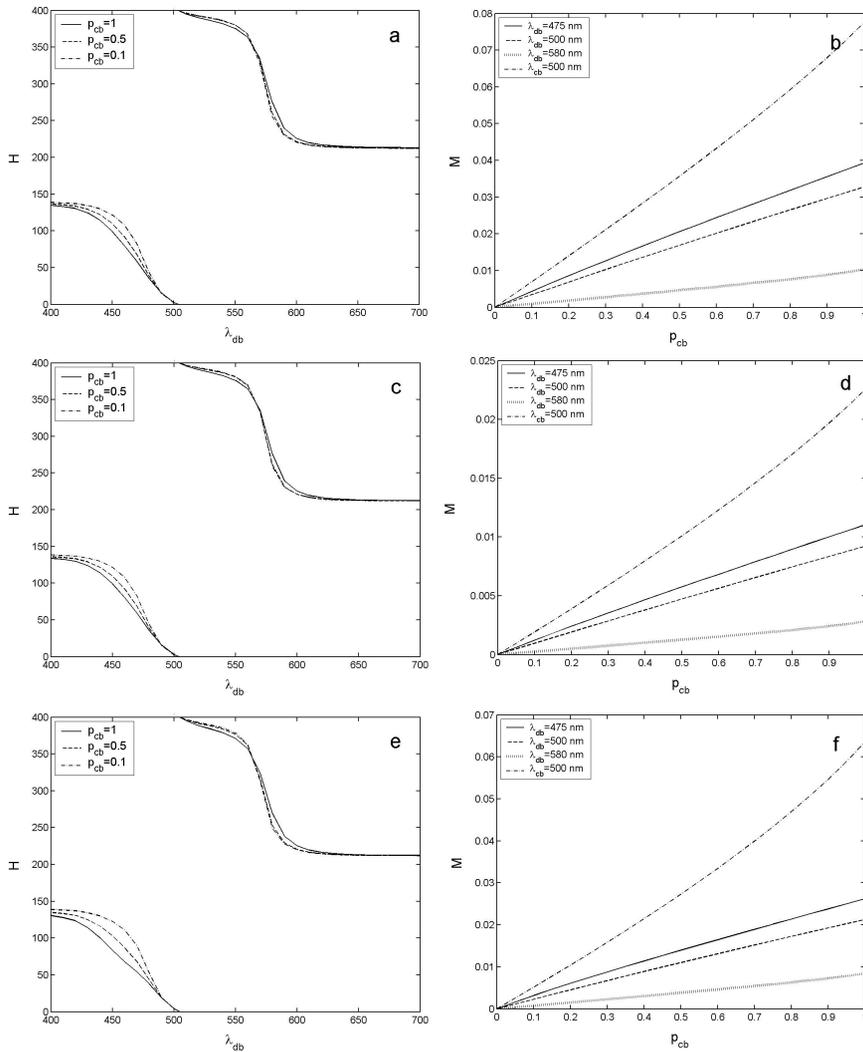


Figura 8.50. Predicciones de ATD95 de tono percibido de un test blanco en función de la longitud de onda dominante del fondo, y de colorido del test en función de la pureza colorimétrica del fondo. a) y b) $Y_i=100 \text{ cd/m}^2$, $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; c) y d) $Y_i=10 \text{ cd/m}^2$, $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; e) y f) $Y_i=10 \text{ cd/m}^2$, $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$.

8. Testeo del modelo

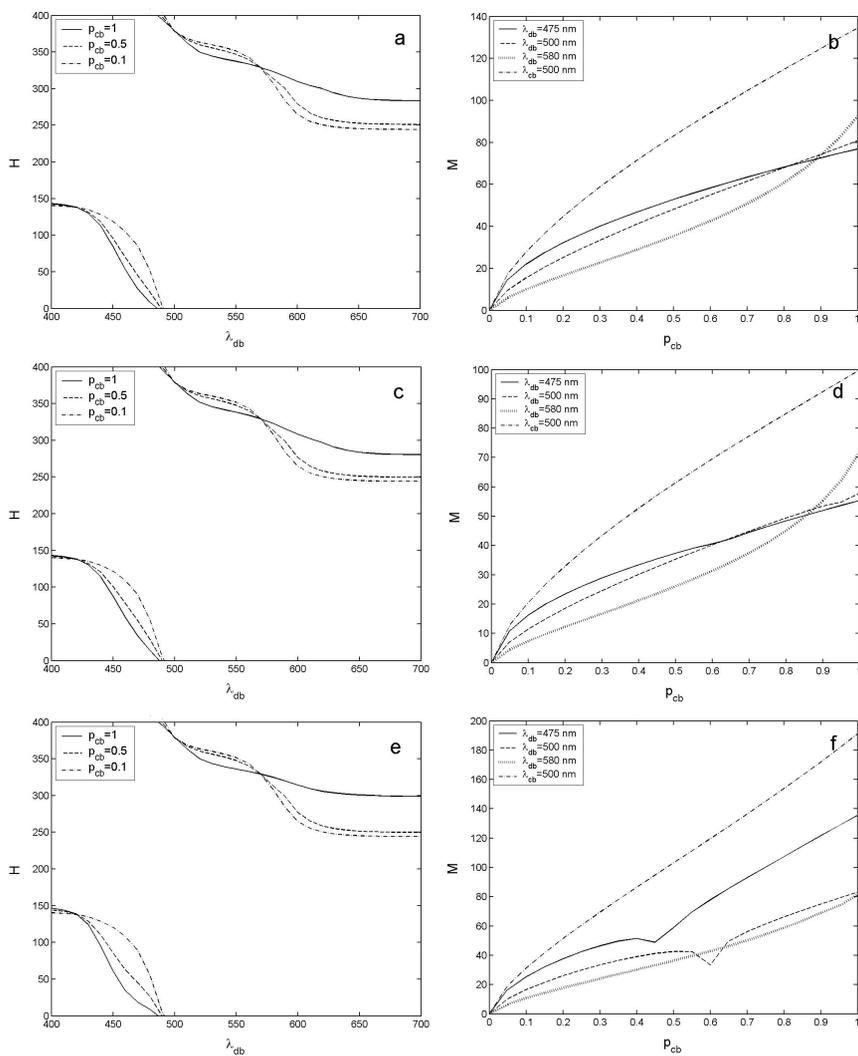


Figura 8.51. Predicciones de Hunt94 de tono percibido de un test blanco en función de la longitud de onda dominante del fondo, y de colorido del test en función de la pureza colorimétrica del fondo. a) y b) $Y_t=100 \text{ cd/m}^2$, $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; c) y d) $Y_t=10 \text{ cd/m}^2$, $Y_b=10 \text{ cd/m}^2$; e) y f) $Y_t=10 \text{ cd/m}^2$, $Y_b=100 \text{ cd/m}^2$.

Curvas de colorido inducido:

Al haber utilizado como test y también como origen de p_{cb} el blanco perceptual sobre fondo de su misma cromaticidad, todas las gráficas de M pasan por el (0,0) en los tres modelos. Son gráficas crecientes en los tres modelos, y por tanto los tres reproducen correctamente la tendencia observada experimentalmente, según la cual el colorido inducido aumenta a medida que el estímulo inductor se aproxima al locus espectral [Valberg (1974)]. Las curvas de ATTD, ligeramente convexas, presentan en las tres combinaciones de Y_i - Y_b , de mayor a menor valor de M , el orden azul-rojo-verde-amarillo para bajas p_{cb} , y rojo-azul-verde-amarillo para altas p_{cb} , cortándose por tanto las curvas de inductor azul y rojo (en el caso 100-10 lo hacen en una p_{cb} muy baja). ATD95 presenta, de mayor a menor pendiente, el orden rojo-azul-verde-amarillo; las curvas no se cortan entre sí y son ligeramente cóncavas. Las curvas de Hunt94 siguen también el orden rojo-azul-verde-amarillo, aunque algunas de ellas se cortan al llegar a altas p_{cb} ; son convexas (excepto la del amarillo a altas p_{cb}) y presentan un par de picos anómalos en el caso 10-100.

Se comprueba, por tanto, que nuestro modelo reproduce las características observadas en las curvas de inducción cromática de ATD95 y Hunt94: el tono percibido inducido en un test físicamente blanco es el complementario al del fondo inductor utilizado, y el colorido inducido aumenta a medida que crece la pureza colorimétrica del inductor.

8.4.2. Estímulo percibido acromático con fondos de color en función de las luminancias de fondo y test

Representamos para ATTD, ATD95 y Hunt la posición en el plano u' - v' del blanco perceptual (el estímulo que se percibe acromático, con colorido nulo) para distintos valores de luminancia del test ($Y_i=1, 10, 100, 1000 \text{ cd/m}^2$) y del fondo ($Y_b=0, 1, 10, 100 \text{ cd/m}^2$), en los casos de cromaticidades del fondo B y R (véase apartado 6.1.2.3). Estas posiciones se obtienen mediante un proceso de minimización del colorido, comprobando en cada caso que el valor final es nulo.

8. Testeo del modelo

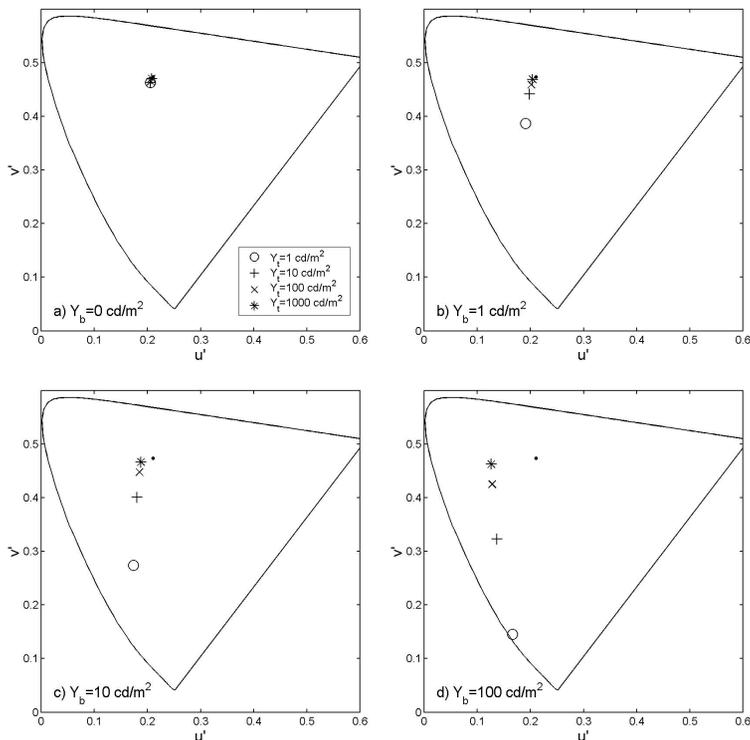


Figura 8.52. Predicciones de ATTD de la posición del blanco perceptual en el plano $u'v'$ para distintos valores de luminancia de test y fondo, en el caso de fondo de cromaticidad B. Indicamos con un punto la posición del blanco equienergético.

Previamente comprobamos que, como se demostró para ATTD, tanto en ATD95 como en Hunt la cromaticidad del blanco perceptual con fondo de su misma cromaticidad y con fondo equienergético es invariante para las combinaciones de las luminancias Y_t e Y_b consideradas, y coincide con el blanco equienergético.

Podemos ver cómo reproduce cada modelo las características observadas experimentalmente por Werner y Walraven [Werner y Walraven (1982)]. Estos autores demostraron que, con fondos de

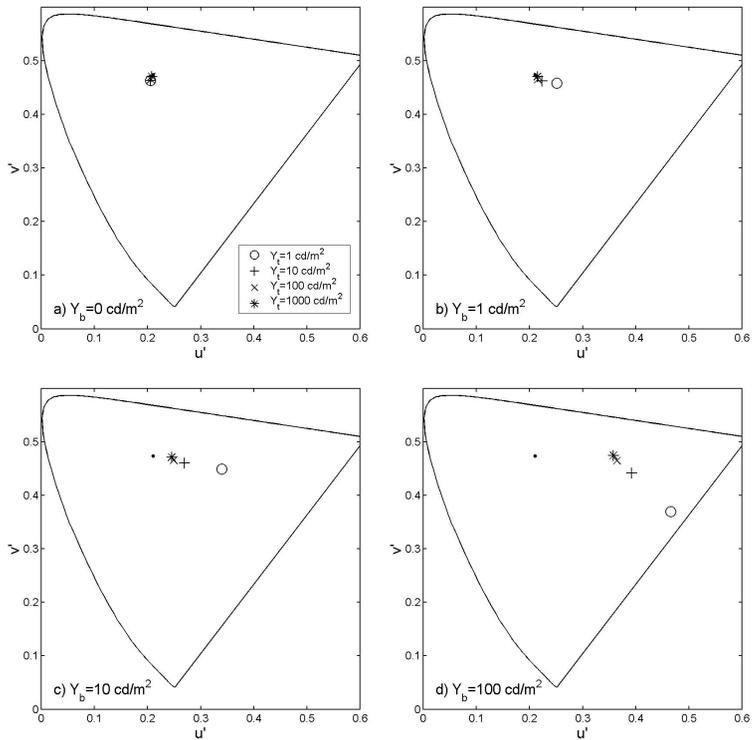


Figura 8.53. Posiciones del blanco perceptual calculadas con ATTD para fondo R.

colores, el desplazamiento del blanco perceptual es hacia la λ del fondo, desde la posición del blanco perceptual con fondo negro, y que es directamente proporcional a Y_b e inversamente proporcional al contraste test-fondo (y por tanto, inversamente proporcional a Y_t).

En ATTD los desplazamientos en $u'v'$ se producen hacia abajo con fondo azul (figura 8.52) y hacia la derecha con fondo rojo (figura 8.53), y son mayores para valores altos de Y_b . Por otra parte, la posición del blanco perceptual conforme aumenta Y_t va tendiendo al blanco equienergético en todos los casos excepto en el de $Y_b=100$ cd/m^2 , en el cual tiende a un punto ligeramente a la izquierda para fondo B y ligeramente hacia arriba para fondo R. ATTD, por tanto, reproduce bien las conclusiones del estudio de Werner y Walraven.

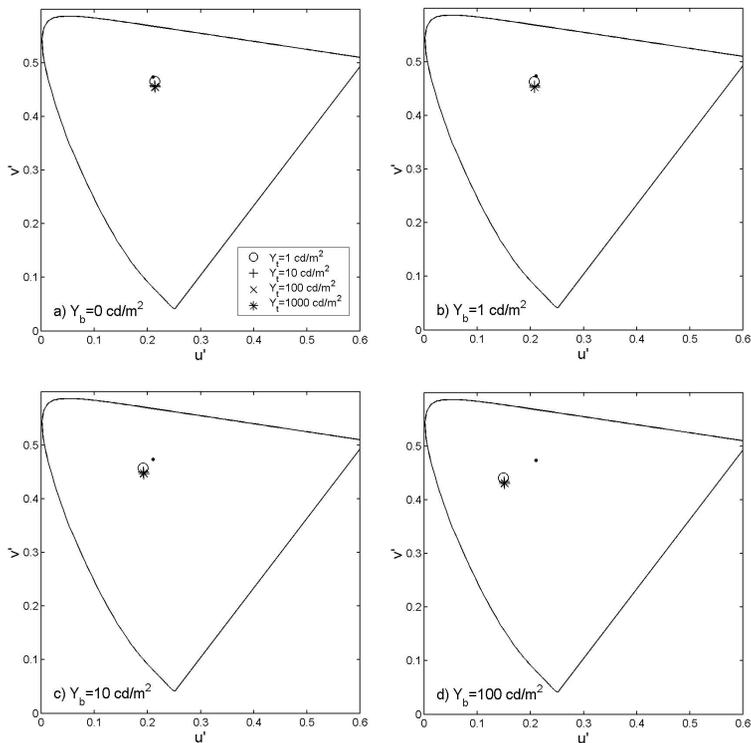


Figura 8.54. Posiciones del blanco perceptual calculadas con ATD95 para fondo B.

En ATD95, para fondo B (figura 8.54), se produce un desplazamiento hacia abajo y hacia la izquierda en $u'v'$, tanto mayor cuanto mayor es Y_b , independientemente del valor de Y_t . Para fondo R (figura 8.55) pasa exactamente lo mismo, pero el desplazamiento se produce hacia la derecha. Por tanto, el modelo predice bien la dependencia en Y_b , pero no la dependencia inversa en Y_t . Además, la longitud de los desplazamientos es bastante menor que en ATTD.

El modelo de Hunt con fondos cromáticos también reproduce cualitativamente los resultados de Werner y Walraven, con desplazamientos respecto al blanco perceptual (de fondo nulo) hacia abajo con fondo azul (figura 8.56) y hacia la derecha con fondo rojo

(figura 8.57). Estos desplazamientos son mayores que los observados en ATTD, con la particularidad de que en los casos en que $Y_t=Y_b$ el estímulo percibido blanco se encuentra en el punto correspondiente a la cromaticidad del fondo; este comportamiento es consistente con la elección de $p=-1$ (contraste simultáneo máximo) en los parámetros de entrada de Hunt94. Sin embargo, los puntos asociados a casos en los que $Y_t < Y_b$ no corresponden a colores reales, cuando deberían estar también situados en el locus espectral o en la recta de los púrpuras, como en el caso $Y_t=Y_b$.

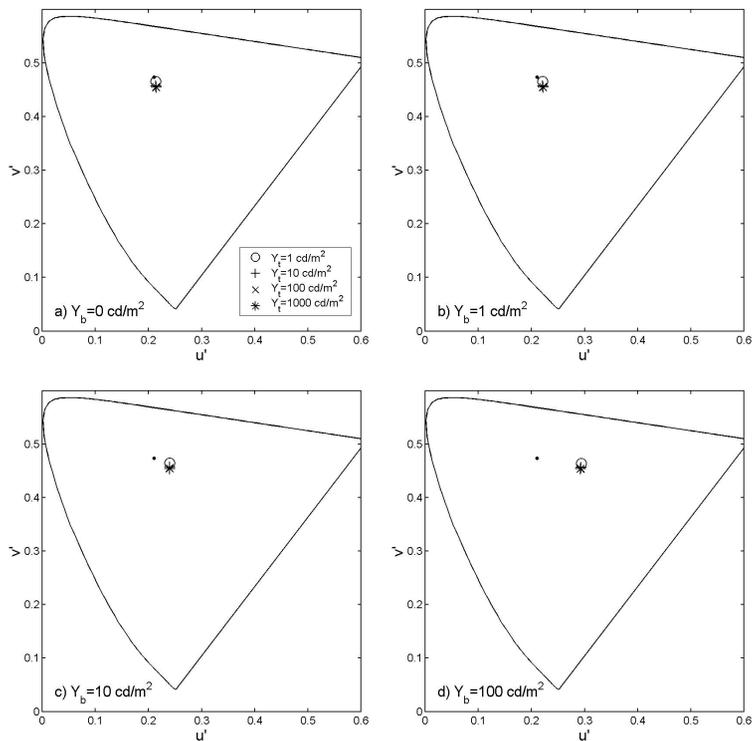


Figura 8.55. Posiciones del blanco perceptual calculadas con ATD95 para fondo R.

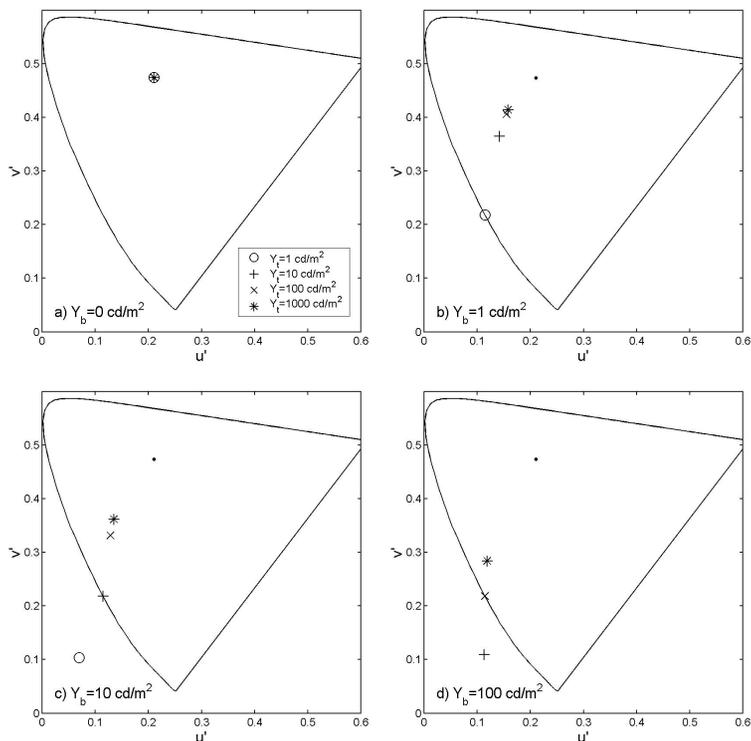


Figura 8.56. Posiciones del blanco perceptual calculadas con Hunt para fondo B. Los cálculos de la figura a) se han realizado con Hunt91u.

Podemos concluir que tanto ATTD como Hunt reproducen las observaciones de Werner y Walraven sobre el locus acromático, con un desplazamiento del blanco perceptual hacia la λ del fondo, de amplitud directamente proporcional a Y_b e inversamente proporcional a Y_t . Hunt considera un descuento total del fondo y sin embargo ATTD supone un grado intermedio de inducción cromática, que le viene impuesto por los valores seleccionados para sus distintos parámetros, en especial las constantes sustractivas de los canales oponentes, del 11% y el 23%. Las predicciones de ATTD en cuanto a inducción cromática suponen una de las principales ventajas de nuestro modelo sobre ATD95.

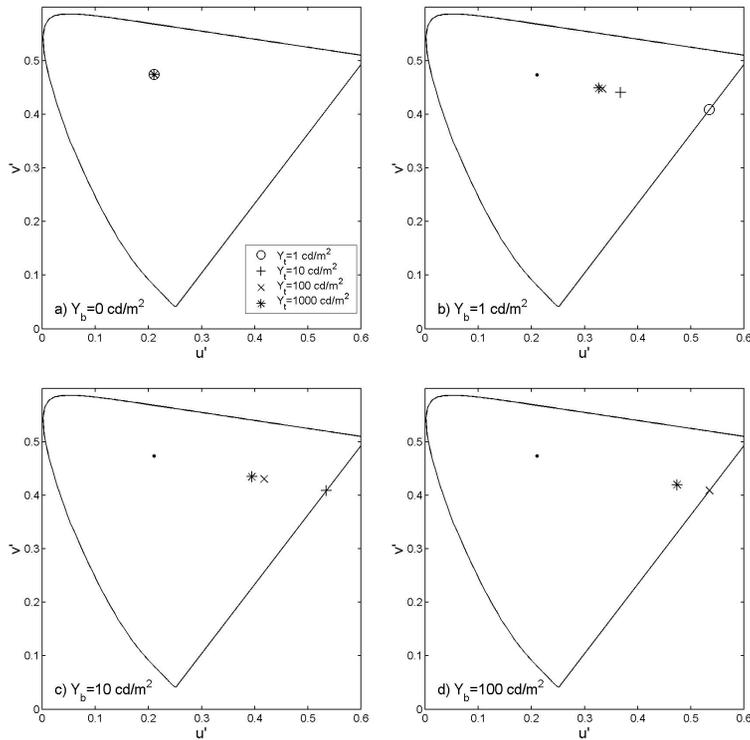


Figura 8.57. Posiciones del blanco perceptual calculadas con Hunt para fondo R . Los cálculos de la figura a) se han realizado con Hunt91u.

8.5. Umbrales de detección y discriminación

Vamos a comprobar si ATTD puede reproducir datos experimentales de sensibilidades espectrales en los casos de umbral absoluto (detección) y umbral incremental sobre un pedestal blanco (discriminación). Para ello realizaremos una nueva minimización de un coeficiente de ajuste entre unos datos de referencia y las predicciones del modelo. Este coeficiente variará en función del valor de dos nuevos parámetros: la distancia perceptual umbral δ en el espacio $ATTD_{LGN}$ y una constante de normalización c_n para las curvas de sensibilidad, ambos definidos positivos. Escogeremos los valores de los parámetros asociados al coeficiente de ajuste mínimo.

Una serie de pruebas preliminares demostraron que un modelo de detección de pico funcionaba mejor que un modelo de interacción vectorial entre mecanismos, además de ser más plausible en términos fisiológicos. En este modelo de detección de pico suponemos que la detección ocurre cuando uno cualquiera de los mecanismos, obviamente el más sensible para la λ considerada, alcanza el umbral δ , que consideraremos de igual valor para los cuatro mecanismos.

Predicciones del modelo:

En cada iteración de la minimización principal, con una δ y una c_n fijas, calculamos las predicciones de nuestro modelo haciendo una minimización secundaria para cada λ , de 5 en 5, desde 400 nm hasta 700 nm, cuyos pasos explicaremos a continuación. Primero calculamos las $ATTD_{LGNb}$ del pedestal, cuya luminancia Y_b será de 0 cd/m^2 en el caso del umbral absoluto y de 151.67 cd/m^2 (1000 td) en el caso del umbral incremental. Después calculamos las $ATTD_{LGNt}(\lambda)$ de un test $XYZ_t(\lambda)$ obtenido sumando al pedestal un incremento monocromático de longitud de onda λ y luminancia $Y(\lambda)$, considerando por ahora libre el valor de $Y(\lambda)$:

$$\begin{pmatrix} X_t(\lambda) \\ Y_t(\lambda) \\ Z_t(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{pmatrix} + \frac{Y(\lambda)}{y(\lambda)} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (8.15)$$

Suponemos que el pedestal actúa como fondo y como adaptador para los cálculos de las $ATTD_{LGN}$ de pedestal y test, tanto en el umbral incremental como en el absoluto. Calculamos los cuatro incrementos ($\Delta A_{LGN}(\lambda), \Delta T_{LM}(\lambda), \Delta T_{ML}(\lambda), \Delta D_{LGN}(\lambda)$) y los sometemos a un proceso de rectificación, anulando las partes negativas.

A continuación buscamos mediante iteraciones sucesivas la $Y(\lambda)$ óptima, definida positiva, para la que el máximo de las respuestas de los cuatro mecanismos alcanza el valor δ . Considerando el conjunto de todas las longitudes de onda, este procedimiento es equivalente a

utilizar la envolvente de las cuatro curvas de los mecanismos. La función a minimizar para cada λ es:

$$f(\lambda) = |\max(\Delta A_{LGN}(\lambda), \Delta T_{LM}(\lambda), \Delta T_{ML}(\lambda), \Delta D_{LGN}(\lambda)) - \delta| \quad (8.16)$$

La luminancia óptima $Y_{opt}(\lambda)$ obtenida es convertida a energía en watos, y de watos a número de fotones, dividiendo por la energía hc/λ de un fotón. Tanto la curva $S(\lambda)$ del modelo como la $S_{ref}(\lambda)$ de referencia serán sensibilidades en número de fotones, siendo la sensibilidad la inversa de la energía umbral:

$$S(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot \frac{K_m \cdot V(\lambda)}{Y_{opt}(\lambda)} = 6'626 \cdot 3 \cdot 683 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{V(\lambda)}{\lambda(\text{nm}) \cdot Y_{opt}(\lambda)} \quad (8.17)$$

La minimización principal consiste en encontrar la δ y la c_n que aproximan al máximo las curvas de sensibilidad espectral a las de referencia, minimizando el coeficiente de ajuste:

$$CA = \frac{CA_{abs} + CA_{inc}}{2} \quad (8.18)$$

donde:

$$CA_{abs} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{\lambda} (S_{ref_abs}(\lambda) - c_n \cdot S_{abs}(\lambda))^2}{n_p}}}{\sqrt{\frac{\sum_{\lambda} S_{ref_abs}(\lambda)^2}{n_p}}} \quad (8.19)$$

y donde CA_{inc} se obtiene de forma análoga a CA_{abs} . La variable n_p es el número de longitudes de onda consideradas en los sumatorios. Se utilizan los mismos valores de δ y c_n para el cálculo de CA_{abs} y CA_{inc} . Cada CA parcial es una desviación cuadrática promedio de la sensibilidad calculada respecto a la de referencia. Dividimos por el promedio de los valores de referencia para que ambos CA parciales sean equiparables.

Datos de referencia:

Utilizamos como referencia para el umbral absoluto, $S_{\text{ref_abs}}(\lambda)$, la sensibilidad promedio de umbral absoluto de la CIE [CIE (1978)] expresada en número de fotones.

Como referencia $S_{\text{ref_inc}}(\lambda)$ para el umbral incremental utilizamos la curva con la que Kranda y King-Smith ajustaron los datos experimentales de discriminación de un test de 1° visto sobre un pedestal blanco de 10° y 1000 td [Kranda y King-Smith (1979)]. Para la obtención de esta curva los autores partieron de los fundamentales LMS de Vos y Walraven [Vos y Walraven (1971)] expresados en número de fotones y normalizados a uno en sus máximos, realizando las siguientes operaciones para obtener los mecanismos equivalentes a los utilizados en ATTD:

$$\bar{A}(\lambda) = 687 \cdot L(\lambda) + 356 \cdot M(\lambda) \quad (8.20)$$

$$\bar{T}_{\text{LM}}(\lambda) = 3709 \cdot L(\lambda) - 4306 \cdot M(\lambda) \quad (8.21)$$

$$\bar{T}_{\text{ML}}(\lambda) = 2990 \cdot M(\lambda) - 2182 \cdot L(\lambda) \quad (8.22)$$

$$\bar{D}(\lambda) = 1589 \cdot S(\lambda) \quad (8.23)$$

Se utilizaron canales L-M y M-L asimétricos, como en nuestro modelo. La envolvente de estos cuatro mecanismos nos proporciona la curva de referencia, de la que decimos que es tripico porque presenta tres máximos locales.

Usamos los datos de Kalloniatis y Harwerth [Kalloniatis y Harwerth (1990)] para reescalar las dos curvas de referencia de forma que su diferencia de altura sea consistente con los datos experimentales. Según estos datos, hay dos órdenes de magnitud de diferencia entre las dos curvas de sensibilidad expresadas en número de fotones. Trabajando en una escala logarítmica decimal, el umbral absoluto alcanza el valor -4.7 y el incremental -6.5. Valores similares a éstos han sido obtenidos en otros estudios [King-Smith y Carden (1976)]. Por tanto, renormalizamos $S_{\text{ref_abs}}(\lambda)$ a $10^{-4.7}$ y $S_{\text{ref_inc}}(\lambda)$ a $10^{-6.5}$.

Resultados y conclusiones:

La minimización dio como resultado una δ óptima de 0.6 y una c_n óptima de 10^{11} . El CA mínimo fue del 38.31%, con unos valores finales para CA_{abs} y CA_{inc} de 33.45% y 43.17%, respectivamente.

Representamos gráficamente los resultados obtenidos, incluyendo las curvas asociadas a los distintos mecanismos, cuya envolvente constituye la predicción del modelo. Para la obtención de la curva de un mecanismo determinado, por ejemplo $A_{\text{LGN}}(\lambda)$, basta con encontrar para cada λ la $Y_{\text{opt}}(\lambda)$ que minimiza la siguiente función:

$$f'(\lambda) = \left| \Delta A_{\text{LGN}}(\lambda) - \delta_{\text{opt}} \right| \quad (8.24)$$

La curva de $S_{\text{abs}}(\lambda)$ (figura 8.58) debería ser monopico, pero es ligeramente tripico. La envolvente se debe a A_{LGN} en todo el espectro excepto en los extremos de las cortas longitudes de onda, donde actúa D_{LGN} , y las largas longitudes de onda, donde actúa T_{LM} . Esta contribución de los distintos mecanismos a la envolvente es

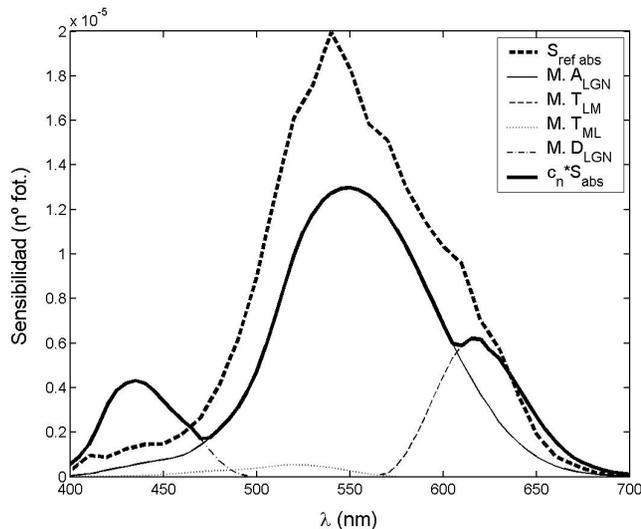


Figura 8.58. Sensibilidad espectral de umbral absoluto (en número de fotones).

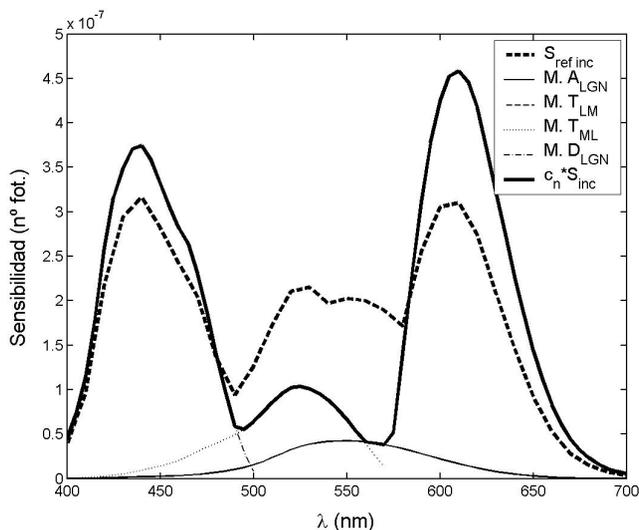


Figura 8.59. Sensibilidad espectral de umbral incremental sobre un pedestal blanco de 1000 trolands (en número de fotones).

consistente con el hecho comprobado de que en los extremos del espectro los estímulos se detectan con color azul o rojo [Kalloniatis y Harwerth (1990)]. Sin embargo el lóbulo de D_{LGN} , con un máximo local bien apreciable en 435 nm, es demasiado alto. El pequeño máximo local que genera T_{LM} en torno a los 620 nm no supone una desviación excesiva con respecto a los datos experimentales. En cuanto al mecanismo principal en este caso, A_{LGN} , el máximo de la curva para el modelo aparece a 550 nm, mientras que el de la referencia está en 540 nm.

La curva de $S_{inc}(\lambda)$ (figura 8.59) es tripico, con un lóbulo de D_{LGN} de altura bien ajustada, un lóbulo de T_{ML} más bajo que el de referencia y un lóbulo de T_{LM} más alto que el de referencia. El mecanismo A_{LGN} queda por debajo de los demás y sólo contribuye a la envolvente en una región en torno a los 570 nm, reproduciendo el Notch de Sloan en el que la discriminación se realiza sin reconocimiento del color del test. Aunque nuestra región de Sloan es más pequeña que la de la curva de referencia, los mecanismos que

forman la envolvente son los adecuados. En cuanto a las longitudes de onda de los máximos locales, para el mecanismo D_{LGN} coinciden modelo y referencia en 440 nm; para el T_{ML} , el modelo toma un máximo en 525 nm y la referencia en 530 nm; y para el mecanismo T_{LM} , ambas curvas tienen el máximo en 610 nm.

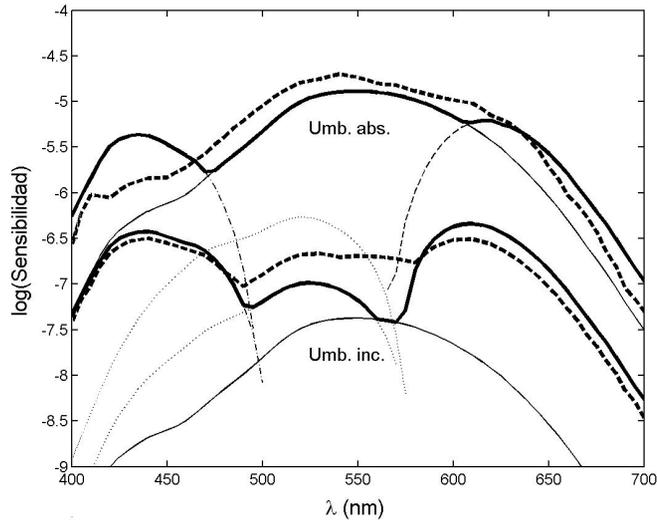


Figura 8.60. Sensibilidad espectral de los umbrales absoluto e incremental (en número de fotones y en escala logarítmica).

Por otra parte, las dos curvas predichas por ATTD están casi a la misma altura que las correspondientes curvas de referencia. Conseguimos pues la diferencia de órdenes de magnitud correcta entre las sensibilidades absoluta e incremental usando una misma constante de escalado $c_n=10^{11}$ para ambas, lo cual es un aspecto positivo del modelo a destacar. La figura 8.60 muestra simultáneamente todas las curvas a escala logarítmica. Vemos que la variación de las alturas relativas de los distintos mecanismos es lo que hace que cambie la forma de la envolvente al usar un pedestal diferente.

Vemos, por tanto, que nuestro modelo no sólo es capaz de predecir aceptablemente una serie de fenómenos de apariencia del color, sino que además puede reproducir, sin modificación de sus parámetros, datos de sensibilidades espectrales de detección y discriminación. Aunque los coeficientes de ajuste resultantes son altos y la curva de detección predicha es ligeramente tripico, ATTD reproduce correctamente la contribución a la envolvente de los distintos mecanismos en cada región del espectro (sin necesidad de constantes de ajuste distintas para cada mecanismo) y también la diferencia de órdenes de magnitud entre las curvas absoluta e incremental (sin necesidad de constantes distintas para cada luminancia del pedestal).

Capítulo 9. Conclusiones

Presentamos a continuación un resumen de las principales conclusiones obtenidas en la presente memoria, agrupadas por temas.

Valores óptimos de los parámetros

-ATTD consigue un buen ajuste de los datos empleados en el conjunto de entrenamiento, con coeficientes de ajuste totales del 13%, valor que podemos considerar satisfactorio.

-Los valores encontrados para los elementos de la matriz M_{V1} respaldan nuestra propuesta de considerar la A_{V1} pre-adaptación sustractiva como una señal Tipo III de sólo centro.

-Los valores encontrados para los elementos de la matriz M_P han permitido que nuestro modelo reproduzca la reemergencia del rojo en las cortas longitudes de onda del canal T_P por interacción de las señales T y D de la etapa previa, y la ausencia de cambios significativos en la forma de $D(\lambda)$ entre el LGN y el córtex.

Estabilidad del modelo

-El canal acromático no cambia apreciablemente su forma al usar fondos de color y tampoco se deforma para energías un orden de magnitud por encima o por debajo de la utilizada en la fase de entrenamiento.

-El blanco perceptual coincide con el blanco equienergético en el caso de fondo oscuro, y su posición no varía ni con la luminancia del propio blanco perceptual ni con la de un fondo de igual cromaticidad.

-Sin embargo, parece haber una descompensación de las contribuciones de los canales oponentes a altas luminancias del test que, a pesar de no afectar a la posición del blanco perceptual, da lugar a deformaciones en los loci de luminosidad constante y de colorido constante.

Predicciones sobre la luminosidad

-La luminosidad espectral a luminancia constante se ajusta a los datos de referencia peor que la de ATD95, y la forma del espectro de acción para Q es incorrecta.

-A pesar de ello, ATTD da las mejores predicciones de la Ley de Stevens y, a diferencia del modelo de Hunt, reproduce el efecto Helmholtz-Kohlrausch.

-Nuestro modelo reproduce también, al menos de forma cualitativa, el efecto de inducción acromática.

Predicciones sobre el tono

-Los loci de tono constante son bastante equidistantes angularmente en $u'v'$, y la mayoría están curvados en las direcciones indicadas por la bibliografía, con lo que el modelo reproduce el efecto Aubert-Abney.

-Los tonos únicos rojo y verde son rectos pero colineales, lo cual no es compatible con los datos experimentales. Sin embargo, los tonos únicos azul y amarillo sí se ajustan a dichos datos, determinando una sola línea ligeramente curva.

-ATTD predice el efecto Bezold-Brücke, aunque no con tanta precisión como ATD95.

Predicciones sobre el colorido y la saturación

-Las predicciones en cuanto a la variación del colorido con la cromaticidad del test son correctas para los tres modelos.

-ATTD predice el efecto Hunt, pero no los máximos locales de colorido para ciertas luminancias.

-Nuestro modelo tiende a mantener la saturación aproximadamente constante al variar la luminancia, requisito que no cumple el modelo de Hunt.

Uniformidad del plano perceptual

-Tanto ATTD como ATD95 y Hunt94 proporcionan una distribución razonablemente uniforme de las muestras Munsell en sus respectivos planos perceptuales.

-Comparado con los otros dos, nuestro modelo genera loci de croma Munsell constante más parecidos a una circunferencia perfecta, y con los distintos tonos más equidistantes dentro de cada anillo de croma, aunque su distribución de los distintos anillos no es la más uniforme.

Adaptación cromática

-ATTD reproduce cualitativamente los cambios en la forma de los canales cromáticos de Jameson y Hurvich al utilizar fondos de color.

-La adaptación multiplicativa de receptores reproduce la ley de los coeficientes de Von Kries.

-Según nuestro modelo, el tono percibido inducido en un test físicamente blanco es el complementario al del fondo inductor utilizado, y el colorido inducido aumenta al crecer la pureza colorimétrica del inductor.

-También se reproducen las observaciones sobre el locus acromático, con un desplazamiento del blanco perceptual hacia la λ del fondo inductor de amplitud directamente proporcional a Y_b e inversamente proporcional a Y_t . Esto supone una importante ventaja de ATTD sobre ATD95.

Umbrales

-Aunque la curva de detección predicha no es completamente monopico, se reproducen correctamente las contribuciones a la envolvente $S_{abs}(\lambda)$ en las diferentes regiones del espectro sin necesidad de constantes de ajuste distintas para cada mecanismo.

-La curva $S_{inc}(\lambda)$ es tripico, de acuerdo con los datos experimentales, y los mecanismos que forman la envolvente también son los adecuados en este caso.

-Conseguimos reproducir la diferencia de órdenes de magnitud correcta entre las sensibilidades absoluta e incremental sin necesidad de constantes distintas para cada luminancia del pedestal.

En conclusión, podemos afirmar que, si bien no tiene las prestaciones de un modelo de apariencia, ATTD es un modelo de visión del color profundamente basado en la fisiología del sistema visual que proporciona buenas predicciones de una cantidad considerable de fenómenos psicofísicos, incluyendo datos de sensibilidades espectrales de detección y discriminación. Estas prestaciones se han conseguido, además, con una estructura más sencilla que la de un modelo de apariencia, lo que confiere a ATTD una rapidez de cálculo mayor a nivel computacional. Y lo que es más importante: se han conseguido con un conjunto de datos de entrenamiento relativamente reducido. El gran potencial del modelo no reside, por tanto, en la fase de selección de los valores para sus parámetros, sino en la estructura en sí, lo cual es un rasgo positivo. Por todas estas razones, pensamos que ATTD constituye una potente herramienta de trabajo para la investigación en el campo de la percepción del color.

Capítulo 10. Perspectivas

Mucho ha sido el trabajo realizado hasta la presentación de esta tesis doctoral, pero igualmente amplio es el campo a explorar a partir de los resultados obtenidos. Entre las conclusiones obtenidas hay algunas que apuntan a la necesidad de mejoras en el modelo ATTD, tanto a nivel de su estructura básica como a nivel de los datos a incluir en el conjunto de entrenamiento de sus parámetros.

Uno de los errores más apreciables del modelo son los loci asociados a valores constantes de los descriptores perceptuales en un plano equiluminante, que aparecen deformados a $Y_t=100 \text{ cd/m}^2$, y sobre todo a 1000 cd/m^2 . Las deformaciones parecen debidas al desequilibrio entre las respuestas de los canales perceptuales oponentes en dichas luminancias. Hemos entrenado el modelo con curvas de dichos canales sólo para la energía $10E_0$, de forma que esta inestabilidad tal vez se corregiría añadiendo en el conjunto de entrenamiento datos de energías mayores relativos no sólo al blanco perceptual, determinado indirectamente por los puntos neutros de los canales oponentes, sino también relativos a dichos canales completos. Otra posible mejora en este sentido consistiría en incluir datos referentes a los púrpuras en el conjunto de referencia.

En cuanto a los mecanismos de adaptación cromática, sería altamente recomendable usar una función de distribución de pesos sigmoide en el control de ganancia de los conos. Para la determinación de los valores de los dos parámetros asociados a dicha función sería necesario encontrar unos datos experimentales apropiados para incorporarlos al conjunto de entrenamiento. Podemos también intentar simular con el modelo distintos grados de inducción cromática, cambiando la manera de entender las constantes

sustractivas de los canales oponentes, K_T y K_D , de forma que puedan aumentar o disminuir su valor en función del estado de adaptación.

En la presente memoria no hemos considerado mecanismos multiplicativos o no linealidades en el córtex. Sin embargo, sabemos que al menos las células complejas responden de manera no lineal y, por otra parte, es probable que los fenómenos de habituación (adaptación temporal) tengan soporte fisiológico en algún mecanismo multiplicativo del córtex, dado que recientemente se ha probado que las células del LGN no se habitúan. Todo esto nos invita a introducir este tipo de elementos en el modelo.

Hemos visto que algunos resultados obtenidos tanto en la fase de entrenamiento como en la de testeo animan a introducir algún refinamiento, tal vez en el canal acromático Parvo del modelo, para mejorar las predicciones sobre la luminosidad. También parece necesario seguir investigando el problema de la dualidad ángulo de tono-cuadratura de tono, así como la posible rectificación de los canales cromáticos perceptuales con posterior diferenciación de los cuatro mecanismos azul, verde, amarillo y rojo resultantes, a fin de reproducir correctamente las observaciones de Burns et al. sobre los tonos únicos.

Se ha comprobado que el modelo ATTD, además de predecir datos de apariencia del color, reproduce satisfactoriamente las características básicas de unas curvas de umbrales. A pesar de ello, el conjunto de testeo para este ítem era muy reducido, por lo que no podemos asegurar un buen funcionamiento de ATTD a la hora de calcular otras diferencias de color. Supone, por tanto, un objetivo ambicioso el incluir en el conjunto de entrenamiento un conjunto más exhaustivo de datos sobre discriminación en el plano isoluminante.

Para terminar, hemos dicho que ATTD es un modelo de colores no relacionados en el sentido de que no utiliza una referencia blanca ni calcula claridades o cromas. En futuras versiones del modelo se podrían proponer expresiones para la claridad J y el croma C en función de los ATD_P del test y los ATD_{P_w} de un blanco de referencia visto sobre el mismo fondo, de acuerdo con las definiciones de la CIE

de dichos descriptores (ver apéndice C). Incluyendo datos experimentales de estimación de claridades y cromas en el conjunto de entrenamiento conseguiríamos extender el uso de ATTD a colores relacionados.

Apéndice A. El modelo de visión del color ATD95

Estructura del modelo:

ATD95 es una versión mejorada del modelo de visión del color CA90 [Guth (1991, 1992, 1993, 1994a, 1994b)] propuesta por Sherman Lee Guth en 1995 [Guth (1995)]. Consta de una primera etapa a nivel de conos y dos etapas oponentes. Pasaremos a continuación a describir sus etapas.

Inicialmente el estímulo está caracterizado por sus valores triestímulo absolutos en el espacio XYZ de 1931 de la CIE, con las modificaciones de Judd y de Vos, y escalados para que Y coincida con la iluminación retiniana en trolands. Se aplica una transformación lineal a XYZ para convertirlos en una señal LMS en el espacio de conos. La sensibilidad espectral de los canales de longitudes de onda largas (L), medias (M) y cortas (S) es la de los fundamentales de Smith y Pokorny normalizados a la unidad, con un escalado según los factores $W_L=0.66$, $W_M=1$ y $W_S=0.43$. Las LMS escaladas son pasadas a través de una no linealidad de tipo potencial con exponente $n=0.7$ [Valeton y Van Norren (1983), Boynton y Whitten (1970)], y al resultado se le suman unas señales de ruido de los fotorreceptores $N_L=0.024$, $N_M=0.036$ y $N_S=0.31$. Después se someten las señales a un control de ganancia que depende del estímulo de adaptación LMS_a (combinación de fondo y test con pesos p_b y p_t), y que actúa de la siguiente forma:

$$LMS = LMS \cdot \frac{\gamma}{\gamma + LMS_a} \quad (A.1)$$

con $\gamma=300$. LMS se recombinan mediante una transformación matricial dada por M_1 , originando una señal acromática (A_{10} , combinación aditiva de L y M) y dos señales oponentes de primera etapa: la rojo-verde (T_{10} , combinación sustractiva de L y M) y la azul-amarillo (D_{10} , del tipo -L+M+S):

$$\begin{pmatrix} A_{10} \\ T_{10} \\ D_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.57 & 2.64 & 0 \\ 7.18 & -6.21 & 0 \\ -0.70 & 0.085 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Las salidas de estos canales pasan a través de una no linealidad compresiva de tipo Naka-Rushton [Naka y Rushton (1966)]:

$$\text{ATD}_1 = \frac{\text{ATD}_{10}}{\sigma + |\text{ATD}_{10}|} \quad (\text{A.3})$$

con $\sigma=200$. En la figura A.1 se muestran las sensibilidades espectrales de estos canales de primera etapa oponente.

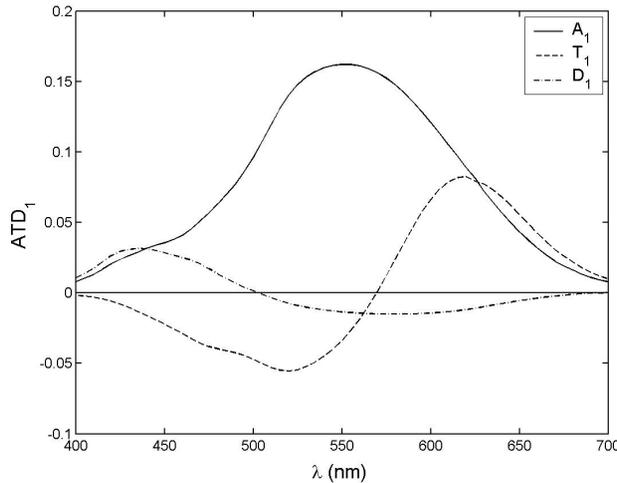


Figura A.1. Sensibilidades espectrales $\text{ATD}_1(\lambda)$ de 1ª etapa oponente de ATD95.

La distancia perceptual d entre dos estímulos cromáticos, para diferencias de color pequeñas, y la luminosidad Q se obtienen de las señales resultantes como sigue:

$$d = \sqrt{\Delta^2 A_1 + \Delta^2 T_1 + \Delta^2 D_1} \quad (\text{A.4})$$

$$Q = \sqrt{A_1^2 + T_1^2 + D_1^2} \quad (\text{A.5})$$

Las salidas A_{10} , T_{10} y D_{10} sin comprimir se recombinan matricialmente según M_2 para dar una nueva señal acromática (A_{20} , que tan sólo es A_{10} reescalada) y dos oponentes de segunda etapa (T_{20} , combinación aditiva de T_{10} y D_{10} ; y D_{20} , igual a D_{10}):

$$\begin{pmatrix} A_{20} \\ T_{20} \\ D_{20} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.09 & 0 & 0 \\ 0 & 0.43 & 0.76 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{10} \\ T_{10} \\ D_{10} \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

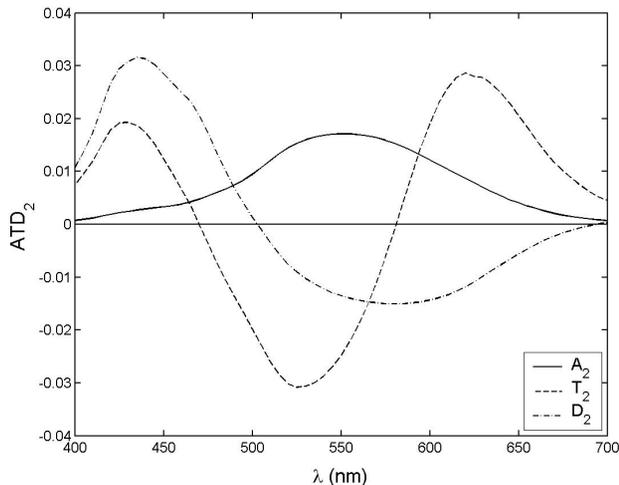


Figura A.2. Sensibilidades espectrales $ATD_2(\lambda)$ de 2ª etapa oponente de ATD95.

Estas señales pasan por una no linealidad compresiva como la de la etapa anterior para dar como resultado A_2 , T_2 y D_2 , que median las diferencias de color grandes y la apariencia del color. En la figura A.2 se muestran las sensibilidades espectrales de estos canales de segunda etapa oponente.

El tono H y la saturación s fueron definidos por Guth de la siguiente forma:

$$H = \frac{T_2}{D_2} \quad (\text{A.7})$$

$$s = \frac{\sqrt{T_2^2 + D_2^2}}{A_2} \quad (\text{A.8})$$

El modelo ATD95 predice, con una estructura relativamente simple, efectos de adaptación cromática, de igualación de luminosidad heterocromática (efecto Helmholtz-Kohlrausch), el efecto Bezold-Brücke, el efecto Abney, el efecto Hunt y diversos experimentos de discriminación cromática y umbrales. En la figura A.3 se muestra un esquema con la estructura de ATD95.

Comparación de ATD95 con ATTD:

Algunas de las características de la estructura de ATTD están inspiradas en el modelo de Guth, de forma que resulta sencillo comparar las predicciones de ambos. Para poder comparar los descriptores perceptuales, modificaremos la definición del tono de ATD95 introduciendo un arcotangente, cambiando la polaridad de D_2 y haciendo el paso a grados centesimales:

$$H = \frac{10}{9} \cdot \text{arctg}\left(\frac{-D_2}{T_2}\right) \quad (\text{A.9})$$

Teniendo en cuenta las definiciones de la CIE para la saturación y el colorido, podemos definir una M para ATD95 a partir del numerador de la saturación:

$$M = \sqrt{T_2^2 + D_2^2} \quad (\text{A.10})$$

Por último, a no ser que se diga lo contrario, supondremos, a efectos de comparación con ATTD, que la adaptación multiplicativa de receptores de ATD95 está gobernada por el fondo incluso en el caso de fondo nulo.

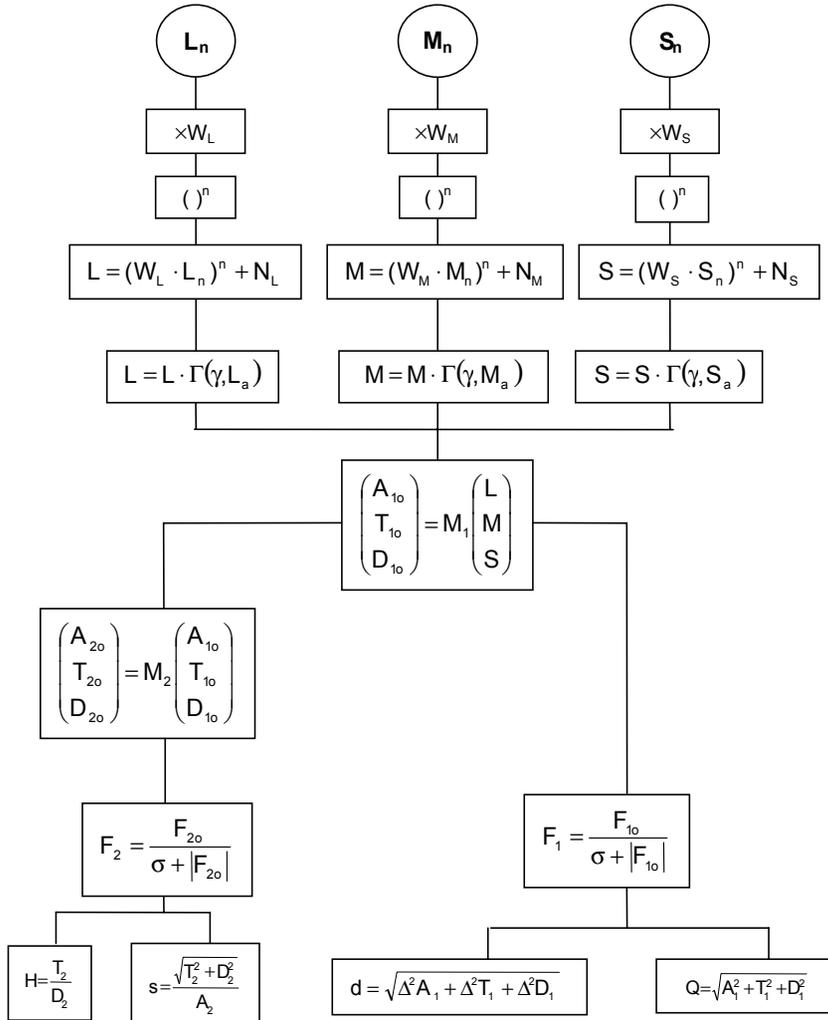


Figura A.3. Estructura del modelo ATD95 de Guth.

Apéndice B. El modelo de apariencia del color de Hunt

Estructura de Hunt94:

Hunt94 es el modelo de apariencia para colores relacionados propuesto por Robert W. G. Hunt en 1991 [Hunt (1982, 1987, 1991)], con ciertas mejoras incorporadas en 1994 [Hunt (1994), Hunt y Luo (1994)]. Es un modelo complejo, y está orientado principalmente a la reproducción de imágenes en color. Los descriptores que proporciona son la cuadratura de tono H , las contribuciones H_C de rojo, amarillo, verde y azul al tono, el contenido amarillo-azul M_{YB} , el contenido rojo-verde M_{RG} , el colorido M , la saturación s , la luminosidad Q , la claridad J , el croma C y el contenido blanco-negro Q_{WB} .

Debido a la gran complejidad de este modelo en su versión de 1991 (Hunt91), no indicaremos aquí la forma exacta de todas las operaciones que realiza, pero sí explicaremos a grandes rasgos cuáles son sus etapas:

- Se parte de los valores triestímulo XYZ del test, a los que se aplica una transformación lineal para convertirlos en señales de conos.
- Se hace una normalización de tipo Von Kries con las señales de conos del blanco de referencia, modificadas teniendo en cuenta la posible asimilación o contraste simultáneo.
- Se multiplica por un factor de adaptación al nivel de luminancia.
- Se multiplica por los factores de adaptación cromática.
- Se aplica a las señales una no linealidad de tipo Naka-Rushton con exponente 0.73.
- Se suman unos términos para el efecto Helson-Judd.

-Se multiplica por un factor de blanqueo de los conos y se suma un cierto ruido a la señal.

-Diversas combinaciones lineales sustractivas de las señales de conos dan unas señales oponentes que proporcionan las condiciones de estímulo acromático y de los tonos constantes y únicos.

-También se obtiene una combinación aditiva de los tres conos teniendo en cuenta sus poblaciones relativas (2:1:0.05), que junto con un término de ruido proporciona la contribución de los conos a la señal acromática.

-Las señales oponentes permiten calcular el ángulo de tono h_s , a partir del cual se interpola la cuadratura de tono H y el factor de excentricidad, y se deducen las H_C .

-A partir de las señales oponentes y los factores de excentricidad y de inducción cromática de alrededor y fondo se calculan el contenido rojo-verde M_{RG} y el contenido amarillo-azul M_{YB} . En este último se incluye también un factor de tritanopía a bajas luminancias.

-La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de M_{RG} y M_{YB} proporciona el colorido M , que dividido a su vez por una combinación aditiva de las señales de los conos proporciona la saturación s .

-La luminancia escotópica del test dividida por la del blanco, multiplicada por un factor escotópico de adaptación al nivel de luminancia, pasada a través de un Naka-Rushton, por un factor de blanqueo de bastones y más un ruido aditivo, proporciona la contribución de los bastones a la señal acromática.

-La suma de las contribuciones de conos y bastones más un ruido combinado, multiplicada por un factor de inducción acromática del fondo, proporcionan la señal acromática total.

-A partir de la señal acromática, el colorido y un factor de inducción acromática del alrededor se obtiene la luminosidad Q .

-Operando las luminosidades de test y blanco de referencia se consigue la claridad J .

-A partir de la saturación y de las luminosidades de test y blanco se obtiene el croma C .

-A partir de las luminosidades de test y fondo se calcula el contenido blanco-negro Q_{WB} .

Hunt94 es una modificación de Hunt91 con nuevas definiciones de croma y colorido para mejorar las predicciones del modelo respecto a la base de datos LUTCHI de estimación de magnitud de J, M y H [Luo et al. (1993)]. El colorido modificado se obtiene a partir del croma modificado y del factor de adaptación al nivel de luminancia. El colorido de Hunt91 pasa a llamarse en Hunt94 “respuesta cromática”.

El ángulo de tono h_s de Hunt, medido en grados sexagesimales e íntimamente ligado al plano $M_{YB}M_{RG}$, proporciona una distribución de tonos aproximadamente uniforme desde el punto de vista perceptual, lo cual es útil a la hora de calcular diferencias de tono; pero sitúa los tonos únicos rojo, amarillo, verde y azul en los ángulos de 20° , 90° , 164° y 237° , fuera de los ejes. Por esta razón Hunt define la cuadratura de tono H, en grados centesimales, haciendo corresponder a los tonos únicos los valores 0, 100, 200 y 300, obteniéndose el resto de valores a partir de una interpolación lineal con estos cuatro puntos. La escala resultante ya no es uniforme perceptualmente, aunque sí lo es, en primera aproximación, por cuadrantes: en la región de los púrpuras los pasos perceptuales equivalen a variaciones de cuadratura de tamaño mitad que en el resto de cuadrantes. La cuadratura de tono resulta particularmente útil a la hora de calcular la composición de tono de un estímulo cromático.

Hunt muestra que su modelo es capaz de predecir cualitativamente la saturación de conos y bastones, los efectos Stevens, Hunt, Abney y Helson-Judd, las observaciones de Bartleson-Breneman, la adaptación cromática y la influencia de la luminancia relativa del alrededor en el contraste de la imagen, entre otros fenómenos.

Datos de entrada y condiciones de observación en Hunt94:

Uno de los principales inconvenientes a la hora de aplicar el modelo de Hunt es el gran número de parámetros de entrada que precisa para describir con detalle las características de los estímulos presentes en el campo visual y otras condiciones de observación. Pasamos a continuación a describir brevemente estas entradas del modelo.

Se trabaja a partir de las coordenadas cromáticas xy y el factor de luminancia en tantos por ciento ($\beta=100Y/Y_{wr}$, donde Y_{wr} es la luminancia del difusor perfecto en cd/m^2) del test, con un tamaño típico de 2° , y de los siguientes estímulos cromáticos, todos bajo las mismas condiciones de observación que el test: el blanco de referencia, que permite al modelo efectuar un descuento del iluminante; el campo próximo, que rodea al test unos 2° en todas direcciones; y el fondo, que rodea al campo próximo, en caso de haberlo, unos 10° en todas direcciones. Esta disposición espacial intenta simplificar la situación real de la visión lo suficiente como para poder modelizarla, pero tratando de incluir los factores más importantes que afectan a la apariencia del color. En la figura B.1 se muestra un diagrama con la disposición de los distintos elementos.

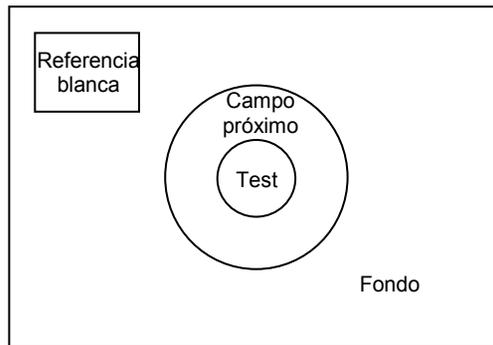


Figura B.1. Disposición espacial de los elementos del campo visual en el modelo de Hunt.

El coeficiente p modeliza la influencia del campo próximo en la percepción del test, y su valor puede oscilar en un rango continuo entre -1 , para contraste simultáneo máximo, y $+1$, para asimilación máxima. Si queremos que haya inducción cromática el campo próximo y el fondo han de ser diferentes: el fondo será siempre acromático y se encargará de la adaptación al nivel de iluminación, mientras que el campo próximo, de color y con igual luminancia que el fondo, se encargará de la adaptación cromática.

Otro parámetro que requiere el modelo es la luminancia absoluta Y_A del campo adaptativo medida en cd/m^2 . Se considera como campo adaptativo al conjunto de campo próximo, fondo y alrededor. Es necesario especificar también el valor de la luminancia escotópica absoluta del campo adaptativo Y_{AS} , la luminancia escotópica del test relativa al blanco de referencia S/S_w , y la cantidad equivalente para el fondo, S_b/S_w .

Por último, Hunt94 nos permite seleccionar el tipo de alrededor que rodea al fondo de entre las siguientes posibilidades; a cada opción le corresponden distintos valores numéricos de determinados factores del modelo:

- Tests pequeños en fondos y alrededores luminosos uniformes
- Escenas normales (muestras reflectantes, colores superficie)
- Televisión o dispositivos VDU con alrededores tenues
- Fotografías proyectadas sobre alrededores oscuros
- Distribución de colores adyacentes en alrededores oscuros

El modelo de colores no relacionados Hunt91u:

Hunt91u es la versión para colores no relacionados del modelo de apariencia de Hunt. No experimentó cambios en la reestructuración de 1994. Presenta, entre otras diferencias con respecto a Hunt94, un factor de excentricidad variable en función de la luminancia del test, para dar cuenta del efecto Bezold-Brücke, presente sólo en colores no relacionados [Hunt (1989)]. Proporciona la cuadratura de tono H, las contribuciones H_C de rojo, amarillo, verde y azul al tono, el colorido M, la saturación s y la luminosidad Q del test.

La entrada del modelo son las coordenadas cromáticas y luminancia xyY del test, así como su luminancia escotópica Y_S . Estos mismos parámetros deben proporcionarse para el campo adaptativo, que rodea al estímulo, y para el campo condicionante, que lo precede.

Comparación de Hunt con ATTD:

A efectos de comparación de Hunt94 con ATTD consideramos siempre un blanco de referencia equienergético de $Y_w=1000 \text{ cd/m}^2$, con $\beta_w=100\%$. Supondremos $p=-1$, es decir, contraste simultáneo máximo, ya que la asimilación se suele producir con tests de tipo damero o tests en los que intervienen factores espaciales (tamaños inferiores a un tercio de grado) que el modelo ATTD no contempla. Consideraremos que la luminancia absoluta Y_A del campo adaptativo coincide con la luminancia del fondo Y_b . En cuanto al tipo de alrededor, seleccionaremos la opción de “Tests pequeños en fondos y alrededores luminosos uniformes”.

En lo que respecta a la luminancia escotópica absoluta Y_{AS} del campo adaptativo, para un iluminante equienergético se cumple que $Y_{AS}=2.26Y_A$. Ésta será la expresión que utilizaremos en nuestros cálculos. También aproximaremos S/S_w , la luminancia escotópica del test relativa al blanco de referencia, a β/β_w , y del mismo modo S_b/S_w a β_b/β_w . Estas aproximaciones son válidas porque trabajaremos en todo momento en el rango fotópico de luminancias, y por tanto la componente escotópica no afectará sensiblemente al resultado.

En cuanto a la comparación de Hunt91u con ATTD, asignaremos a la luminancia escotópica Y_s el valor $2.26Y$, y consideraremos un adaptador equienergético de luminancia $Y_A=Y^{2/3}/200$, muy pequeña, dada por la dispersión de la luz del propio test en el aire, tal y como recomienda el propio Hunt. Supondremos que el condicionante es también oscuro, y lo consideraremos igual al adaptador.

En casos de fondo oscuro es necesario utilizar Hunt91u, mientras que para fondos no nulos hay que utilizar Hunt94. Los colores no relacionados suelen ser vistos en entornos de baja luminancia. En todo momento comparamos ATTD y ATD95 con una combinación de los dos modelos de Hunt, según el valor de la luminancia del fondo Y_b . En cada uno de ellos los descriptores perceptuales están escalados de distinta manera, no hay una transición suave entre uno y otro. Esta discontinuidad cuando

hacemos tender Y_b a 0 es una desventaja del modelo de Hunt; es el precio que paga el modelo para poder reproducir algunos efectos que se observan sólo en el caso de colores aislados. Hay que tener presente que Hunt91u es un modelo de colores no relacionados no porque sirva sólo para fondo nulo, sino porque carece de una referencia blanca; y que Hunt94 es de colores relacionados no porque sirva para fondo no nulo, sino porque considera una referencia.

Apéndice C. Definiciones de términos de color

Definiciones de una serie de términos relacionados con el color, de acuerdo con el Vocabulario Internacional de Iluminación [CIE (1987)]:

color de superficie (845-02-20) Color percibido como perteneciente a una superficie desde la que la luz parece ser difusamente reflejada o radiada.

color (percibido) luminoso (845-02-22) Color percibido como perteneciente a un área que parece estar emitiendo luz como una fuente luminosa primaria, o que parece estar reflejando especularmente dicha luz.

Nota. Las fuentes de luz primarias vistas en sus entornos naturales normalmente exhiben la apariencia de colores luminosos en este sentido.

color (percibido) no luminoso (845-02-23) Color percibido como perteneciente a un área que parece estar transmitiendo o reflejando difusamente luz como una fuente luminosa secundaria.

Nota. Las fuentes de luz secundarias vistas en sus entornos naturales normalmente exhiben la apariencia de colores no luminosos en este sentido.

color (percibido) relacionado (845-02-24) Color percibido como perteneciente a un área visto en relación con otros colores.

color (percibido) no relacionado (845-02-25) Color percibido como perteneciente a un área visto aislado de otros colores.

luminosidad (845-02-28) Atributo de una sensación visual de acuerdo con el cual un área parece emitir más o menos luz.

claridad (de un color relacionado) (845-02-31) Luminosidad de un área juzgada en relación con la luminosidad de otra área similarmente iluminada que parece ser blanca o altamente transmisora.

Nota. Sólo los colores relacionados exhiben claridad.

tono (845-02-35) Atributo de una sensación visual de acuerdo con el cual un área parece ser similar a uno de los colores percibidos rojo, amarillo, verde y azul, o a una combinación de dos de ellos.

tono único (845-02-36) Tono percibido que no puede ser descrito mediante nombres de tonos distintos del suyo propio.

Nota. Hay cuatro tonos únicos: rojo, verde, amarillo y azul.

tono binario (845-02-37) Tono percibido que puede ser descrito como una combinación de dos tonos únicos. Por ejemplo: el naranja es un rojo amarillento o un amarillo rojizo; el violeta es un azul rojizo, etc.

colorido (845-02-40) Atributo de una sensación visual de acuerdo con el cual el color percibido de un área parece más o menos cromático.

Notas 1. Para un estímulo de color de una cromaticidad dada y, en el caso de colores relacionados, de un factor de luminancia dado, este atributo normalmente aumenta al incrementar la luminancia excepto cuando la luminosidad es muy elevada.

2. Anteriormente este término denotaba las percepciones combinadas de tono y saturación, es decir, el correlato perceptual de la cromaticidad.

saturación (845-02-41) Colorido de un área juzgado en proporción a su luminosidad.

Nota. Para unas condiciones de observación dadas y en niveles de luminancia dentro del rango de visión fotópica, un estímulo de color de una cromaticidad dada exhibe una saturación aproximadamente constante para todos los niveles de luminancia, excepto cuando la luminosidad es muy elevada.

croma (845-02-42) Colorido de un área juzgado como una proporción de la luminosidad de otra área similarmente iluminada que parece ser blanca o altamente transmisora.

Nota. Para unas condiciones de observación dadas y en niveles de luminancia dentro del rango de visión fotópica, un estímulo de color percibido como un color relacionado, de una cromaticidad dada y procedente de una superficie con un factor de luminancia dado, exhibe un croma aproximadamente constante para todos los niveles de iluminancia, excepto cuando la luminosidad es muy elevada. En las mismas circunstancias, a un nivel dado de iluminancia, si el factor de luminancia es incrementado el croma normalmente aumenta.

estímulo de color (845-03-02) Radiación visible que entra en el ojo y produce una sensación de color, cromático o acromático.

coordenadas cromáticas (845-03-33) Relación entre cada elemento de un conjunto de tres valores triestímulo y su suma.

Notas 1. Como la suma de las tres coordenadas cromáticas es 1, dos de ellas son suficientes para definir una cromaticidad.

2. En los sistemas colorimétricos estándar de la CIE las coordenadas cromáticas se representan por los símbolos x , y , z y x_{10} , y_{10} , z_{10} .

cromaticidad (845-03-34) Propiedad de un estímulo de color definida por sus coordenadas cromáticas, o por el conjunto de su longitud de onda dominante o complementaria y su pureza.

diagrama cromático (845-03-35) Un diagrama plano en el que los puntos, especificados por sus coordenadas cromáticas, representan las cromaticidades de los estímulos de color.

Nota. En los sistemas colorimétricos estándar de la CIE y es normalmente representada como ordenada y x como abscisa, para obtener un *diagrama cromático* x,y .

estímulos de color óptimos (845-03-40) Estímulos de color correspondientes a objetos cuyos factores de luminancia tienen los máximos valores posibles para cada cromaticidad cuando sus factores de luminancia espectrales no exceden la unidad en ninguna longitud de onda.

Notas 1. Estos estímulos corresponden, en general, a objetos cuyos factores de luminancia espectrales tienen valores de uno o de cero, con no más de dos transiciones entre ellos.

2. Los factores de luminancia y coordenadas cromáticas de estos estímulos definen las fronteras de un sólido de color correspondiente a objetos no fluorescentes.

3. Para un factor de luminancia dado, estos estímulos de color definen la máxima pureza posible para objetos no fluorescentes.

longitud de onda dominante (de un estímulo de color) (λ_d) **(845-03-44)** Longitud de onda del estímulo monocromático que, al ser mezclado aditivamente en proporciones adecuadas con el estímulo acromático especificado, iguala al estímulo de color considerado.

Nota. En el caso de estímulos púrpuras, la longitud de onda dominante se sustituye por la longitud de onda complementaria.

pureza de excitación (p_e) **(845-03-48)** Cantidad definida por el cociente NC/ND de dos distancias colineales en el diagrama cromático de los sistemas colorimétricos estándar de la CIE 1931 ó 1964, siendo la primera la distancia entre el punto C, que representa el estímulo de color considerado, y el punto N, que representa el estímulo acromático especificado; la segunda es la distancia entre el punto N y el punto D del locus espectral en la longitud de onda dominante del estímulo de color considerado. La definición conduce a las expresiones $p_e = (y - y_n) / (y_d - y_n)$ ó $p_e = (x - x_n) / (x_d - x_n)$, donde (x, y) , (x_n, y_n) , (x_d, y_d) son las coordenadas cromáticas x, y de los puntos C, N y D, respectivamente.

Notas 1. Las fórmulas en x e y son equivalentes, pero se obtiene una mayor precisión con la fórmula que presenta el mayor valor en el numerador.

2. La pureza de excitación p_e está relacionada con la pureza colorimétrica p_c por la ecuación $p_e = p_c y / y_d$.

factor de luminancia **(845-04-69)** (en un elemento de superficie de un medio no autoluminoso, en una dirección dada, bajo determinadas condiciones de iluminación) (β_v, β) Relación entre la luminancia del elemento de superficie en la dirección dada y la de un difusor perfecto, reflectante o transmisor, idénticamente iluminado. Es adimensional.

Nota. Para medios fotoluminiscentes, el factor de luminancia es la suma de dos porciones, el **factor de luminancia reflejada** β_S y el **factor de luminancia luminiscente** β_L .

Bibliografía

Abney W. On the change in hue of spectrum colors by dilution with white light. *Proc. Roy. Soc.* **A.83**, 120-127 (1910).

Aiba T.S. and Stevens S.S. Relation of brightness to duration and luminance under light and dark adaptation. *Vis. Res.* **4**, 391-401 (1964).

Arden G.B. and Weale R.A. Nervous mechanisms and dark-adaptation. *J. Physiol.* **125**, 417 (1954).

Artigas J.M., Capilla P., Felipe A. y Pujol J. *Óptica Fisiológica. Psicofísica de la Visión*. Interamericana McGraw-Hill. Madrid, 72-76 (1995).

Aubert H. *Physiologie der Netzhaut*. Breslau (1865).

Barlow H.B. Temporal and spatial summation in human vision at different background intensities. *J. Physiol.* **141**, 337-350 (1958).

Barthley S.H. The psychophysiology of vision. *Handbook of experimental psychology*. Wiley **24**, 921-984, New York (1951).

Bartleson J.C. and Breneman C.J. Brightness perception in complex fields. *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 953-957 (1967a).

Bedford R.E. and Wyszecki G.W. Luminosity functions for various field sizes and levels of retinal illuminance. *J. Opt. Soc. Am.* **48**, 406-411 (1958).

Billock V.A. The relationship between simple and double opponent cells. *Vision Res.* **31**, 33-42 (1991).

Bodmann H.W., Haubner P. and Marsden A.M. A unified relationship between brightness and luminance. En *CIE Proceedings. Kyoto session 1979*. 99-102. CIE Central Bureau, Paris (1980).

Boynton R.M. and Gordon J. Bezold-Brücke hue shift measured by color-naming technique. *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 78-86 (1965).

Boynton R.M. and Whitten D.N. Visual adaptation in monkey cones: Recordings of late receptor potentials. *Science* **170**, 1423-1426 (1970).

Boynton R.M. A system of photometry and colorimetry based on cone excitations. *Color Res. and Appl.* **11**, 244-252 (1986).

Bradley A., Switkes E. and DeValois K. Orientation and spatial frequency selectivity of adaptation to color and luminance gratings. *Vision Res.* **28**, 841-856 (1988).

Brown P.K. and Wald G. *Nature* (Lond.) **200**, 37 (1963).

Brown P.K. and Wald G. *Science* **144**, 45 (1964).

Burns S.A., Smith V.C., Pokorny J. and Elsner A.E. Brightness of equal-luminance lights. *J. Opt. Soc. Am.* **9**, 1225-1231 (1982).

Burns S.A., Elsner A.E., Pokorny J. and Smith V.C. The Abney effect: chromaticity coordinates of unique and other constant hues. *Vision Res.* **24**, 479-489 (1984).

CIE Proceedings 1924, p. 67 and 232, Cambridge University Press, Cambridge (1926).

CIE Proceedings 1931, p. 19, Cambridge University Press, Cambridge (1932).

CIE. Light as a true visual quantity: Principles of measurement, *Publ. CIE n° 41, TC 1.4*, Bureau Central de la CIE, Paris (1978).

CIE International lighting vocabulary. **17.4** Genève, Suisse: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (1987).

CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s. CIE TC1-34 (1998).

Cohen J.D. Temporal independence of the Bezold-Brücke hue shift. *Vision Res.* **15**, 341-351 (1975).

Comerford J.P. and Kaiser P.K. Luminous efficiency functions by heterochromatic brightness matching. *J. Opt. Soc. Am.* **65**, 466-468 (1975).

Crawford B.H. The scotopic visibility function. *Proc. Phys. Soc.* **B62**, 321 (1949).

Creutzfeldt O.D., Lee B.B. and Elepfandt A. A quantitative study of chromatic organization and receptive fields of cells in the lateral geniculate body of the rhesus monkey. *Experimental Brain Research* **35**, 527-545 (1979).

Dacey D.M. and Lee B.B. The blue-on opponent pathway in primate retina originates from a distinct bistratified ganglion cell type. *Nature* **367**, 731-735 (1994).

DeMonasterio F.M and Gouras P. Functional properties of ganglion cells of the rhesus monkey retina. *J. Physiol.* **251**, 167-195 (1975).

DeMonasterio F.M. Asymmetry of on- and off-pathways of blue-sensitive cones of the retina of macaques. *Brain Res.* **166**, 39-48 (1979).

DeMonasterio F.M. and Schein S.J. Spectral bandwidths of color-opponent cells of geniculostriate pathway of macaque monkeys. *J. Neurophysiol.* **47**, 214-224 (1982).

Derrington A.M and Lennie P. Spatial and temporal contrast sensitivities of neurones in lateral geniculate nucleus of macaque. *J.Physiol*, **357**, 291-340 (1984).

Derrington A.M., Krauskopf J. and Lennie P. Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *J. Physiol.* **357**, 241-265 (1984).

DeValois R.L., Abramov I. and Jacobs G.H., Analysis of response patterns of LGN cells. *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 966-977 (1966).

DeValois R.L, Albrecht D.G. and Thorrell L.G. Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Res.* **22**, 545-559 (1982).

DeValois R.L. and DeValois K.K. *Spatial vision*. Oxford University Press (1990).

DeValois R.L. and DeValois K.K. A multi-stage color model. *Vision Res.* **33**, 1053-1065 (1993).

DeValois R.L. and DeValois K.K., Switkes E., Luke M. Hue scaling of isoluminant and cone-specific lights. *Vision Res.* **37**, 885-897 (1997).

Donders F.C. Über Farbensysteme. *Graefe's Arch. f. Ophthal.* (1881), Abstract en *Centralbl. Augenh.* **5**, 403 (1881).

Dow B.M. and Vautin R.G. Horizontal segregation of color information in the middle layers of foveal striate cortex. *J. Neurophysiol.* **57**, 712-739 (1987).

Dow B.M. "Color Vision" en *Vision and Visual Dysfunction Vol. 4: The neural basis of visual function*. Leventhal A.G. (Ed.) MacMillan Press (1991).

Dreher B., Fukada Y. and Rodieck R.W. Identification, classification, and anatomical segregation of cells with X-like and Y-like properties in the lateral geniculate nuclei of macaques. *J.Physiol (London)*, **258**, 433-452 (1976).

- Drum B. Short-wavelength cones contribute to achromatic sensitivity. *Vision Res.* **23**, 1433-1439 (1983).
- Enroth-Cugel C. and Robson J.G. The contrast sensitivity of ganglion cells of the cat. *J. Physiol Lond.* **187**, 517-552 (1966).
- Estévez O. On the fundamental data-base of normal and dichromatic color vision. Ph. D. Thesis. Universidad de Amsterdam (1979).
- Fairchild M.D. Formulation and testing of an incomplete chromatic-adaptation model. *Color Res. Appl.* **16**, 243-250 (1991).
- Fairchild M.D. Refinement of the RLAB color space. *Color Res. Appl.* **21**, 338-346 (1996).
- Finkelstein M.A. Spatial sensitization and adaptation in a long-wavelength cone pathway. *Color Res. Appl.* **18**, 89-97 (1993a).
- Finkelstein M.A. Sensitivity loss and adaptation within the short-wavelength cone pathway. *Color Res. Appl.* **18**, 210-217 (1993b).
- Geisler W.S and Albrecht D.G. Cortical neurons: Isolation of contrast Gain Control. *Vision Res*, **32**:1409-1410 (1992).
- Gómez J. Simulación de un modelo de apariencia del color a partir de un modelo neural. Trabajo de investigación. Universidad de Valencia (1999).
- Gouras P. Opponent-colour cells in different layers of foveal striate cortex. *J. Physiol. Lond.* **238**, 583-602 (1974).
- Gouras P. and Kruger J. Responses of cells in foveal visual cortex of the monkey to pure color contrast. *J. Neurophysiol.* **42**, 850-860 (1979).
- Gouras P. "Color Vision", en *Principles of Neural Science*. Elsevier (1990).

Gouras P, "Cortical mechanisms of colour vision", en *The Perception of Colour. Vol. 6 de Vision and Visual Dysfunction*. P. Gouras (Ed.). J. Cronly-Dillon (Series Ed.). MacMillan, Oxford (1991).

Guirao M. and DeMattiello M.L.F. Saturation scales for surface colors. *Vis. Res.* **14**, 487-493 (1974).

Guirao M. and DeMattiello M.L.F. Saturation of colored samples at various levels of reflectance. *J. Opt. Soc. Am.* **67** **5**, 647-651 (1977).

Guth S.L. and Lodge H.R. Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model. *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 450-462 (1973).

Guth S.L., Massof R.W. and Benzschawel T. Vector model for normal and dichromatic vision. *J. Opt. Soc. Am.* **70**, 197-212 (1980).

Guth S.L. Model for color vision and light adaptation. *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, 976-993 (1991).

Guth S.L. Model for color vision and light adaptation. Erratum. *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 344 (1992).

Guth S.L. Unified model for human color perception and visual adaptation II. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, **1913**, 440-448 (1993).

Guth S.L. ATD model for color vision I: background. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, **2170**, 149-152 (1994a).

Guth S.L. ATD model for color vision II: applications. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, **2170**, 153-162 (1994b).

Guth S.L. Further applications of the ATD model for color vision. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, **2414**, 12-26 (1995).

Hecht S., Haig C. and Chase A.M. The influence of light-adaptation on subsequent dark-adaptation of the eye. *J. Gen. Physiol.* **20**, 831 (1937).

Hecht S. and Hsia Y. Dark adaptation following light adaptation to red and white lights. *J. Opt. Soc. Am.* **35:4**, 261-267 (1945).

Heinemann E.G. Simultaneous brightness induction as a function of inducing- and test-field luminances. *J. Exp. Psychol.* **50**, 89-96 (1955).

Helmholtz H. Handbuch der Physiologischen Optik, 2, Voss, Hamburgo (1911).

Hendry S.H. and Yoshioka T. A neurochemically distinct third channel in the macaque dorsal lateral geniculate nucleus. *Science* **264**, 575-578 (1994).

Hendry S.H. Striate and extrastriate output of a third geniculate channel in macaques. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **36**, S292 (1995).

Hering E. *Zur Lehre vom Lichtsinne*. Carl Gerald's Sohn. Wien (1878).

Hsia Y. and Graham C.H. Spectral sensitivity of the cones in the dark adapted human eye. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **38**, 80-85 (1952).

Hubel D.H. and Wiesel T.N. Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *J. Physiol. Lond.* **195**, 215-243 (1968).

Hubel D.H. and Wiesel T.N. Functional architecture of macaque monkey visual cortex. Ferrier Lecture. Proc. R. Soc. Lond. (Biol.), **198**, 1-99 (1977).

Hubel D.H. Eye, brain and vision. Scientific American Library (1995).

Hubel D.H. Ojo, cerebro y visión. Universidad de Murcia (1999).

Hunt R.W.G. Light and dark adaptation and the perception of color. *J. Opt. Soc. Am.* **42**, 190-199 (1952).

Hunt R.W.G. The perception of color in 1° fields for different states of adaptation. *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 479-484 (1953).

Hunt R.W.G, The specification of colour appearance I. Concepts and terms. *Col. Res. Appl.* **2**, 55-68 (1977).

Hunt R.W.G. A model of colour vision for predicting colour appearance. *Col. Res. Appl.* **7**, 95-112 (1982).

Hunt R.W.G. A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions, *Col. Res. Appl.* **12**, 297-314 (1987).

Hunt R.W.G. Hue shifts in unrelated and related colours. *Col. Res. Appl.* **14**, 235-239 (1989).

Hunt R.W.G. Revised colour-appearance model for related and unrelated colours. *Col. Res. Appl.* **16**, 146-165 (1991).

Hunt R.W.G. An improved predictor of colourfulness in a model of colour vision. *Color Res. Appl.* **19**, 23-33 (1994).

Hunt R.W.G and Luo M.R. Evaluation of a model of colour vision by magnitude scaling: Discussion of collected results. *Color Res. Appl.* **19**, 27-33 (1994).

Hurvich L.M. and Jameson D. Spectral sensitivity of the fovea. I. Neutral adaptation. *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 485-494 (1953).

Hurvich L.M. and Jameson D. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. II. Brightness, saturation and hue in normal and dichromatic vision. *J. Opt. Soc. Am.* **45** 602-616 (1955).

Hurvich L.M. and Jameson D. An opponent-process theory of color vision. *Psych. Rev.* **64**, 384-404 (1957).

Hurvich L.M. Color Vision. Sunderland, Mass. Sinauer Associates (1981).

- Indow T. and Stevens S.S. Scaling of saturation and hue. *Perception & Psychophysics* **1**, 253-271 (1966).
- Ingling C.R. Jr. and Tsou B.H. Orthogonal combinations of three visual channels. *Vision Res.* **17**, 1075-1082 (1977).
- Ingling C.R. and Martinez-Uriegas C. The relationship between spectral sensitivity and spatial sensitivity for the primate r-g X-channel. *Vision Res.* **23**, 1495-1500 (1983).
- Ingling C.R. and Martinez-Uriegas C. The spatiotemporal properties of the r-g X-cell channel. *Vision Res.* **25**, 33-38 (1985).
- Jacobs G.H. Saturation estimates and chromatic adaptation. *Perception & Psychophysics* Vol 2 **7**, 271-274 (1967).
- Jameson D. and Hurvich L.M. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. *J. Opt. Soc. Am.* **45**, 546-552 (1955).
- Jameson D. and Hurvich L.M. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. III. Changes in brightness, saturation, and hue with chromatic adaptation. *J. Opt. Soc. Am.* **46**, 405-415 (1956).
- Jameson D. and Hurvich L.M. Theory of brightness and color contrast in human vision. *Vis. Res.* **4**, 291-401 (1964).
- Jameson D. and Hurvich L.M. Opponent-response functions related to measured cone photopigments. *J. Opt. Soc. Am.* **58**, 429-430 (1968).
- Jameson D. Brightness scales and their interpretation in: AIC Proceedings color69. 377-385, Musterschmidt Verlag Göttingen (1970).
- Jameson D. and Hurvich L.M. Eds. Visual psychophysics. In *Handbook of Sensory Physiology*. Vol. VII/4. Springer-Verlag (1972).

Judd D.B. Response functions for types of vision according to the Müller theory. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **42**, 1 (1949).

Judd D.B. Report of US. Secretariat Committee on Colorimetry and artificial daylight. *CIE Proc.* Vol I, Part 7, p. 11. (Stockholm, 1951). Paris, CIE Central Bureau (1951).

Kaiser P.K. and Smith P.W. The luminance of equally bright colors, in CIE Proceedings 17th Session, Barcelona 1971 **21**, 143, CIE Central Bureau, Paris (1972).

Kaiser P.K., Comerford J.P. and Bodinger D.M. Saturation of spectral lights. *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 818-826 (1976).

Kalloniatis M. and Harweth R.S. Spectral sensitivity and adaptation characteristics of cone mechanisms under white-light adaptation. *J. Opt. Soc. Am.* **A 7**, 1912-1928 (1990).

Kalloniatis M. and Harweth R.S. Effects on chromatic adaptation on opponent interactions in monkey increment-threshold spectral-sensitivity functions. *J. Opt. Soc. Am.* **A 8**, 1818-1831 (1991).

Kingdom F.A.A. and Mullen K.T. Separating colour and luminance information in the visual system. *Spatial Vision*, 9, 191-219 (1995).

King-Smith P.E. and Carden D. Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation to temporal and spatial integration. *J. Opt. Soc. Am.* **66**, 709-717 (1976).

Kimura E. Effects of luminance level on the saturation function: sensitivities based on saturation discrimination. *Col. Res. Appl.* **16**, 289-296 (1991).

Kinney J.A.S. Effect of field size and position on mesopic spectral sensitivity. *J. Opt. Soc. Am.* **54**, 671-677 (1964).

Kranda K. and King-Smith P.E. Detection of coloured stimuli by independent linear systems, *Vision Res.* **19**, 733-745 (1979).

Krauskopf J., Zaidi Q. and Mandles M.B. Mechanisms of simultaneous color induction. *J. Opt. Soc. Am. A* **3**, 1752-1757 (1986).

Land E.H. and McCann J.J. Lightness and Retinex theory. *J. Opt. Soc. Am.* **61**, 1-11 (1971).

Land E.H. The Retinex theory of colour vision. *Proc. R. Instn. G.B.* **47**, 23-58 (1974).

Land E.H. Recent advances in Retinex theory and some implications for cortical computations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **80**, 5163-5169 (1983).

Larimer J., Krantz D.H. and Cicerone C.M. Opponent-process additivity I: Red/green equilibria. *Vision Res.* **14**, 1127-1140 (1974).

Larimer J., Krantz D.H. and Cicerone C.M. Opponent-process additivity II: Yellow/blue equilibria and nonlinear models. *Vision Res.* **15**, 723-731 (1975).

Larimer J. Red/green opponent colors equilibria measured on chromatic adapting fields: evidence for gain changes and restoring forces. *Vision Res.* **21**, 501-512 (1981).

Lee B.B., Valberg A., Tigwell D.A. and Tyrri J. An account of responses of spectrally opponent neurons in macaque lateral geniculate nucleus to successive contrast. *Proc. R. Soc. Lond. B.* **230**, 293-314. (1987).

Lee B.B., Martin P.R. and Valberg A. Physiological basis of heterochromatic flicker photometry demonstrated in the ganglion cells of the macaque retina, *J. Physiol. (Lond)*, **404**, 323-347 (1988).

LeGrand Y. Spectral luminosity, in: Handbook of Sensory Physiology, **VII/4**: Visual Psychophysics. (D. Jameson and L.M. Hurvich, Eds.), 413-433, Springer-Verlag, New York (1972).

Lennie P. Parallel visual pathways: a review. *Vision Res.* **20**, 561-594 (1980).

Lennie P. and D'Zmura M. Mechanisms of color vision. *CRC Crit. Rev. Neurobiol.* **3**, 333-400 (1988).

Lennie O., Krauskopf J. and Sclar G. Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque. *J. Neurosci.* **10**, 309-356 (1990),

Lennie P., Lankheet M.J.M. and Krauskopf J. Chromatically-selective habituation in monkey striate cortex. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)* **35**, 1662 (1994).

Li A. and Lennie P. Mechanisms underlying segmentation of colored textures. *Vision Res.* **37**, 83-97 (1997).

Livingstone H.S. and Hubel D.H. Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex. *J. Neurosci.* **4**, 309-356 (1984).

Livingstone H.S. and Hubel D.H. Segregation of form, color, movement and depth: anatomy, physiology and perception. *Science*, **240**, 740-749 (1988).

Lucassen M. and Walraven J. Quantifying color constancy: Evidence for nonlinear processing of cone-specific contrast. *Vision Res.* **33**, 739-757 (1993).

Luo M.R., Clarke A.A., Rhodes P.A., Shcappo A., Scrivner S.A.R., and Tait, C.J. Quantifying colour appearance. Part I. LUTCHI colour appearance data. *Color Res. Appl.* **16**, 166-180 (1991a).

Luo M.R., Gao X.W., Rhodes P.A., Xin H.J., Clarke A.A., and Scrivner S.A.R. Quantifying colour appearance. Part III. Supplementary LUTCHI colour appearance data. *Color Res. Appl.* **18**, 98-113 (1993).

Luo M.R., Gao X.W., Rhodes P.A., Xin H.J., Clarke A.A., and Scrivner S.A.R. Quantifying colour appearance. Quantifying colour appearance. Part V. Simultaneous contrast. *Color Res. Appl.* **20**, 18-28 (1995).

Luo M.R., Lo M.C. and Kuo W.G. The LLAB(l:c) colour model. *Color Res. Appl.* **21**, 412-429 (1996).

Luo M.R and Hunt R.W.G. The structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model (CIECAM97s). *Color Res. Appl.* **23**, 138-146 (1998a)

Luo M.R and Hunt R.W.G. Testing colour appearance models using corresponding-colour and magnitude-estimation data sets. *Color Res. Appl.* **23**, 147-153 (1998b)

MacLeod D.I.A and Boynton R.M. Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *J. Opt. Soc. Am.* **69**, 1183-1186 (1979).

Malpeli J.G. and Schiller P.H. Lack of blue off-center cells in the visual system of the monkey. *Brain Res.* **141**, 385-389 (1978).

Marks W.B., Dobbelle W.H. and MacNichol E.F. Visual pigments of single primate cones. *Science* **143**, 1181-1183 (1964).

Martinez-Uriegas E. Spatiotemporal multiplexing of chromatic and achromatic information in human vision. *SPIE Proc. Ser.* **1249**, 178-199 (1990).

Martinez-Uriegas E. Chromatic-achromatic multiplexing in human color vision. In Kelly D H (Ed.) *Visual Science and Engineering. Models and Applications*. Marcel Dekker Inc., pp. 117-187 (1994).

Maunsell J.H.R. and Newsome W.T. Visual processing in monkey extrastriate cortex. *Ann. Rev. Neurosci.* **10**, 363-401 (1987).

Maunsell J.H.R. The brain's visual world: representation of visual targets in cerebral cortex. *Science*, **270**, 764-768 (1995).

Maxwell J.C. On colour vision. *Proc. R. Instn. GB*, **6**, 260-271 (1872).

Merigan W.H. P and M pathway specialization in the macaque. En *From Pigments to perception*. Valberg A and Lee B.B. eds. New York. Plenum Press (1991).

McCann J.J., McKee S.P. and Taylor T.H. Quantitative studies in Retinex theory. *Vis. Res.* **16**, 445-458 (1976).

McCollough C. Color adaptation of edge detectors in the human visual system. *Science* **149**, 1115 (1965).

Michael C.R. Color vision mechanisms in monkey striate cortex: Dual-opponent cells with concentric receptive fields. *J. Neurophysiol.* **41**, 572-588 (1978a).

Michael C.R. Color vision mechanisms in monkey striate cortex: Simple cells with dual opponent-color receptive fields. *J. Neurophysiol.* **41**, 1233-1249 (1978b).

Michael C.R. Color-sensitive complex cells in monkey striate cortex. *J. Neurophysiol.* **41**, 1250-1266 (1978c).

Mullen K.T. The contrast sensitivity of human color vision to red-green and blue yellow chromatic gratings, *J. Pysiol.* **359**, 381-400 (1985).

Müller G.E. Darstellung und Erklärung der verschiedenen Typen der Farbenblindheit nebst Erörterung der Funktion des Stäbchenapparates sowie des Farbensinns der Biene und der Fische. Vandenhoeck & Ruprecht, Gottingen (1924).

Müller G.E. Über die Farbenempfindungen. *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg. Ergänzungsbd.* **17**, 1-430; **18**, 435-647 (1930).

Muller J.R. and Lennie P. A unified model of chromatic induction and habituation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, **36**, 1832 (1995).

Nagy A.L. Short flash Bezold-Brücke hue shift measured by color-naming technique. *Vis. Res.* **20**, 361-368 (1980).

Naka K.I. and Rushton W.A.H. S-potentials from colour units in the retina of fish (cyprinidae). *J. Physiol (London)*, **185**, 536-555 (1966).

Nayatani Y., Hashimoto K., Takahama K. and Sobagaki H. A non-linear color-appearance model using Estévez-Hunt-Pointer primaries. *Col. Res. Appl.* **12**, 231-242 (1987).

Nayatani Y., Takahama K., Sobagaki H. and Hashimoto K. Color-appearance model and chromatic-adaptation transform. *Color Res. Appl.* **15**, 210-221 (1990a).

Nayatani Y., Mori T., Hashimoto K., Takahama K. and Sobagaki H. Comparison of color-appearance models. *Color Res. Appl.* **15**, 272-284 (1990b).

Nayatani Y. Revision of chroma and hue scales of a nonlinear color-appearance model. *Color Res. Appl.* **20**, 143-155 (1995).

Newhall S.M., Nickerson D. and Judd D.B. Final report of the O.S.A. subcommittee on spacing of the Munsell colors. *J. Opt. Soc. Am.* **33**, 385 (1943).

Newton I. A new theory about light and colours. *Phil. Trans. Roy. Soc.* (Londres) 3075-3087 (1672).

Newton I. Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. S. Smith and B. Wallford, Londres (1704).

Normann R.A. and Perlman I. The effects of background illumination on the photoresponses of red and green cones. *Journal of Physiology* **286**, 491 (1979).

Onley J.W., Klingberg C.L., Dainoff M.J. and Rollman G.B. Quantitative estimates of saturation. *J. Opt. Soc. Am.* **53** 4, 487-493 (1963).

Pitt F.H.G. The nature of normal trichromatic and dichromatic vision. *Proc. Roy. Soc.* **B132**, 101-107 (1944).

Poggio G., Baker F.H., Mansfield R.J.W., Sillito A. and Grigg P. Spatial and chromatic properties of neurons subserving foveal and parafoveal vision in rhesus monkey. *Brain Res.* **100**, 25-59 (1975).

Pokorny J. and Smith V.C. Luminosity and CFF in deuteranopes and protanopes. *J. Soc. Opt. Am.* **62**, 111-117 (1972).

Pugh E.N. Jr. and Mollon J.D. A theory of the π_1 and π_3 colour mechanisms of Stiles. *Vision Res.* **19**, 293-312 (1979).

Purdy D.McL. Spectral hue as a function of intensity. *Am. J. Psychol.* **43**, 541 (1931a).

Purdy D.McL. On the saturation and chromatic thresholds of the spectral colours. *Brit. J. Psychol. (Gen. Sec.)* **21**, 283 (1931b).

Reid R.C. and Shapley R.M. Spatial structure of cone inputs to receptive fields in primate lateral geniculate nucleus. *Nature* **356**, 716-718 (1992).

Robertson A.R. The CIE 1976 color-difference formulae. *Color Res. Appl.* **2**, 7-11 (1977).

Rodieck R.W. Quantitative analysis of cat retinal ganglion cell response to visual stimuli. *Vision Res.* **5**, 583-601 (1965).

Sanders C.L. and Wyszecki G. Correlate for brightness in terms of CIE color matching data in: CIE Proceedings 15th session. Vienna 1963, paper P-63.6, CIE Central Bureau, Paris (1964).

Schein S.J. and Desimone R. Spectral Properties of V4 Neurons in the Macaque. *Journal of Neuroscience*, **10**, 3369-3389 (1990).

Schiller P.H. and Malpeli J.G. Properties and tectal projections of monkey retinal ganglion cells. *J. Neurophysiol.* **40**, 428-445 (1977).

Schiller P.H. and Malpeli J.G. Functional specificity of lateral geniculate nucleus laminae of the rhesus monkey. *J. Neurophysiol.* **41**, 788-797 (1978).

Schiller P.H., Logothetis N.K. and Charles E.R. Functions of the colour-opponent and broad-band channels of the visual system. *Nature*, **343**, 68-69 (1990).

Schwartz S.H. Colour and flicker thresholds for high frequency increments. *Ophthalm. Physiol. Opt.* **13**, 299-302 (1993).

Schwartz S.H. *Visual perception: A clinical orientation*. McGraw-Hill. (1999).

Seim T. and Valberg A. Towards a uniform color space. A better formula to describe the Munsell and OSA color scales. *Col. Res. Appl.* **11**, 11-24 (1986)

Shapley R. and Enroth-Cugell C. Visual adaptation and retinal gain controls. In *Progress in Retinal Research Vol. 3*, Osborne N. and Chader G. (eds.), 263-346. Oxford: Pergamon (1984).

Shapley R. and Perry V.H. Cat and monkey retinal ganglion cells and their visual functional roles. *Trends Neurosci.* **9**, 229-235 (1986).

Shapley R. Visual sensitivity and parallel retinocortical channels. *Ann. Rev. Psychol.* **41**, 635-658 (1990).

Shevell S.K. Unambiguous evidence for the additive effect in chromatic adaptation. *Vision Res.* **20**, 637-639 (1980).

Simoncelli E.P. and Heeger D.J. A model of neuronal responses in visual area MT. *Vision Res.* **38**, 743-761 (1998).

Smith V.C. and Pokorny J. Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Res.* **15**, 161-171 (1975).

Sperling H.G. and Hsia Y. Some comparisons among spectral sensitivity data obtained at different retinal locations and with two sizes of foveal stimuli. *J. Opt. Soc. Am.* **47**, 707-713 (1957).

Sperling H.G. An experimental investigation on the relationship between color mixture and luminous efficiency. *Visual Problems of colour* **1**, 251. N.P.L. Symposium No. 8. Her Majesty's Stationery Office. London (1958).

Sperling H.G. and Lewis W.G. Some comparisons between foveal spectral sensitivity data obtained at high brightness and absolute threshold. *J. Opt. Soc. Am.* **49**, 983-989 (1959).

Sperling H.G. and Jolliffe C.L. Intensity-time relationship at threshold for spectral stimuli in human vision. *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 191-199 (1965).

Sperling H.G., King V. and Schoessler J. *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 142A (1967).

Sperling H.G. and Harwerth R.S. Red-green cone interactions in the increment threshold spectral sensitivity of primates. *Science* **172**, 180-184 (1971).

Stevens J.C. and Stevens S.S. The dynamics of visual brightness. Harvard University Psychophysical Project Rep, PPR-246, Cambridge, MA (1960).

Stevens S.S. and Diamond A.L. Effect of the glare angle on the brightness function of a smart target. *Vis. Res.* **5**, 649-659 (1965).

Stevens S.S. *Psychophysics*. Wiley, New York (1975).

Stiles W.S. and Crawford B.H. The effect of a glaring light source on extrafoveal vision. *Proc. Roy. Soc. (London)* **B122**, 255 (1937).

Stiles W.S. Increment thresholds and the mechanisms of colour vision. *Doc. Ophthalmol.* **3**, 138-165 (1949).

Terstiege H. Chromatic adaptation: A state of the art report. *J. Col. and Appear.* **1**, 19-23 (1972).

Thorell L.G., De Valois R.L. and Albrecht D.G. Spatial mapping of monkey V1 cells with pure color and luminance stimuli, *Vision Res.* **24**, 754-769 (1984)

Tootell R.B.H., Silverman M.S., Hamilton S.L., De Valois R.L. and Switkes E. Functional anatomy of macaque striate cortex III: Color, *J. Neurosci.* **8**, 1569-1593 (1988a).

Tovee M.J. *An introduction to the visual system.* Cambridge (1996).

Ts'o D.Y. and Gilbert C.D. The organization of chromatic and spatial interctions in the primate striate córtex. *J. Neurosci.* **8**, 1712-1728 (1988).

Uttal W.R. A taxonomy of visual processes. *L.E.A. New Jersey*, 397-401 (1981).

Valberg A. Color induvtion: dependence on luminance, purity, and dominant or complementary wavelength of inducing stimuli. *J. Opt. Soc. Am.* **64**, 11, 1531-1540 (1974).

Valberg A., Seim T., Lee B.B. and Tryti J. Recontruction of equidistant color space from responses of visual neurones of macaques. *J. Opt. Soc. Am. A*, **3**, 1726-1734 (1986).

Valberg A., Seim T., and Tryti J. Simulation of responses of spectrally opponent neurones in the macaque lateral geniculate nucleusto chromatic and achromatic light stimuli. *Vision Res.* **27**, 867-882 (1987).

Valberg A. and Seim T. On the physiological basis of higher color metrics. In A. Valberg and B.B. Lee, Eds., *From Pigments to Perception.* New York: Plenum, pp. 425-436 (1991).

Valeton J.M. and Van Norren D. Light adaptation of primate cones: An analysis based on extracellular data. *Vision Res.* **23**, 1539-1547 (1983).

Vautin R.G. and Dow B.M. Color cell groups in foveal striate cortex of the behaving macaque. *J. Neurophysiol.* **54**, 273-292 (1985).

Von Kries J. Chromatic adaptation. Fribourg (1902). [Traducido por MacAdam D.L. *Sources of color science*, MIT Press, Cambridge, Mass., (1970)].

Vos J.J. and Walraven P.L. On the derivation of the foveal receptor primaries. *Vision Res.* **11**, 799-818 (1971).

Vos J.J. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. *Col. Res. Appl.* **3**, 125 (1978).

Wagner G. and Boynton R.M. Comparison of four methods of heterochromatic photometry. *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 1508-1515 (1972).

Wald G. Human vision and the spectrum. *Science* **101**, 653-658 (1945).

Walraven P.L. On the Bezold-Brücke phenomenon. *J. Opt. Soc. Am.* **51**, 1113-1116 (1961).

Walraven J. No additive effect of background in chromatic induction. *Vision Res.* **19**, 1061-1063 (1980).

Ware C. and Cowan W.B. Changes in perceived color due to chromatic interactions. *Vision Res.* **22**, 1353-1362 (1982).

Watson A.B. and Ahumada A.J. Jr. A hexagonal orthogonal-oriented pyramid as a model of image representation in visual cortex. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **36**, 97-106 (1989).

Werner J.S. and Walraven J. Effect of chromatic adaptation on the achromatic locus: the role of contrast, luminance and background color. *Vision Res.* **22**, 929-943 (1982).

Wiesel T.N. and Hubel D.H. Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey. *J. Neurophysiol.* **29**, 1115-1156 (1966).

Wildt V.D. and Bouman M.A. *Vis. Res.* **8**, 303 (1968).

Wilson H.R. and Gelb D.J. Modified line element theory for spatial frequency and width discrimination. *J. Opt. Soc. Am. A*, **1**, 124-131 (1984).

Wright W.D. The characteristics of tritanopia. *J. Opt. Soc. Am.* **42**, 509-521 (1952).

Wyszecki G. and Stiles W.S. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. *John Wiley & Sons* 2nd ed., 354-372, New York (1982).

Wyszecki G. and Stiles W.S. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. *John Wiley & Sons* 2nd ed., 392-394, New York (1982).

Young T. The Bakerian Lecture: On the theory of lights and colours. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **92**, 12-48 (1802).

Zeki S.M. The representation of colours in the cerebral cortex, *Nature*, **284**, 412-418 (1980).

Zeki S.M. A century of cerebral achromatopsia. *Brain* **113**, 1721-1777 (1990).

Zeki S.M. *A vision of the brain*. Blackwell Scientific Publications (1995).

Zrenner E. and Gouras P. Characteristics of the blue sensitive cone mechanism in primate retinal ganglion cells. *Vision Res.* **21**, 1605-1609 (1981).

Zrenner E. *Neurophysiological aspects of color vision in primates*. Springer-Verlag (1983).