

~~T. 2028 24/65~~
T 9/130

Universidad de Granada
Facultad de Ciencias



UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de Ciencias
Date: 05-11-97
GRANADA NUM. 4022

Departamento de Óptica

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
GRANADA
N.º Documento 13387017
N.º Copia 16310639

**EVALUACIÓN DE UMBRALES DE
DISCRIMINACIÓN EN MECANISMOS
DE VISIÓN DEL COLOR**

MEMORIA DE DOCTORADO

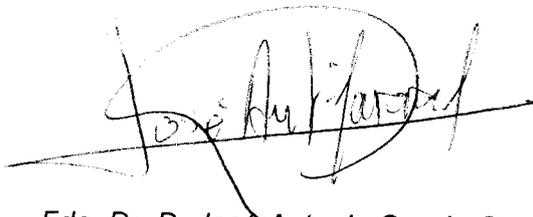
Ana Yebra Rodríguez

UNIVERSIDAD DE GRANADA
UNIVERSIDAD DE GRANADA 1997
22 OCT. 1997
COMISION DE DOCTORADO

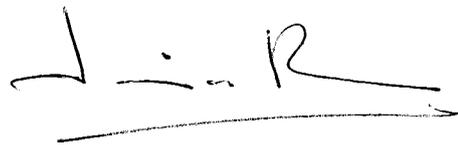
EVALUACIÓN DE UMBRALES DE DISCRIMINACIÓN EN MECANISMOS DE VISIÓN DEL COLOR

*Visado en Granada,
a 20 de Octubre de 1997.*

DIRECTORES DE LA MEMORIA



*Fdo: Dr. D. José Antonio García García.
Prof. Titular de Óptica de la
Universidad de Granada.*



*Fdo: Dr. D. Javier Romero Mora.
Catedrático de Óptica de la
Universidad de Granada.*

Memoria presentada para
aspirar al grado de
DOCTOR EN CIENCIAS



*Fdo: Ana Yebra Rodríguez.
Licenciada en Ciencias Físicas.*

Antes de comenzar con la exposición de este trabajo quisiera expresar el más sincero de los agradecimientos a todos aquellos que, de un modo u otro, han colaborado en él.

A los doctores García García y Romero Mora, por haberlo dirigido, por haberme permitido aprender de ellos y por la paciencia demostrada al corregir una y otra vez los mismos errores.

A los doctores Hita y Jiménez del Barco, por su constante apoyo y el interés demostrado durante todo este tiempo.

Al doctor Melgosa, por estar siempre dispuesto a responder cualquiera de las múltiples cuestiones que le he planteado.

Al profesor Salas Hita, por las horas y horas que pasó conmigo en el laboratorio, y porque sin su ayuda no hubiese podido llevar a cabo la mayoría de las sesiones experimentales.

A la doctora Pérez Gómez y la profesora Rivas Bravo, por haberse alegrado conmigo en los buenos momentos, por haberme consolado en los malos, por el día a día, y por haber hecho del "despacho de arriba" mucho más que un lugar de trabajo; en definitiva, por ser M. del Mar y Mari Pepa.

A Amor Rodríguez y Margarita Soler, por los ánimos, por preguntar todos los días cómo iba esto y, lo más importante, por haber pasado de alumnas a amigas.

Al resto de compañeros del Departamento de Óptica, por haberme acogido como parte de este grupo.

Y a Alex, por seguir conmigo a pesar de todo esto.

A mi familia

*Und auch, genauso wie ich das versprochen hatte,
für Steffi, Steffen und die SWG Schubert-Löser*

ÍNDICE	PÁG.
Capítulo 1: Introducción y Objetivos	1
Capítulo 2: Modelos de visión del color. Discriminación cromática	7
2.1.- Introducción	7
2.2.- Modelos de visión del color	9
2.2.1.- Curvas fundamentales de respuesta	9
2.2.2.- Diagramas de cromaticidad	12
2.2.3.- Modelos actuales de visión del color	15
2.2.3.1.- Modelo de Hurvich-Jameson (1957)	15
2.2.3.2.- " Guth et al. (1980) y revisión de Guth (1991)	17
2.2.3.3.- " Boynton (1986)	21
2.2.3.4.- " de Valois & de Valois (1993)	23
2.3.- Discriminación cromática	25
2.4.- Discriminación cromática en espacios de excitación de conos	34
Capítulo 3: Dispositivo experimental	49
3.1.- Sistema de producción de estímulos	50
3.2.- Sistema de observación	54
3.3.- Sistema de calibrado	57
Capítulo 4: Método general y desarrollo de las experiencias	59
4.1.- Elección del método experimental	59
4.2.- Descripción y justificación de los parámetros experimentales	74
4.2.1.- Parámetros fotométricos	75
4.2.2.- " temporales	82
4.2.3.- " visuales	83
4.2.4.- Observadores	85
4.3.- Desarrollo de las experiencias y evaluación de los datos	86

	PÁG.
Capítulo 5: Análisis y discusión de los resultados experimentales en el diagrama CIE1931	89
5.1.- Análisis y discusión de las elipses de discriminación en planos de luminancia constante del diagrama CIE1931	90
5.2.- Análisis y discusión en el diagrama CIE1931 de elipses de estímulos con iguales coordenadas de cromaticidad y diferentes niveles de luminancia	107
Capítulo 6: Análisis y discusión de los umbrales de discriminación en el espacio de excitación de conos	135
6.1.- Umbral de discriminación de un mecanismo	136
6.2.- Análisis y discusión del umbral de discriminación en el eje tritán	145
6.2.1.- Análisis del umbral ΔS frente a S con luminancia constante	148
6.2.2.- Análisis del umbral ΔS frente a S con las mismas coordenadas de cromaticidad	154
6.2.3.- Análisis del umbral ΔS frente a L+M manteniendo S constante	160
6.2.4.- Análisis del umbral ΔS frente a L-2M con S constante	167
6.2.5.- Ajuste del umbral de discriminación ΔS	174
6.3.- Análisis y discusión del umbral de discriminación en el eje rojo-verde	184
6.3.1.- Análisis del umbral $\Delta(L-2M)$ frente a L-2M con luminancia constante	185
6.3.2.- Análisis del umbral $\Delta(L-2M)$ para las mismas coordenadas de cromaticidad y diferentes iluminaciones retinianas	193
6.3.3.- Análisis del umbral $\Delta(L-2M)$ frente a S con luminancia constante	200
6.3.4.- Ajuste del umbral de discriminación $\Delta(L-2M)$	208
Capítulo 7: Conclusiones y Aportaciones	215
Capítulo 8: Bibliografía	221



Capítulo 1: Introducción y Objetivos

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años, muchos de los trabajos sobre discriminación cromática han estado dedicados no sólo al cálculo de los umbrales de discriminación, sino también a estudiar éstos en relación con diversos modelos de la visión del color. A pesar de ello y aunque los dos primeros estadios de la visión del color parecen estar claros, el primero con tres tipos de fotorreceptores, L, M y S, y el segundo con dos canales cromáticos oponentes, tritán y rojo-verde, y uno acromático no-oponente, quedan aún muchas incógnitas por resolver.

Así, por ejemplo, trabajos como los de Rodieck (1973), Romero et al. (1993) o Boynton y Kambe (1980) llegan a la conclusión de que el umbral de discriminación en el eje tritán sólo depende de la excitación de dicho canal, mientras que Nagy et al. (1987) indican la posibilidad de que en él influya la excitación del canal rojo-verde o la del canal de luminancia. En el mismo sentido podríamos hablar respecto al canal rojo-verde e, incluso, preguntarnos si los umbrales de discriminación de un determinado mecanismo son simétricos, es decir, si son iguales tanto si lo obtenemos

como consecuencia de aumentar la excitación de ese canal como si lo hacemos disminuyéndola. Además, la mayoría de los trabajos se han realizado sobre un conjunto de estímulos de igual luminancia con la merma de generalidad que esto supone; por ello, autores como Lennie et al. (1993) no dejan de insistir en la necesidad de estudios sobre la influencia de la luminancia en la discriminación y cómo queda enmarcada ésta dentro de los actuales modelos de visión del color.

Todas estas cuestiones, y muchas otras que se pueden plantear, justifican sobradamente la ardua labor investigadora que se desarrolla actualmente en este campo y constituyen el punto de partida de este trabajo de investigación.

Por otra parte, el estudio de la discriminación cromática y la influencia que sobre la misma tienen las distintas condiciones de observación sigue siendo el objetivo de distintos grupos de investigación, entre ellos del Grupo de Óptica de Granada que desde que comenzó a mediados de los años 70 ha tenido en este campo su línea de investigación fundamental. A lo largo de estos aproximadamente 25 años se han ido analizando distintos parámetros; sin embargo, no se ha evaluado la influencia de la luminancia sobre la discriminación, cuestión ésta incluida en las recomendaciones que al respecto emitió la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), Robertson (1978), pues, aunque ya con anterioridad se habían realizado trabajos sobre ello, Brown (1951), se necesitan otros estudios que profundicen en el tema.

Por todo lo anterior, nos hemos fijado como objetivos fundamentales para este trabajo abordar estos aspectos, es decir, obtener los umbrales de discriminación de un amplio conjunto de estímulos que nos permitan analizar, de una parte, la influencia de la luminancia en los umbrales de discriminación

y, de otra, estudiar la discriminación cromática según los distintos mecanismos de la visión del color.

Para poder entrar a abordar estos dos grandes objetivos, se hace necesario plantear una serie de objetivos previos sin los cuales la consecución de aquellos se hace imposible. Éstos se refieren a un dispositivo experimental y un método de trabajo para llevarlo a cabo y, sobre todo, una elección adecuada de los estímulos a analizar. El dispositivo experimental debe poder proporcionarnos estímulos por todo, o la mayor parte, del diagrama CIE1931 y, además, para unas mismas coordenadas de cromaticidad poder obtener estímulos con diferente nivel de luminancia y, por supuesto, reproducibilidad, solidez y versatilidad. Respecto al método experimental nos encontramos con grandes dificultades a la hora de comparar resultados de distintos autores, ya que cada uno de ellos utiliza un método diferente; por ello, nos vamos a plantear analizar la influencia que pueda tener emplear distintos métodos experimentales sobre los resultados de discriminación cromática, sirviéndonos además este estudio para elegir, teniendo en cuenta los posibles condicionantes de nuestro dispositivo experimental, el más adecuado para nuestras experiencias. En cuanto a la elección de los estímulos, ésta será una cuestión primordial puesto que nos permitirá estudiar las muchas variantes que implican los objetivos generales comentados. Así, les exigiremos encontrarse sobre las líneas de confusión, de tal manera que eso nos permita evaluar la discriminación en un mecanismo cuando la excitación de otro permanezca constante.

De acuerdo con estos objetivos, hemos estructurado la presente memoria en una serie de capítulos que abordan e intentan reflejar cómo éstos han sido alcanzados. Así, en el capítulo 2, tras hacer un breve resumen de los modelos más actuales de la visión del color, hemos realizado una extensa revisión bibliográfica en el campo de la determinación experimental

de umbrales diferenciales de color, con especial detenimiento tanto en aquellos trabajos que pretenden estudiar la influencia de la luminancia de los estímulos, como en los que analizan los distintos aspectos de la discriminación cromática en cada uno de los mecanismos de la visión del color. Esto nos permitirá fijar los antecedentes que, sobre nuestros dos objetivos fundamentales, aparecen en la literatura.

Los tres objetivos previos imprescindibles antes comentados, dispositivo experimental, elección de estímulos a estudiar y método experimental a utilizar en nuestras medidas, son tratados en los capítulos 3 (el primero de ellos) y 4 (los otros dos). En el capítulo 3 se ha hecho una detallada descripción del dispositivo así como del calibrado del mismo, y en el siguiente, se han desglosado las condiciones de observación empleadas y se han presentado los estímulos elegidos, cuestión primordial para poder abordar adecuadamente la consecución de los objetivos. Además, en este mismo capítulo 4, se comparan diversos métodos experimentales para escoger el más apropiado para obtener nuestros umbrales de discriminación, y se expone el tratamiento de los resultados experimentales.

A continuación entraremos a presentar, analizar y discutir los resultados experimentales obtenidos, lo que llevamos a cabo en los capítulos quinto y sexto, intentando responder cada uno de ellos a los dos grandes objetivos planteados. Así, en el capítulo 5 abordaremos en profundidad el análisis y discusión en el sistema CIE1931, tanto en planos de luminancia constante, como cuando para unas determinadas coordenadas de cromaticidad varía la luminancia. En el sexto se realizará el análisis de la discriminación cromática en cada uno de los mecanismos de la visión del color. Dividiremos el capítulo en apartados en los que se tratará, primero, el estudio del umbral en el eje tritán y, después, el del umbral en el eje rojo-verde.

Por último, en el capítulo séptimo, resumiremos las principales aportaciones y conclusiones que, desde nuestro punto de vista, se derivan de este trabajo de doctorado indicando las puertas que quedan abiertas tras ellas, que podrían abordarse en futuras investigaciones.

Finalizaremos con la relación detallada de toda la bibliografía utilizada, capítulo 8, para la realización de esta memoria de doctorado.



**Capítulo 2: Modelos de visión del color.
Discriminación cromática**

2.- MODELOS DE VISIÓN DEL COLOR. DISCRIMINACIÓN CROMÁTICA

2.1.- Introducción

En este capítulo haremos una revisión de algunos trabajos que consideramos básicos a la hora de iniciar un estudio como el que pretendemos, un análisis de umbrales diferenciales de color interpretados tanto en el diagrama cromático CIE1931 como en el espacio de excitación de conos.

Para ello, hemos dividido el capítulo en tres apartados. El primero es una exposición de algunos de los modelos de visión del color que se han propuesto hasta el momento, cómo y de dónde surgen, y los diferentes espacios de excitación de conos, como el que usaremos para interpretar nuestros resultados, que de ellos se han derivado, haciendo especial hincapié en las últimas aportaciones en este campo. El segundo es una revisión de algunos estudios clásicos de discriminación cromática y

determinación de umbrales diferenciales de color en el diagrama CIE1931, destacando, fundamentalmente, aquellos trabajos en los que se analiza la influencia de la luminancia en la discriminación cromática. Por último, en el tercer apartado nos plantearemos analizar aquellos trabajos de discriminación cromática que han sido realizados con el objetivo fundamental de aportar nuevos datos sobre el sistema visual humano, lo que, así mismo, es el objetivo fundamental de este trabajo.

2.2.- Modelos de visión del color

La idea de espacios de cromaticidad (y de ahí a modelos de visión) basados en conceptos fisiológicos como la excitación de los conos data de Maxwell (1855) y Schrödinger (1925), pero es recientemente cuando se encuentra más en auge. En las primeras aproximaciones, el diagrama de cromaticidad se representaba como un triángulo equilátero con la excitación pico de los tres conos en los vértices y el acromático equienergético en su centro de gravedad. Pero esta representación, aunque intuitiva, se abandonó por la dificultad de trabajar en un espacio geométrico como éste.

2.2.1.- CURVAS FUNDAMENTALES DE RESPUESTA

El primer paso para la elaboración de un modelo de visión del color y para derivar un espacio cromático basado en la respuesta de los fotorreceptores (conos) es, precisamente, determinar las sensibilidades espectrales de éstos, es decir, lo que habitualmente se conocen como curvas de respuesta fundamentales o espectro de acción de conos.

Desde que en 1866 Helmholtz realizara un primer esbozo de las curvas de sensibilidad espectral, son muchos los trabajos que se han realizado para su determinación partiendo, en su mayoría, de datos obtenidos para sujetos con visión normal y defectiva del color. Así, por ejemplo, surgen las curvas de respuesta fundamentales obtenidas por König (1886, 1893, 1903), Wright (1946), Pitt (1944) o Stiles (1939). A modo de ejemplo, en la figura 2.2.1 se muestran las obtenidas por König (1903).

Otras curvas fundamentales han sido obtenidas desde entonces, como las de Vos y Walraven (1971), pero quizás las más importantes por la vigencia de la que todavía disfrutan son las curvas de espectro de acción de conos derivadas por Smith y Pokorny (1975), basadas en datos del laboratorio Wright, Wright (1952), Pitt (1944).

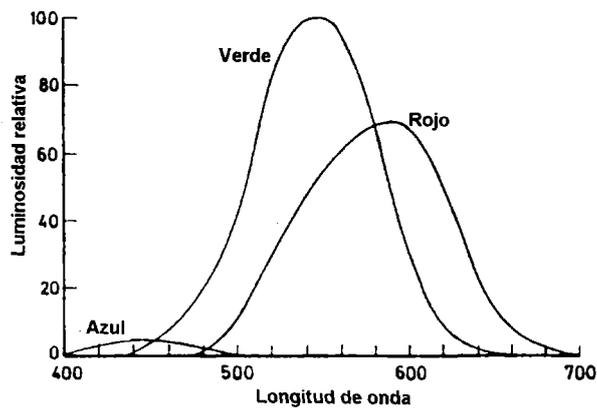


Fig. 2.2.1.- Curvas de respuesta fundamentales derivadas por König (1903).

La transformación propuesta por Smith y Pokorny (1975) es un conjunto de ecuaciones que relaciona los valores triestímulos de estímulos monocromáticos de energía unidad referidos a la excitación de los fotorreceptores a lo largo de todo el espectro visible, valores llamados funciones de mezcla $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$, con los mismos valores revisados por Judd (1951), $\bar{x}_J(\lambda)$, $\bar{y}_J(\lambda)$, $\bar{z}_J(\lambda)$, referidos a los primarios del diagrama CIE.

$$\begin{pmatrix} \bar{l}(\lambda) \\ \bar{m}(\lambda) \\ \bar{s}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15516 & 0.54307 & -0.03287 \\ -0.15516 & 0.45692 & 0.03287 \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}_J(\lambda) \\ \bar{y}_J(\lambda) \\ \bar{z}_J(\lambda) \end{pmatrix}$$

La transformación descrita se encuentra normalizada, de modo que los fundamentales L y M sumaran la función de eficiencia luminosa, así que también debe ocurrir que $\bar{y}_J(\lambda) = \bar{l}(\lambda) + \bar{m}(\lambda)$.

En esta transformación, el valor del fundamental L en su máximo es 0.6373, y el de M, 0.3924. La figura 2.2.2 muestra los fundamentales de Smith y Pokorny (1975) renormalizados a sus picos y dibujados en un eje logarítmico. Las principales características de estas curvas son:

- Los conos L y M son sensibles al espectro visible completo, con una sensibilidad máxima aproximadamente en 565 y 540 nm, respectivamente.

- En las longitudes de onda largas, la sensibilidad del cono L es mucho mayor que la del cono M.

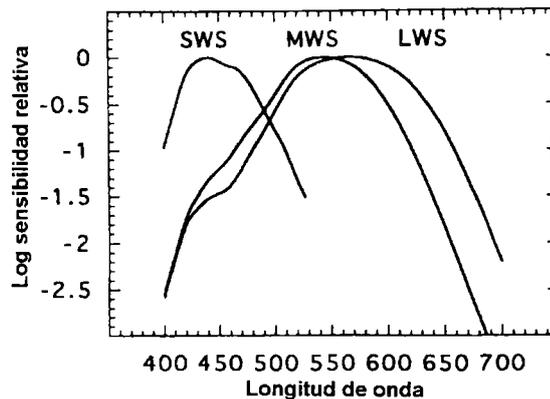


Fig. 2.2.2.- Curvas de espectro de acción de conos derivadas por Smith y Pokorny (1975).

- El cociente de la excitación de los conos M y L

es máximo en aproximadamente 465 nm; para cada longitud de onda menor de 465 nm hay otra mayor tal que, ajustada la luminancia, corresponderían a estímulos que serían vistos iguales por personas que careciesen de conos S.

- El espectro de acción de los conos S tiene el máximo aproximadamente en 440 nm, descendiendo rápidamente para largas longitudes de onda de forma que, para supuestos prácticos, los conos S son insensibles más allá de 520 nm.

2.2.2.- DIAGRAMAS DE CROMATICIDAD

Existen múltiples propuestas para representar estímulos de color, pero los más en boga actualmente son los basados en la fisiología, es decir, los espacios basados en la excitación de los conos L, M y S. El interés en estos diagramas de cromaticidad basados en la fisiología aumenta día a día, sobre todo cuando su uso es recomendado por autores como Smith y Pokorny (1996) y Boynton (1996), que estiman que estos diagramas son más convenientes para realizar cálculos con estímulos reales y, además, no encubren la relación existente entre las excitaciones de los conos, como ocurre con los diagramas CIE.

Aunque los antecedentes en este tipo de diagramas nos puede llevar a los propuestos por Luther (1927) y Fry (1935), analizaremos aquí dos, el propuesto por MacLeod y Boynton (1979) y el de Derrington et al. (1984). Todos ellos, como hemos indicado, son diagramas de cromaticidad a luminancia unidad, representando en sus ejes la excitación de lo que Krauskopf et al. (1982) denominaron ejes cardinales de la visión del color.

MacLeod y Boynton (1979) propusieron un plano rectangular a luminancia constante, como se ve en la figura 2.2.3, en el que los autores supusieron que la excitación del cono S no contribuye a la luminancia. en este diagrama el eje horizontal representa el

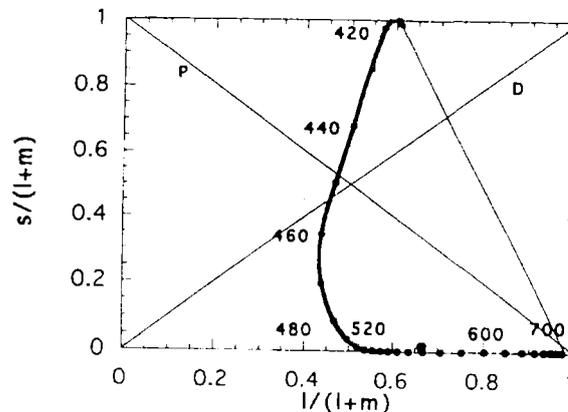


Fig. 2.2.3.- Diagrama rectangular de cromaticidad propuesto por MacLeod y Boynton (1979).

intercambio de valores a luminancia constante de l y m , es decir, que un incremento del valor de l se corresponde con una disminución igual del de m , pero manteniendo siempre que la suma de los dos sea la unidad, y el eje de ordenadas representa un cambio de la excitación del cono S normalizada.

Algo más tarde aparece el concepto de troland como unidad de iluminación retiniana. Como en la transformación de Smith y Pokorny, los fundamentales L y M suman Y , y podemos definir bien los L - y M -trolands. Sin embargo, la definición de los S -trolands no es tan obvia, ya que los conos S no contribuyen a la luminancia. Boynton y Kambe (1980) propusieron que 1 troland de un blanco equienergético tuviese 1 S -troland, utilizando para esta definición de troland la $V_j(\lambda)$ revisada por Judd.

Otro tipo de espacios de excitación de conos son aquellos en los que se incluye una normalización al blanco, con lo que éste tendría coordenadas $(0,0)$. En esta normalización, las coordenadas l y s se recalcularon como $(l-l_w)$ y $(s-s_w)$, donde el subíndice "w" se refiere al blanco escogido, usualmente el equienergético. Un diagrama de éstos es el propuesto por Derrington et al. (1984). La importancia de este diagrama en visión radica en que es consistente con la oponencia espectral de los canales parvocelulares de la retina de los primates y el cuerpo geniculado lateral. La figura 2.2.4 muestra este espacio de excitación de conos, en el que la línea discontinua gruesa es una porción del lugar espectral.

Como indicamos antes, esta normalización al blanco conlleva la importante suposición de que los tres tipos de conos están adaptados a la cromaticidad del blanco. Para el eje S , 1 troland se define igual a 1 troland fotópico para el estímulo equienergético. Además, en un plano de igual luminancia, Y es constante. Entonces:

$$(s - s_w) = (s - y) = [s - (l + m)]$$

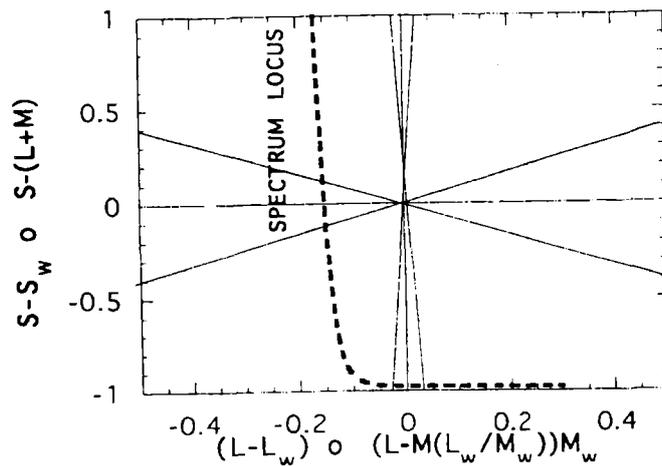


Fig. 2.2.4.- Diagrama de cromaticidad propuesto por Derrington, Krauskopf y Lennie (1984).

Para el eje L, se puede ver que de la misma manera:

$$(l-l_w) = [l - m(l_w)/m_w] \cdot [m_w]$$

Derrington et al. (1984) llamaron ejes nulos a la dirección en este diagrama en las que una variación cromática a luminancia constante no provocaba respuesta en la célula del canal parvocelular. El análisis de estudios sobre las respuestas cromáticas parvocelulares lleva a que aquellas células cuyo eje nulo coincide con el eje S-Y reciben una entrada de tipo oponente de los conos L y M, y aquellas cuyo eje nulo coincide con el L-L_w reciben la entrada de los conos S opuesta a una suma de las señales de los conos L y M.

2.2.3.- MODELOS ACTUALES DE VISIÓN DEL COLOR

Son múltiples los modelos de visión del color que han surgido hasta el momento intentando explicar una serie de fenómenos, sin que ninguno de ellos lo haga totalmente. Por eso nos vamos a limitar a describir algunos de ellos, los más desarrollados fisiológica y cuantitativamente.

2.2.3.1.- Modelo de Hurvich-Jameson (1957)

En la figura 2.2.5 tenemos un esquema de este modelo desarrollado por Hurvich y Jameson (1957).

Podemos distinguir en este modelo una primera etapa con tres tipos de conos (fotorreceptores) con máximos de sensibilidad espectral en regiones diferentes del espectro visible, y una segunda etapa que consta de dos mecanismos oponentes, un proceso rojo-verde (T) y otro azul-amarillo (D), y un mecanismo de luminancia no oponente (A).

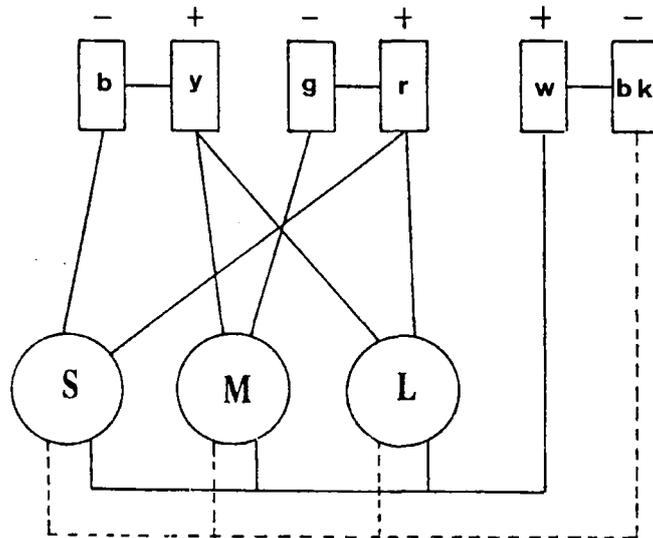


Fig. 2.2.5.- Modelo de Hurvich-Jameson (1957).

Hay que señalar que en este modelo los conos S contribuyen en el mecanismo T rojo-verde, lo que no sucede en otros modelos que veremos más adelante. La suposición de esta contribución de los conos S se ve apoyada por otros trabajos, como los de Boynton et al. (1964) y Jameson y Hurvich (1955).

Otras de las características de este modelo es que los autores suponen que los tres tipos de fotorreceptores contribuyen a la luminancia, aunque trabajos posteriores como el de Eisner y MacLeod (1980) no encuentran evidencias de la participación de los conos S al mecanismo de luminancia.

Desde un punto de vista cuantitativo, este modelo de visión del color podría describirse a través de las respuestas de los fotorreceptores en términos de los valores triestímulo de la CIE1931, que serían:

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 6.5341 & 0.1336 \\ -0.3368 & 7.0009 & 0.0020 \\ 0.3329 & 6.4671 & -0.1347 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

y también a través de la transformación receptor-mecanismo, que viene dada por:

$$\begin{pmatrix} A \\ T \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.85 & 1.50 & 0.01 \\ 1.66 & -2.23 & 0.37 \\ 0.34 & 0.06 & -0.71 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}$$

2.2.3.2.- Modelo de Guth et al. (1980) y revisión de Guth (1991)

Este modelo de Guth et al. (1980) es en principio muy parecido al descrito anteriormente de Hurvich y Jameson (1957). También consta de una primera etapa con tres tipos de fotorreceptores y una segunda con tres tipos de mecanismos: uno rojo-verde (T), otro azul-amarillo (D), y uno de luminancia (A). Este modelo se diferencia del anterior en que no supone contribución ninguna de los conos S al sistema de rojo-verde (T), lo que se puede observar en el esquema del modelo de Guth et al. (1980) mostrado en la figura 2.2.6. Esta suposición se ve apoyada por estudios del propio autor, Guth et al. (1969), y también por otros como Krauskopf et al. (1982).

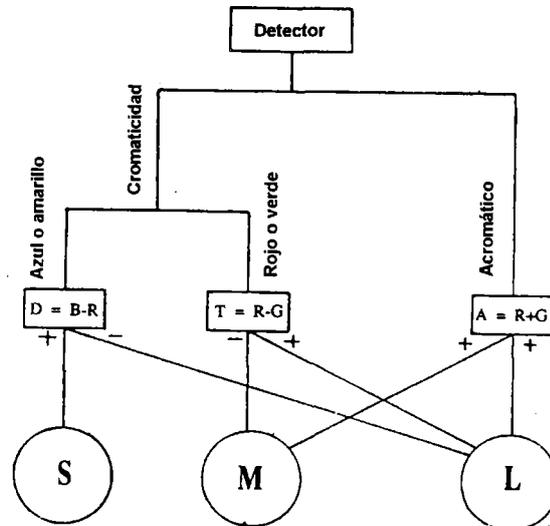


Fig. 2.2.6.- Modelo de Guth et al. (1980).

En este modelo tampoco los conos S sensibles a longitudes de onda cortas participan en el mecanismo de luminancia, al contrario de lo que ocurría en el modelo de Hurvich y Jameson (1957). Ya comentamos en el apartado previo que trabajos como el de Eisner y MacLeod (1980) no encuentran evidencias de que los conos S contribuyan a la luminancia.

Según este modelo de Guth et al. (1980), las ecuaciones que describen las respuestas de los fotorreceptores en términos de los valores triestímulos de la CIE1931 revisados por Judd es de la forma:

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2435 & 0.8524 & -0.0516 \\ -0.3954 & 1.1643 & 0.0837 \\ 0 & 0 & 0.6220 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$$

y la transformación receptor a mecanismo es:

$$\begin{pmatrix} A \\ T \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5967 & 0.3654 & 0 \\ 0.9553 & -1.2836 & 0 \\ -0.0248 & 0 & 0.0483 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}$$

Unos años más tarde el autor hace una revisión de su propio modelo, y propone el conocido como CA90, Guth (1991), cuyo esquema se muestra en la figura 2.2.7.

En este nuevo modelo la información neural de cada cono se combina primero con un ruido, definido como una constante aditiva de valor 0.00004, y luego es atenuada por un mecanismo de control de ganancia. La ecuación que Guth (1991) propone para el control de ganancia es consistente con las reglas de control de ganancia sugeridas por Geisler (1975), y se expresaría como:

$$N' = N \cdot \left[1 - 0.99 \left(\frac{N}{\sigma + N} \right) \right]$$

donde N es la respuesta inicial de un receptor, L, M o S, más el ruido, N' es la respuesta tras la atenuación y σ es un número positivo, que en el trabajo de este autor es igual a 0.05.

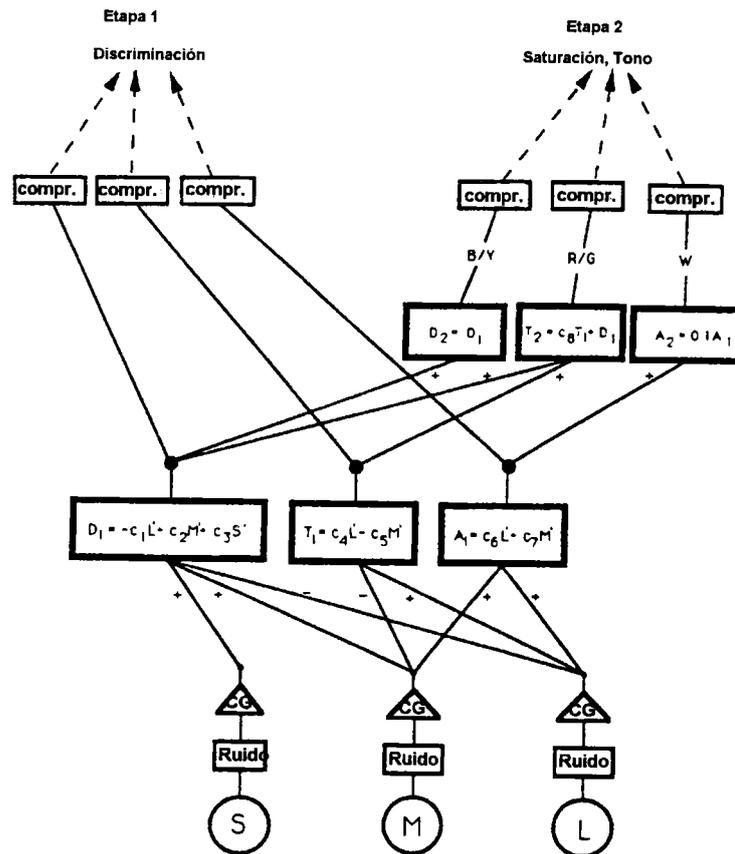


Fig. 2.2.7.- Modelo de Guth (1991).

Las señales más el ruido ya atenuadas alimentan los mecanismos oponentes y el no oponente T, D y A, lo que constituiría la primera etapa del nuevo modelo. La ecuación que describe este mecanismo es:

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ T_1 \\ D_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4200 & 0.3108 & 0 \\ 0.8845 & -0.7258 & 0 \\ -0.0770 & 0.0130 & 0.0910 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{pmatrix}$$

donde L' , M' y S' no son las señales directas de los conos, sino éstas más el ruido y la atenuación del control de ganancia.

En términos generales, esta ecuación define un proceso similar al del modelo anterior de Guth et al. (1980). La mayor similitud es que T_1 no tiene contribución de los conos S.

Las señales resultantes de estos mecanismos sufren una compresión no lineal, concepto cuya utilidad ha sido documentada en algunos trabajos, Geisler (1981), Hayhoe et al. (1987), del tipo:

$$F_f = \frac{F}{0.008 + |F|}$$

donde F es la señal de salida de cada mecanismo antes de la compresión, y F_f la señal ya comprimida.

Las señales A_{1f} , T_{1f} y D_{1f} , o sea, las señales A_1 , T_1 y D_1 comprimidas, son las encargadas de la discriminación y de otros juicios sobre el estímulo.

En este modelo existe también una segunda etapa, con mecanismos A_2 , T_2 y D_2 cuyas entradas son las salidas de la primera etapa antes de la compresión, es decir:

$$A_2 = 0.10 \cdot A_1$$

$$T_2 = 0.388 \cdot T_1 + D_1$$

$$D_2 = D_1$$

Las señales de esta segunda etapa también son comprimidas exactamente igual que lo fueron las de la primera etapa. Esta segunda etapa se encarga, por ejemplo, de la saturación y el tono.

2.2.3.3.- Modelo de Boynton (1986)

Este modelo propuesto por Boynton (1986) está de acuerdo con los modelos de visión del color más recientes. Un esquema del mismo se presenta en la figura 2.2.8, y de él podemos destacar la existencia de tres

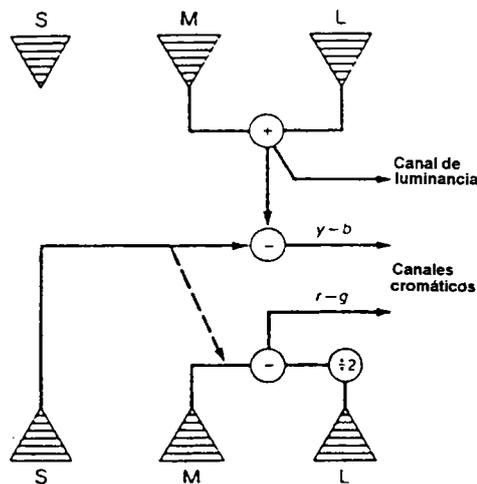


Fig. 2.2.8.- Modelo de Boynton (1986).

tipos de conos cuya máxima sensibilidad está en las longitudes de onda cortas (S), medias (M) y largas (L). Estas señales procedentes de los conos son más tarde combinadas en dos canales cromáticos oponentes y en uno de luminancia. De la existencia de estos canales se han encontrado evidencias experimentales en trabajos como los de Boynton (1982) y Thornton y Pugh (1983).

Al canal de luminancia contribuyen las señales de los conos L y M, por lo que la luminancia será $L+M$, sin contribución de los conos S y siempre positiva. Las señales de estos dos conos también contribuyen a uno de los dos canales cromáticos oponentes, pero el cono L contribuye en éste la mitad que en el canal de luminancia, por lo que este canal cromático se especifica como $L-2M$. La justificación a esto la podemos ver en una gráfica que además de representar los espectros de acción de conos de Smith y Pokorny (1975) tenga una curva de $L/2$, figura 2.2.9. Sabemos que la longitud de onda de 575 nm es la del amarillo único, lo que indica que para ese valor el canal oponente rojo-verde se halla equilibrado, es decir, que la contribución de los conos L es igual a la de los M. Si observamos la figura, vemos que este equilibrio a 575

nm lo alcanzan las curvas de L/2 y M. En la figura 2.2.8 también se puede ver una línea discontinua que representa una pequeña influencia de los conos S sobre el balance del canal rojo-verde L-2M.

El otro canal de tipo oponente es el llamado azul-amarillo. Este canal recibe una señal con signo negativo desde valores relativamente pequeños del cono S y una señal de largas longitudes de onda desde la suma de los conos L y M. Los conos S casi no responden para longitudes de onda medias y largas, con lo que la señal se interpretaría como amarillo. Si las longitudes de onda son cortas, la señal de S es mayor que la de L+M, lo que se interpretaría como un azul.

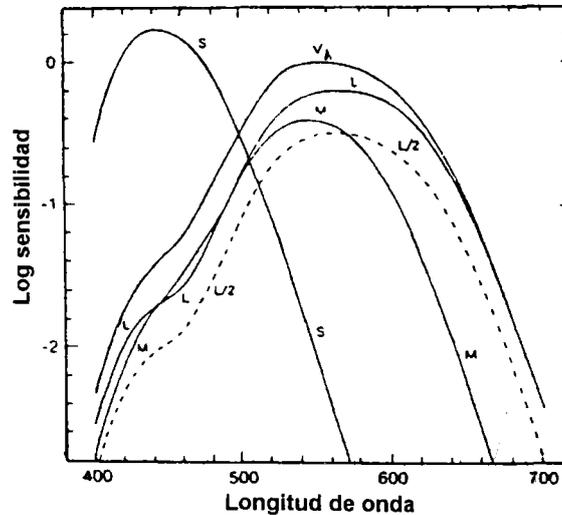


Fig. 2.2.9.- Curvas de espectro de acción de conos derivadas de Smith y Pokorny (1975).

2.2.3.4.- Modelo de de Valois & de Valois (1993)

Este modelo es uno de los más actuales, muy desarrollado fisiológicamente, y surge de la cantidad de evidencias psicológicas, psicofísicas y perceptuales que muestran que los modelos más simples no pueden explicar todos los fenómenos visuales relacionados con el color. Además, incorpora información actual sobre la anatomía retiniana y explora el alcance que unas conexiones esencialmente aleatorias pueden tener en una organización sensible al color.

Las dos primeras etapas de este modelo son similares a las de los anteriores: una primera etapa que consiste en la absorción de luz por los conos, que contienen diferentes fotopigmentos; y una segunda etapa, que tiene lugar en la retina, en la que dos tipos diferentes de células bipolares (oponentes y no oponentes) recogen la señal de los conos.

La novedad de este modelo está en una tercera etapa en la que se suman en diferentes combinaciones las salidas de los seis tipos de núcleos geniculados laterales parvocelulares que estos autores sugieren. Los distintos modos en los que se puede llevar a cabo esta sumación lleva a la separación de color y luminancia.

La etapa final de este modelo consiste en lo que se llama células selectivas de color. Una evidencia que apoya la existencia de esta cuarta etapa es que la mayoría de las células de las últimas regiones parecen ser células complejas. Distintos investigadores suponen que las "células de color" son todas células oponentes como las del cuerpo geniculado lateral, acentuando algunas longitudes de onda e inhibiendo otras. De Valois & de Valois (1993) sugieren que estas células simplemente "colaboran" en algunas

regiones espectrales selectivas y no dan respuesta en otras; aunque proponen que las células en esta cuarta etapa, por ejemplo, ayudan al rojo y al verde, éstas estarán siempre en relación oponente, nunca ayudando ambos al mismo estímulo. La oponencia cromática en esta etapa está entre, no en, células individuales.

2.3.- Discriminación cromática

El sistema propuesto por la CIE en 1931 ha sido desde entonces uno de los diagramas cromáticos más importantes y utilizados dentro de la investigación en colorimetría, a pesar de algunos de los inconvenientes que presenta, por ejemplo, su no uniformidad. Desde entonces, casi todos los trabajos dentro de este campo han mostrado sus resultados en este sistema, por lo que siempre son interesantes las representaciones en este diagrama para comparar con resultados clásicos en la literatura. Es en estos primeros trabajos donde se empieza a usar el concepto de umbral de discriminación, es decir, la región del espacio fuera de la cual los colores representados son claramente diferentes con respecto a uno dado.

En los primeros trabajos en discriminación cromática se realizan las experiencias tomando como variable un solo parámetro. Como ejemplo, se tienen los de Martin et al. (1933) y Priest y Brickwedde (1938), en los que el parámetro variable es la pureza, o el trabajo de McCree (1960), en el que el autor estudiaba la discriminación en longitud de onda.

Pero el primero de estos trabajos que se toma como referencia es el de Wright (1941), que estudiaba la discriminación cromática en todo el diagrama. En sus experiencias se partía de una igualdad previa sobre la que el observador actuaba variando uno de los semicampos hasta que notaba diferencias perceptibles entre las dos mitades que formaban el campo bipartito de observación. La discriminación se analizó a lo largo de 35 líneas en el diagrama, y las variaciones eran siempre a la misma luminancia. En la figura 2.3.1 se muestran los resultados de estas experiencias, y en ella se puede ver una de las características más importantes del diagrama cromático CIE1931 y que apuntábamos al principio del apartado: la falta de uniformidad.

Un poco más tarde surge el trabajo de MacAdam (1942), en el que las comparaciones no se realizaban entre estímulos situados en una línea determinada, sino que el estímulo de referencia era comparado con otros de su alrededor, en distintas direcciones del diagrama. Las experiencias de este trabajo las llevó a cabo un solo observador, que era a su vez el que controlaba los mandos del colorímetro,

aspecto éste muy criticado posteriormente ya que los umbrales calculados podían verse afectados, hasta conseguir igualaciones de color con un campo circular de 2° y luminancia de 48 cd/m^2 , constante a lo largo del trabajo, rodeado de un campo iluminado por el iluminante C con luminancia de 24 cd/m^2 . Este uso de un campo adaptante fue abandonado por la mayoría de los investigadores posteriores, pero como describiremos más adelante, algunos autores han ofrecido datos experimentales que recomiendan su uso.

El único observador participante en las experiencias realizaba varias igualaciones en una misma dirección, y tomaba como medida del umbral de discriminación en esa dirección la desviación típica de las medidas obtenidas. Los umbrales calculados sobre todas las direcciones analizadas alrededor de cada estímulo se ajustaron a una elipse. A pesar de trabajar con un solo observador y un solo nivel de luminancia, esta trabajo goza de una gran importancia que radica en abandonar el "umbral de línea", adoptando el contorno elíptico como representativo del umbral de cromaticidad. Este ajuste

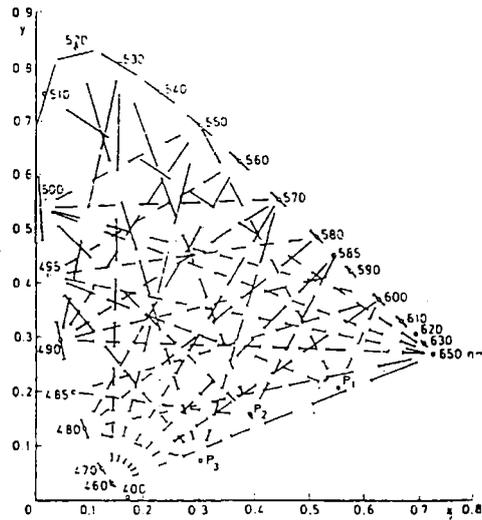


Fig. 2.3.1.- Resultados experimentales de Wright (1941).

elíptico como umbral de discriminación cromática ha sido discutido varias veces, Hita et al. (1982-b), por no creer adecuado el uso de una métrica de

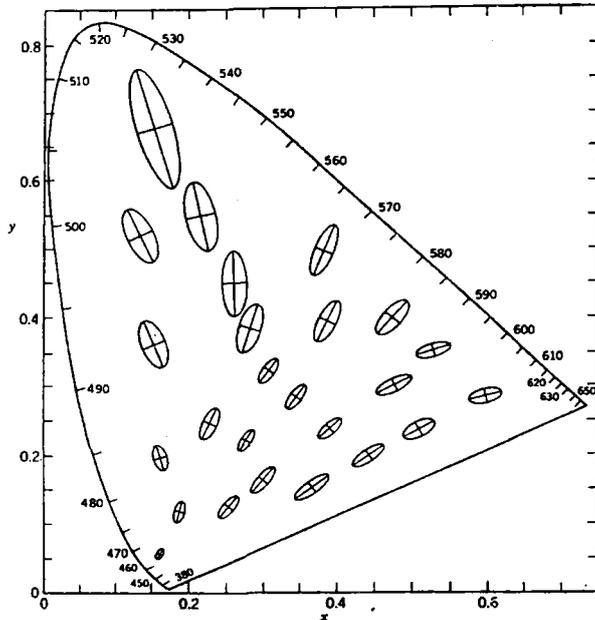


Fig. 2.3.2.- Resultados experimentales de MacAdam (1942), aumentados 10 veces.

Riemann para el espacio de color, pero algunos autores como Knoblauch y Maloney (1996) han desarrollado métodos para detectar las desviaciones de los umbrales de discriminación respecto a las elipses, llegando a la conclusión de que no se puede rechazar la hipótesis de que las superficies de igual discriminación, a luminancia constante, son

elipses. En la figura 2.3.2 aparecen los resultados experimentales de MacAdam (1942), aumentados 10 veces para facilitar su visión.

A estos trabajos se le pueden hacer críticas por varias razones, entre ellas trabajar a luminancia constante, y sobre todo obtener resultados para un solo observador, o porque fuera éste el que actuaba también sobre la igualación de color, de modo que los resultados podían no ser totalmente objetivos. Así pues, los siguientes trabajos más conocidos sobre discriminación cromática, muchos de ellos realizados por los mismos autores, intentaron paliar esas faltas. Uno de estos trabajos es el de Brown y MacAdam (1949), que añadía un observador más a las experiencias, hecho que no sirvió de mucho ya que las diferencias entre los resultados de cada uno de los observadores era tan grande que resultaba difícil generalizarlos.

Los dos observadores obtuvieron umbrales para 38 estímulos con luminancias diversas, desde 2 hasta 34 cd/m^2 , en un dispositivo experimental con un campo circular bipartito de 2° y campo circundante oscuro. Las luminancias a las que se analizaron cada estímulo eran diferentes, por lo que no se pudo llevar a cabo un análisis claro de los umbrales de

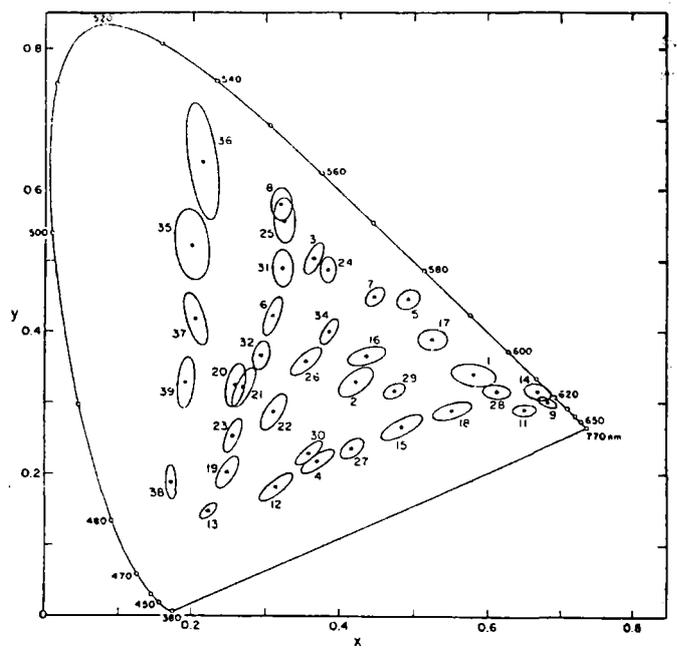


Fig. 2.3.3.- Resultados experimentales de Brown y MacAdam (1949) para el observador WRJB, 10 veces aumentados.

discriminación frente a la luminancia. En la figura 2.3.3 se pueden ver los resultados para el observador WRJB en el trabajo de Brown y MacAdam (1949), 10 veces aumentados.

Para obtener resultados generalizables, Brown (1957) realiza un nuevo trabajo, esta vez con 12 observadores. Para todos ellos se calcularon umbrales de 22 estímulos con luminancias desde 10.3 hasta 20.6 cd/m^2 , con un campo circular bipartito de 10° , más grande de lo habitual en este tipo de estudios, y un campo circundante acromático de 9 cd/m^2 . Nuevamente nos encontramos que cada par de coordenadas se analizó con un nivel de luminancia diferente, con lo que aunque el parámetro luminancia es variable en estas experiencias, resulta imposible hacer un análisis riguroso de su influencia sobre las elipses de discriminación.

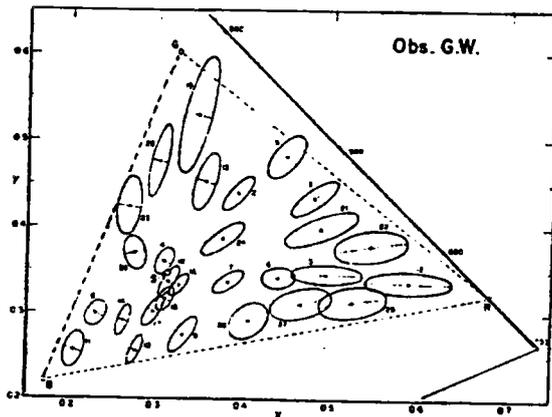


Fig. 2.3.4.- Resultados experimentales de Wyszecki y Fielder (1971) para el observador GW.

Algo más actual, aunque también ya un clásico en colorimetría, es el trabajo de Wyszecki y Fielder (1971). Los umbrales se calcularon para 28 estímulos y 3 observadores, y una luminancia de aproximadamente 12 cd/m^2 . Las igualaciones se realizaban observando dos campos hexagonales yuxtapuestos de 3° cada uno, rodeados por un

campo blanco de 6 cd/m^2 y un diámetro de 40° . Debido al conjunto de primarios utilizados, la zona del diagrama cromático estudiada es más reducida que la de trabajos anteriores, lo que representa una restricción para la generalización de resultados. Y además, de nuevo encontramos que todos los umbrales fueron calculados a luminancia constante, lo que restringe todavía más esta generalización.

Una vez realizadas las experiencias, el ajuste elipsoidal de los datos obtenidos se llevó a cabo de modo que el 95% de las igualaciones de color realizadas quedasen dentro del elipsoide de discriminación. En la figura 2.3.4 se observan los resultados experimentales, ya ajustados a elipses, de Wyszecki y Fielder (1971) para el observador GW.

En nuestro laboratorio también se han realizado múltiples experiencias de discriminación cromática, como las de Romero et al. (1993). En este trabajo se calcularon umbrales de discriminación para 3 observadores y 20 estímulos distribuidos por todo el diagrama cromático CIE1931 a lo largo de líneas de confusión tritán y rojo-verde. Estos estímulos, todos ellos de

luminancia constante igual a 12 cd/m^2 , aparecían en una de las mitades de un campo circular bipartito que sustentaba 2° , y en la otra mitad el estímulo considerado de referencia, todo ello en un campo circundante oscuro.

Al observador se le fue presentando de modo aleatorio una serie de

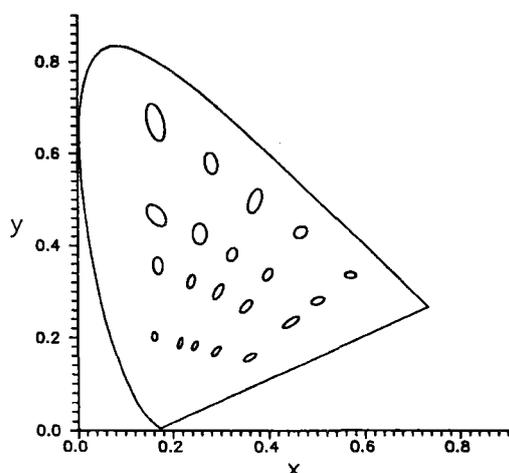


Fig. 2.3.5.- Resultados experimentales de Romero et al. (1993) para el observador JA.

estímulos variables alrededor del de referencia, ante lo que debía responder "sí" o "no" dependiendo de si veía igual o no los dos estímulos. Luego, a esta nube de estímulos variables se le ajustaba un elipsoide de discriminación, que al trabajar a luminancia constante quedaba reducido a una elipse. En la figura 2.3.5 se muestran los resultados experimentales obtenidos por estos autores para el observador JA.

Al analizar los resultados obtenidos, Romero et al. (1993) observaron que las elipses tendían a alinearse sobre la línea de confusión tritán correspondiente, sobre todo las elipses de estímulos situados sobre las líneas tritán con una orientación alrededor de 60° , mostrando que el sistema visual humano es menos sensible a la discriminación amarillo-azul. En los valores de las relaciones de semiejes notaron una gran variabilidad; sin embargo, observaron que las elipses más alargadas correspondían normalmente a estímulos situados en la zona de los azules, y las más redondeadas a estímulos en la zona de los naranjas-rojos. En cuanto a las áreas de las elipses, las de estos autores son mucho mayores, unas 100 veces más, que las de trabajos como los de MacAdam (1942) y Brown y MacAdam (1949). No obstante, en todos los trabajos queda claro que las elipses de menor área

son las de estímulos en la zona azul del diagrama y las de mayor área en la verde, lo que en principio se puede asociar a las características de definición del diagrama CIE1931.

Tras los múltiples experimentos de discriminación cromática, estaba claro que existían diferentes parámetros que tenían efectos sobre los umbrales de discriminación. Las primeras recomendaciones oficiales para que se estudiaran la influencia de diferentes parámetros sobre la discriminación cromática las hizo Robertson (1978). No obstante, antes de esto, algunos autores analizaron varias de estas influencias. Por ejemplo, Brown (1952) analizó el efecto del tamaño del campo y la cromaticidad del campo circundante sobre los elipsoides de igualación de color. Las principales conclusiones que se extrajeron son que el efecto del tamaño del campo más pequeño es agrandar las elipses de discriminación cromática sin cambiar la orientación.

Conclusiones parecidas obtuvimos en nuestro laboratorio, García et al. (1993-b), cuando calculamos los umbrales de discriminación de 5 estímulos situados en zonas bien diferenciadas del diagrama cromático susteniendo campos de 2 y 8° y una luminancia de 12 cd/m². En el diagrama CIE se observó una mejora en la discriminación para campos grandes, lo que implicaba una disminución del área de las elipses. Así mismo, también existía un aumento en la relación de semiejes, con lo que la mejora en la discriminación comentada venía dada fundamentalmente por una disminución del semieje mayor de las elipses. Además, por la particular distribución de los estímulos en el diagrama cromático (sobre líneas de confusión tritán y rojo-verde), se interpretaron los resultados en un espacio de excitación de conos, encontrando que el umbral en el mecanismo tritán disminuye para campos mayores, lo que se debe a la no uniforme distribución de conos S en la retina. En cuanto al umbral del mecanismo rojo-verde, éste también mejora

para el campo de 8°, pero esta mejora es mucho menos significativa que la que se observa en el mecanismo tritán.

Como podemos ver de la revisión de todos los trabajos anteriormente descritos, casi todos ellos han trabajado con luminancia constante, y los que lo han hecho con luminancia variable ha sido en condiciones tales que impiden un análisis claro de la influencia de la luminancia sobre la discriminación. Es Brown (1951) uno de los primeros que intenta abordar este análisis, pero al final también resulta difícil generalizar sus resultados. En este trabajo calculó umbrales de discriminación para tan solo 3 estímulos que se presentaban en un campo bipartito susteniendo 2° desde el ojo del observador, que era el que manipulaba una de las mitades del campo hasta obtener la igualación. El rango de luminancias iba desde menos de 1 hasta 30 cd/m², con la particularidad de que para cada estímulo las luminancias estudiadas eran diferentes. Sus principales conclusiones fueron que las elipses se agrandaban y tendían a orientarse sobre la línea tritán cuando el nivel de luminancia se hacía más bajo. Este agrandamiento de las elipses que Brown (1951) observó era mucho más claro para las luminancias muy por debajo de 1 cd/m², manteniéndose las elipses correspondientes a niveles de luminancia mayores muy parecidas entre sí. Sin embargo, con estos resultados no se puede saber claramente si es necesario que la luminancia disminuya tanto para que las elipses se agranden, o si ese efecto se puede observar a bajas luminancias pero no tan bajas como él propone.

Además de los parámetros que ya hemos mencionado, también afectan al umbral de discriminación otros parámetros experimentales que han sido analizados por diversos autores, como el tiempo de exposición de los estímulos, Hita et al. (1982-a), el tipo de fusión de primarios, Hita et al. (1979), el modo de comparación entre estímulos, Uchikawa (1983), Romero et al. (1986), grado de metameroismo, Hita et al. (1986), Jiménez del Barco et

al. (1988, 1994) y el modo de presentación (modo apertura/ objeto), Melgosa et al. (1996).

En los últimos años se han realizado trabajos que si bien no analizan propiamente umbrales de discriminación cromática, resultan interesantes por las conclusiones a las que llegan y que son útiles a la hora de comentar nuestro resultados. Uno de estos trabajos es el de Burns y Elsner (1985), en el que 11 observadores variaban una mezcla rojo (650 nm)-verde (546 nm) hasta igualarla a un amarillo espectral. Como parámetros experimentales tuvieron los tamaños de campo (1, 2, 4 y 8°) y un amplio rango de iluminaciones retinianas (de 260 a 260000 td, valores mucho más altos que los usados normalmente en colorimetría), obteniendo los siguientes resultados:

- A las iluminaciones retinianas más bajas de las utilizadas (de 260 a 5500 td) la igualación depende del tamaño del campo pero no de la iluminación retiniana.

- Por encima de 5500 td la igualación de color requiere progresivamente mayor proporción del primario 650 nm, hasta alrededor de 90000 td. Más allá de este valor parece que el incremento de la iluminación retiniana no causa efecto sobre la igualación de color.

- A pesar de la elevada variabilidad interobservador, las luminancias a las que se producen los cambios mencionados son similares para todos los observadores.

2.4.- Discriminación cromática en espacios de excitación de conos

En los últimos años, muchos de los trabajos sobre discriminación cromática realizados tienen como propósito el relacionar los umbrales de cromaticidad obtenidos con los modelos de visión del color e interpretar los resultados mostrándolos en los espacios de excitación de conos derivados de estos modelos.

Como uno de los primeros ejemplos encontramos el trabajo de Boynton y Kambe (1980). Estos autores obtuvieron umbrales para cuatro observadores, presentándoles un campo circular bipartito de 2°, de iluminación retiniana constante e igual a 120 td, y campo circundante oscuro. Los umbrales se calcularon a lo largo de dos direcciones determinadas, importantes para relacionar los resultados con los modelos de visión de color: el eje tritán y el eje rojo-verde, es decir, las direcciones relacionadas con el mecanismo S y el L-2M, respectivamente, como vimos anteriormente al exponer algunos de los diferentes modelos propuestos hasta el momento.

Las dos principales conclusiones de este trabajo de Boynton y Kambe (1980) son:

- La discriminación dependiente del cono azul está afectada por el nivel de excitación de dicho cono (S), y es independiente del nivel de excitación R/G. Los resultados son ajustados a una ecuación del tipo $\Delta S = 0.18(S + kS_0)$, donde S_0 tiene un valor de 44.5 td para los observadores de este trabajo, y k es una constante adimensional dependiente de cada observador. Con sus resultados se obtiene una fracción de Weber de aproximadamente el 18%.

- La discriminación dependiente del intercambio de la excitación de los conos rojo y verde tiene una fracción de Weber óptima del 2% aproximadamente. Esta razón aumenta algo con el desequilibrio del cociente rojo-verde y por un incremento del nivel de excitación del cono azul.

Como ya hemos señalado, Boynton y Kambe (1980) calcularon los umbrales de cromaticidad a lo largo de los ejes tritán y rojo-verde. Si en vez de hacer esto a lo largo de ejes cardinales, analizamos la discriminación en una dirección tal que en ella se produzca una variación en la excitación de ambos canales cromáticos, podríamos ver si la discriminación mejora o empeora si la excitación de ambos canales cromáticos aumenta o disminuye simultáneamente, o si mientras la de uno aumenta la del otro disminuye.

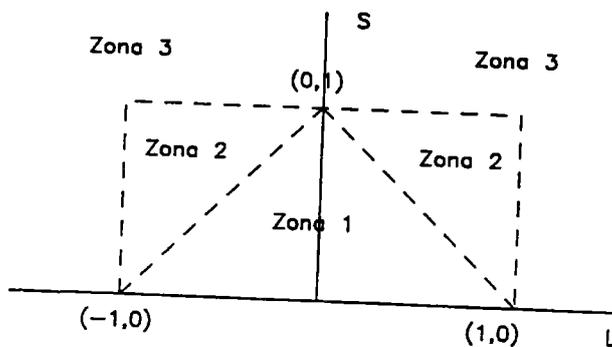


Fig. 2.4.1.- Diagrama de excitación de conos normalizado, Boynton et al. (1986).

En esta línea se encuentran las experiencias de Boynton et al. (1986). Con ellas, los autores obtuvieron para tres observadores elipses de discriminación de los cinco estímulos propuestos por la CIE. Los estímulos se presentaban en un campo

rectangular bipartito de $0.5 \times 1.5^\circ$ separado por una línea negra de $11'$, con una iluminación retiniana de 25 td (equivalente a una luminancia de unas 2 cd/m^2), y un campo circundante acromático con iluminación retiniana de 0.1 td (alrededor de 0.003 cd/m^2). Para analizar la influencia de un canal cromático sobre otro, Boynton et al. (1986) realizaron una normalización de las elipses de discriminación en el espacio de excitación de conos, y las representan en

un diagrama de excitación de conos normalizado como el que se ve en la figura 2.4.1.

En el espacio de excitación de conos, la elipse de discriminación cromática responde a la forma:

$$\Delta E^2 = h_{11}\Delta L^2 + 2h_{12}\Delta L\Delta S + h_{22}\Delta S^2$$

donde $\Delta S = (S - S_c)$ y $\Delta L = (L - L_c) - 2(M - M_c)$.

Normalizar las elipses significa asignar la unidad al umbral en cada eje cardinal, y se podría hacer con el siguiente cambio de variable:

$$\Delta I = \Delta L \sqrt{h_{11}} \quad \text{y} \quad \Delta S = \Delta S \sqrt{h_{22}}$$

con lo que la ecuación de la elipse quedaría:

$$\Delta E^2 = \Delta I^2 + k_{12}\Delta I\Delta S + \Delta S^2$$

ecuación en la que $k_{12} = \frac{h_{12}}{\sqrt{h_{11}h_{22}}}$.

La elipse representada por esta ecuación tiene una orientación que depende del valor del coeficiente k_{12} . De este modo, si $k_{12} < 0$, la orientación de la elipse será de 45° , mientras que si $k_{12} > 0$, la elipse estará orientada a 135° . En el caso particular de que $k_{12} = 0$, la normalización de la elipse nos habría dado una circunferencia.

Cuando Boynton et al. (1986) representan sus resultados normalizados, se ve que éstos pueden ajustarse a elipses de discriminación independientes de la cromaticidad del estímulo de referencia, orientadas a 135° y muy elongadas, lo que les lleva a la conclusión de que los conos S

generan señales que, además de mostrar el nivel de excitación de S, también imitan las generadas por los conos L. Por tanto, incrementos o decrementos de S y L-2M juntos producen suma en sus efectos, ocurriendo la inhibición cuando uno de ellos se incrementa mientras que el otro disminuye. Sin embargo, si las elipses, igualmente elongadas, estuvieran orientadas a 45°, la suma de efectos de S y L-2M se produciría al aumentar uno y disminuir otro, mientras que el aumento o disminución simultáneo de la excitación de los dos canales sería lo que llevaría a la inhibición de un canal respecto a otro. En el caso de que las elipses fuesen poco elongadas, esto parecería indicar una independencia entre ambos canales a la hora de la discriminación.

Es importante señalar que los propios autores advierten que estas conclusiones no se pueden generalizar para niveles de luminancia más elevados que los utilizados por ellos, ya que los resultados se obtuvieron con una luminancia suficientemente baja (unas 2 cd/m², fuera del fotópico) con el fin de que el sistema visual se comportase de un modo más sencillo.

Sobre la influencia de un canal cromático sobre el otro, encontramos un estudio de Boynton et al. (1983) acerca de diversas fórmulas de diferencia de color. Según la mayoría de ellas, los cambios de cromaticidad simultáneos a lo largo de los ejes tritán y rojo-verde no deben afectar a la diferencia de color percibida; sin embargo, estos autores presentan datos que no están de acuerdo con estas predicciones que hacen las fórmulas.

Datos de nuestro laboratorio también fueron normalizados para analizar las posibles interacciones entre canales cromáticos, Yebra et al. (1994). Se calcularon umbrales para 25 estímulos, con luminancia constante e igual a 12 cd/m², que sustentaban un campo de 2°. También se calcularon los umbrales de 5 de esos estímulos con un campo de 8°. Tras la normalización propuesta por Boynton et al. (1986) de nuestras elipses, la

mayoría de éstas estaban orientadas a 135° y con una longitud de semiejes alrededor de 1, lo que muestra que casi una unidad es necesaria para discriminar en la dirección de ese semieje, sin tener en cuenta si la excitación de un canal cromático, o ambos, varía.

El hecho de que todas las elipses normalizadas sean aproximadamente círculos apoya la suposición de independencia entre los canales cromáticos a la hora de discriminar, o que si ésta existe, es muy débil.

Uno de los autores del trabajo que propuso la normalización participó en otro, Nagy et al. (1987), en el que resultados experimentales clásicos en colorimetría diferencial como los de MacAdam (1942), Brown y MacAdam (1949) y Wyszecki y Fielder (1971), fueron normalizados según su propuesta, Boynton et al. (1986). La mayoría de las 185 elipses normalizadas se orientaron a 135° , pero 151 tenían una relación de semiejes tal que pasaban por la llamada zona 2, y sólo 34 se encontraron en la zona 3, lo que está en claro desacuerdo con las conclusiones de Boynton et al. (1986), por lo que parece que estas nuevas normalizaciones apoyan la hipótesis de una cierta independencia entre los mecanismos S y L-2M al discriminar, lo que también se deduce de los resultados de Yebra et al. (1994) que describimos anteriormente.

Esta independencia también se ve apoyada por el trabajo de Krauskopf y Gegenfurtner (1992), una de cuyas experiencias sugiere que la discriminación parece estar regulada por mecanismos a lo largo de los ejes cardinales e independientes en su respuesta. Otra de las experiencias llevadas a cabo en este trabajo, cuyas condiciones experimentales describiremos con más detalle en un capítulo posterior (en resumen, cuatro círculos inscritos en las esquinas de un cuadrado que sustentaba 1.5° , tres de

ellos de referencia y uno variable, todos ellos a una luminancia de 37 cd/m^2) consistía en discriminar cromáticamente cuando el observador está adaptado a un estímulo que a su vez es estímulo de referencia, cuestión interesante si tenemos en cuenta que el estado de adaptación del ojo tiene profundos efectos sobre el tamaño del umbral de discriminación. Tras estas experiencias, los resultados fueron que los umbrales en este caso seguían un patrón muy simple:

a) Los umbrales en la dirección S-(L+M) varían linealmente con la excitación de los conos sensibles a las longitudes de onda corta. Estos estímulos producen solamente un cambio en la señal del cono S, así que la discriminación es simplemente tarea del incremento o decremento de la señal del cono S.

b) Los umbrales son independientes del valor de la componente L-M del estímulo de adaptación.

Con el mismo propósito que el anteriormente descrito trabajo de Boynton y Kambe (1980), surge el de Miyahara et al. (1993), pero como indican los propios autores con dos modificaciones: la primera, en vez de usar un campo bipartito, se pretende tener un campo circundante alrededor de cada estímulo para crear el mismo efecto de adaptación (cuestión importante que tendremos en cuenta al diseñar nuestro dispositivo experimental) para todos ellos; y segundo, como creyeron que para el observador era difícil juzgar la dirección del cambio de cromaticidad, decidieron buscar un método en el que el observador tuviese que responder de otro modo.

Las experiencias las llevaron a cabo tres observadores a los que se les presentaba sobre la pantalla de un monitor tres rectángulos, cada uno

sustendiendo unos ángulos de 40' de ancho y 60' de alto, separados entre sí por una línea de 32'. Los umbrales se calcularon para 20 estímulos distribuidos sobre líneas de confusión tritán y rojo-verde en el espacio CIE1931, todos ellos con 12 cd/m² de luminancia constante, lo que equivale a una iluminación retiniana de 110 td. Al principio de cada sesión los tres rectángulos eran de la misma cromaticidad, y al cabo de un cierto tiempo, el rectángulo de la derecha o el de la izquierda, aleatoriamente, empezaba a variar hasta que el observador apreciaba una diferencia entre la nueva cromaticidad y la de los otros dos rectángulos.

Los resultados de este trabajo muestran que el uso de campos circundantes revela oponencia en el mecanismo del cono S para los tres observadores, mientras que con un campo circundante oscuro, sólo uno de los observadores muestra signos de oponencia. Esta oponencia también aparece para los tres observadores cuando se usa un campo circundante débil en luminancia, por lo que parece claro que los observadores difieren considerablemente en el grado de oponencia aparecido con campos circundantes oscuros o débiles. De esto se puede deducir que la discriminación del cono S no está regulada solamente por un mecanismo S, pero tampoco por un simple modelo oponente del tipo S-(L-M), lo que lleva a necesitar un mayor desarrollo de las ecuaciones propuestas por Miyahara et al. (1993) en este trabajo.

En cuanto a la discriminación en el otro canal cromático, la oponencia es obvia, incluso en ausencia de campos circundantes. El efecto de estos campos consiste en incrementar esta oponencia.

Para comparar estos resultados con los de otros trabajos, debemos recordar que Boynton y Kambe (1980) mostraron que ΔL crecía cuando la excitación del cono S crecía también, aunque este efecto era pronunciado

sólo por encima de 300 td. Sin embargo, Nagy et al. (1987) y Miyahara et al. (1993) expusieron que el nivel de excitación de S tenía un efecto muy pequeño o incluso ninguno sobre la discriminación dependiente de las excitaciones de los conos L y M, incluso por encima de 300 Std, aunque el último trabajo usara niveles de luminancia sólo hasta 460 Std. Una posible explicación a esta discrepancia no debe buscarse en las diferencias en los niveles de iluminación retiniana, ya que los utilizados en los tres trabajos eran similares, sino en los diferentes métodos experimentales.

Tras estas conclusiones está clara la importancia no sólo del uso de campos circundantes y adaptantes, sino también del método psicofísico, ya que Miyahara et al. (1993) deja claro en sus conclusiones que el uso de campos circundantes oscuros, como se venía haciendo habitualmente, no presenta demasiadas ventajas al realizar discriminaciones relacionadas con los conos L y M. Esta conclusión ha sido tenido en cuenta en el momento de diseñar el dispositivo con el que íbamos a realizar las experiencias de esta memoria, por lo que a nuestro dispositivo le añadimos un campo adaptante que describiremos más adelante.

En otro trabajo del mismo año, Yeh et al. (1993), algunos de los autores del trabajo anterior desarrollaron cinco posibles mecanismos de discriminación del cono S. De un modo esquemático podemos describirlos del modo siguiente:

a) La salida del receptor pasa por un mecanismo de control de ganancia. Pasado este control de ganancia, la señal es dividida por la información de luminancia.

b) Es en principio igual que el mecanismo a), sólo que al final a la señal después del control de ganancia se le resta la información de luminancia.

c) La señal del cono es atenuada al dividirse por la información en luminancia antes de pasar por el control de ganancia.

d) Igual que el caso c), pero la atenuación consiste en restarle a la señal la información en luminancia.

e) Un estado de ruido tiene lugar antes del mecanismo de control de ganancia, y en lo demás es como el caso c) o d).

De todos estos, los autores señalan el caso c) como el que es consistente con las teorías de otros autores, como Pugh y Mollon (1979) y Polden y Mollon (1980), que resaltan la influencia de los conos M y L sobre el sistema del cono S, aunque el modelo de Yeh et al. (1993) propone una influencia con la forma de entrada de luminancia antes del control de ganancia del cono S.

Comparando estos resultados (obtenidos con cuatro niveles de luminancia, 2.9, 29, 110 y 290 Td, aunque no analiza excesivamente la influencia de este parámetro sobre la discriminación) con los de Boynton y Kambe (1980), vemos que para estos últimos la mayor variabilidad interobservador se producía en los umbrales absolutos relacionados con el cono S, mientras que para Yeh et al. (1993) esta variabilidad es mucho menor, incluso cuando el nivel de luminancia se incrementaba a lo largo del eje M/L. Los resultados de este trabajo revelan también una oponencia mayor que en el caso de Boynton y Kambe (1980), que se puede achacar, como también hacían Miyahara et al. (1993), a las diferencias en el dispositivo experimental y en el método seguido en el desarrollo de las experiencias.

También comparan los autores sus resultados con los de Brown y MacAdam (1949), resultando que los últimos describen el efecto de la luminancia sobre los umbrales de discriminación del cono S, aunque sus datos no informan lo suficiente con respecto a la discriminación rojo-verde.

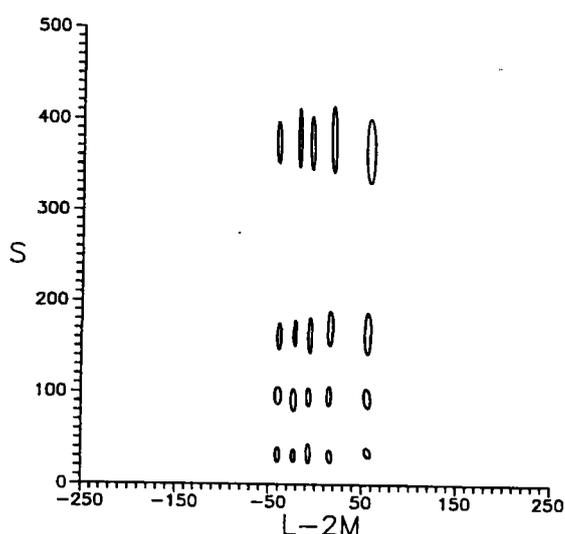


Fig. 2.4.2.- Resultados experimentales de Romero et al. (1993) para el observador JA en el espacio de excitación de conos.

De todos modos, aunque las condiciones experimentales con las que Brown y MacAdam desarrollaron sus experiencias limitan sus resultados, éstos están de acuerdo con el efecto de la luminancia sobre el umbral del cono S que describen Yeh et al. (1993), es decir, que los umbrales del mecanismo tritán dependen de la luminancia del estímulo.

Especialmente importante para nosotros es el trabajo de Romero et al. (1993), no sólo por sus conclusiones sobre discriminación cromática, sino también porque alguno de los observadores de este trabajo también lo fue para el trabajo que hemos desarrollado para esta memoria, y porque nuestro dispositivo experimental es una modificación del usado por ellos. Ya en el apartado anterior explicamos que estos autores calcularon los umbrales para 20 estímulos situados sobre líneas de confusión tritán y rojo-verde, sustentando un ángulo de 2° y con una luminancia constante de 12 cd/m^2 , y mostramos algunos de sus resultados en el diagrama CIE1931. Esos mismos umbrales fueron analizados también en el espacio de excitación de conos, parte de los cuales, los del observador JA, se muestran en la figura 2.4.2.

Estos autores destacan en primer lugar que las elipses se orientan alrededor de 90° , es decir, en la dirección del eje S, y que aunque el tamaño de las elipses crece con el aumento de la excitación de S, la diferencia entre las elipses es menor que la observada en el diagrama CIE.

En un análisis más detallado de los resultados, Romero et al. (1993) observan que el umbral de discriminación en el cono S aumenta con su nivel de excitación; no obstante, cuando la excitación de S es menor de unos 100 td, ΔS permanece casi constante en la mayoría de los casos. Según sus datos, no parece que la excitación del canal rojo-verde L-2M influya en la variación de ΔS con S. Para completar el análisis del umbral en el cono S, también analizan la variación de ΔS frente a L-2M, llegando a la conclusión de que el umbral de discriminación en el mecanismo tritán es independiente del balance rojo-verde.

En cuanto al umbral $\Delta(L-2M)$, en primer lugar analizan su variación frente a la excitación del canal L-2M, notando como el valor del umbral decrece al aumentar L-2M hasta que la excitación de este canal se hace aproximadamente cero, para volver a crecer a partir de ese punto, lo que indica que el umbral $\Delta(L-2M)$ es mínimo cuando el balance rojo-verde se encuentra equilibrado, y toma valores mayores cuando el canal se desequilibra tanto hacia el rojo como hacia el verde, sin que en ello parezca influir el nivel de excitación del cono S. En último lugar analizan la variación de $\Delta(L-2M)$ con S, viendo que el umbral permanece prácticamente constante al variar S.

Como resumen de lo anteriormente expuesto del trabajo de Romero et al. (1993) se extraen algunas conclusiones que quedan resumidas en los tres puntos siguientes:

- 1) El umbral ΔS parece sólo depender del nivel de excitación de S y no del de L-2M, y $\Delta(L-2M)$ sólo depende de L-2M y no del nivel de S.
- 2) El umbral ΔS crece a medida que aumenta S.

3) El umbral $\Delta(L-2M)$ tiene un mínimo cuando ese mecanismo se equilibra, es decir, cuando $L-2M=0$, y crece cuando se desequilibra hacia el rojo o hacia el verde.

Como hemos visto, uno de los objetivos de este trabajo de Romero et al. (1993) era analizar la discriminación de los canales cromáticos en función de la excitación de cada uno de ellos. Esta excitación del cono S de cualquier estímulo depende de sus coordenadas de cromaticidad x,y en el diagrama CIE1931 y de su iluminación retiniana expresada en trolands, de la forma

$$Exct.S = \frac{1-x-y}{y} \cdot (L + M)$$

Estos autores consiguieron estímulos con diferentes excitaciones el cono S manteniendo constante la iluminación retiniana y cambiando las coordenadas de cromaticidad. A la vista de la expresión anterior, podríamos conseguir diferentes excitaciones de S si lo que permanecen constante son las coordenadas y es la iluminación retiniana lo que varía. También es posible, variando tanto las coordenadas como la iluminación retiniana, mantener el producto constante, con lo que podríamos tener un conjunto de estímulos con la misma excitación de S y diferentes coordenadas de cromaticidad e iluminación retiniana, con las consiguientes ventajas que ello implicaría a la hora de estudiar influencias sobre los canales cromáticos. De aquí se desprende la importancia que tiene el disponer de un rango de luminancias al calcular umbrales de discriminación.

Si vemos detalladamente muchos de los artículos descritos, sobre todo el de Miyahara et al. (1993), podemos ver lo extendido que está en la actualidad el uso de campos circundantes a la hora de realizar experiencias de discriminación cromática. Algunos trabajos no son propiamente trabajos de discriminación, pero analizan la influencia de los campos circundantes

sobre algunos parámetros, como por ejemplo Wei y Shevell (1995), que estudia la influencia sobre la apariencia de color. Otros utilizan los estudios sobre campos circundantes para explicar mejor los mecanismos de visión del color, como Finkelstein (1993), cuyos resultados fueron obtenidos con adaptación a la oscuridad y también con un campo circundante de 580 nm, y muestran evidencias de una influencia de éstos al discriminar, ya que los resultados obtenidos con adaptación a la oscuridad no pueden ser explicados completamente por una oponencia de color (los estímulos estudiados eran flashes de longitudes de onda de 640 ó 580 nm).

Quizá el trabajo que mejor presenta esta influencia del campo circundante es, aparte del de Miyahara et al. (1993), el de McFadden (1992), cuyo propósito principal era obtener una estimación de la discriminación cromática cuando los estímulos comparados se presentaban con diferentes campos circundantes. Según la autora, el empeoramiento en la discriminación del estímulo test se debe principalmente a los cambios de apariencia de este test producidos por los diversos campos circundantes.

Otro de los parámetros a estudiar y cuya influencia recomendó analizar Robertson (1978) es la luminancia. Muchos de los trabajos de los que hemos hablado hasta ahora han estudiado esta influencia sobre los umbrales de discriminación cromática, pero actualmente la mayoría de los trabajos sobre luminancia están encaminados a estudiarla dentro del marco de los modelos de visión del color, siguiendo las sugerencias de Boynton (1996), ya que los cree más adecuados que los diferentes diagramas CIE porque estos últimos encubren las relaciones entre los conos.

Este mecanismo de luminancia está siendo analizado continuamente, tanto sobre qué conos contribuyen a él, Eisner y MacLeod (1980), que proponen que los conos S no contribuyen a la luminancia, como sobre su

independencia respecto a los otros mecanismos de visión del color, Ware (1983). Otros analizan la discriminación en luminancia y su relación con los canales cromáticos, Nagy y Kamholz (1995), pero quizá el de conclusiones más claras sobre discriminación y luminancia es el trabajo de Nagy (1994), ya que una de las principales es que las variaciones en los umbrales rojo-verde con el tamaño del campo y el nivel de luminancia pueden ser bien descritas con el modelo de Boynton y Kambe (1980), pero con variaciones apropiadas en la fracción de Weber y el coeficiente oponente.

Como último trabajo, no podemos dejar de citar el de Lennie et al. (1993), en el que se señala que hay evidencias psicofísicas que sugieren la existencia de tres mecanismos post-receptores, uno de los cuales tiene una sensibilidad espectral del tipo $V(\lambda)$, claramente relacionada con la luminancia, ya que el concepto de luminancia fue introducido por la CIE como un análogo fotométrico de la radiancia. Otra evidencia indica múltiples mecanismos con diferentes sensibilidades espectrales. Por todo esto y los diferentes modos utilizados para estudiar eficiencias luminosas y sensibilidades espectrales, Lennie et al. (1993) no dejan de insistir en la necesidad de estudios sobre la influencia de la luminancia sobre la discriminación y como queda enmarcada ésta dentro de los actuales modelos de visión del color.

Capítulo 3: Dispositivo experimental

3.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Los dispositivos utilizados en este tipo de experiencias deben permitir obtener un gran número de estímulos con una gran reproducibilidad y una solidez y versatilidad adecuadas para poder realizar el enorme número de medidas necesario y habitual en estudios de colorimetría diferencial. El dispositivo que hemos usado para realizar las medidas de este trabajo es el mismo que el usado por Romero et al. (1993) pero con algunas variaciones (suprimir una de las cavidades integradoras, eliminar lentes y dobletes acromáticos, ...) que lo hacían más apropiado para el tipo de medidas que pretendíamos realizar.

En la figura 3.1 se muestra un esquema del dispositivo experimental con el que se obtuvieron las medidas expuestas en este trabajo, y cuya descripción dividiremos en tres partes: sistema de producción de estímulos, sistema de observación y sistema de calibrado.

3.1.- Sistema de producción de estímulos

En esta parte del dispositivo se generan los estímulos, tanto los de referencia como los que se presentan a comparar con éstos; para ello, consta de los colorímetros C1 y C2 y una cavidad integradora I, tal y como se puede ver en la figura 3.1.

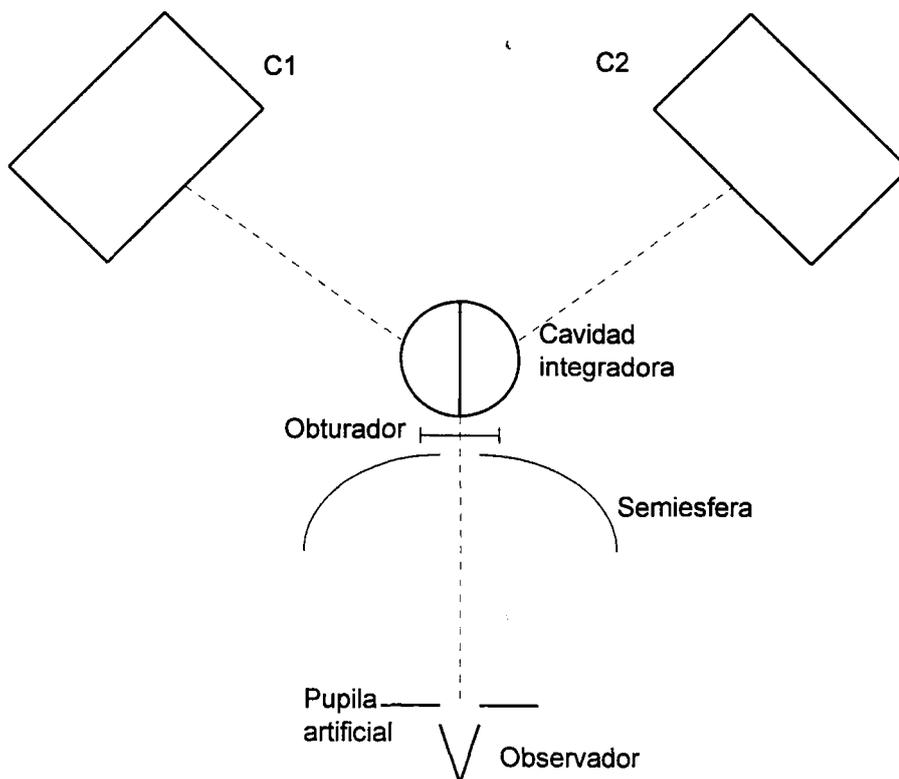


Fig. 3.1.- Esquema general del dispositivo experimental

Estos colorímetros C1 y C2 son del tipo Donaldson, con unas lámparas de halógeno SILVANIA FFx 500 w/ 220 v, alimentadas a la red a través de un estabilizador BOAR-2000 ST (0.3% de precisión de regulación, margen de tensión de entrada 190-260 v, margen de frecuencia 45-55 hz), y cuya curva de emisión espectral relativa es la de la figura 3.2. Todas las lámparas empleadas

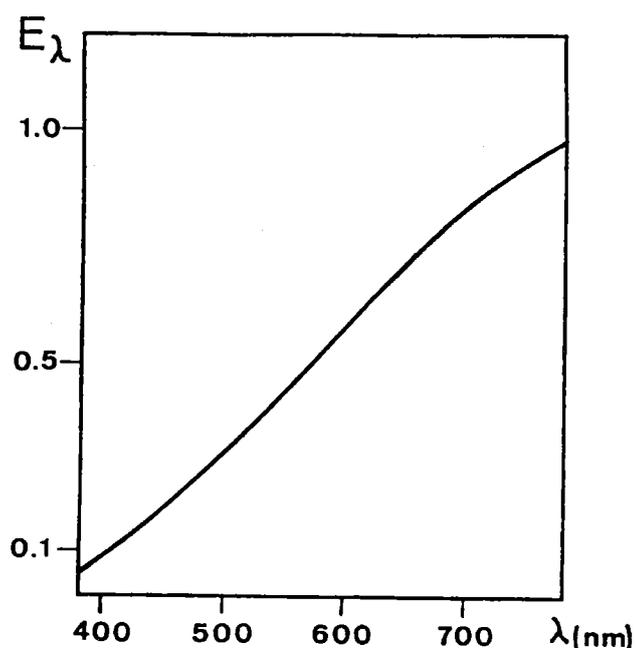


Fig. 3.2.- Curva de emisión espectral de las lámparas utilizadas.

durante la realización de las medidas experimentales fueron envejecidas durante un mínimo de 20 h para asegurar la estabilidad de su emisión.

Cada uno de los colorímetros lleva un sistema óptico de lentes asociado a una placa portadora de los filtros cuya apertura definirá la cromaticidad de los estímulos de estudio. El sistema óptico del que hemos hablado es en cada colorímetro un par de lentes condensadoras, que en C1 tienen distancias focales de 37.5 y 47.5 cm y diámetros de 20 cm, y en C2 focales para cada una de las lentes de 30 cm y diámetros de 15 cm.

Entre las dos lentes de cada colorímetro se sitúa la placa portadora de los filtros, rojo, verde y azul. Sobre estos filtros existen unos diafragmas de apertura variable, gracias a los que el área del filtro que deja pasar luz es también variable, lo que permite obtener una gran variedad de estímulos. Las

placas portadoras de los filtros se muestran en las figuras 3.3.a y b, y en la 3.4 las curvas de transmitancia espectral de los filtros utilizados en ambos colorímetros, filtros de la casa SCHOTT interferenciales modelo AL (20 nm de ancho de banda). El conjunto de filtros de ambos colorímetros es el mismo, ya que las igualaciones que se pretendían hacer en estas experiencias eran, como explicaremos más adelante, isómeras. Para evitar un calentamiento excesivo de los filtros que provoque variaciones en sus curvas de transmitancia espectral, J. Juan (1974), cada colorímetro dispone de ventiladores para su refrigeración.

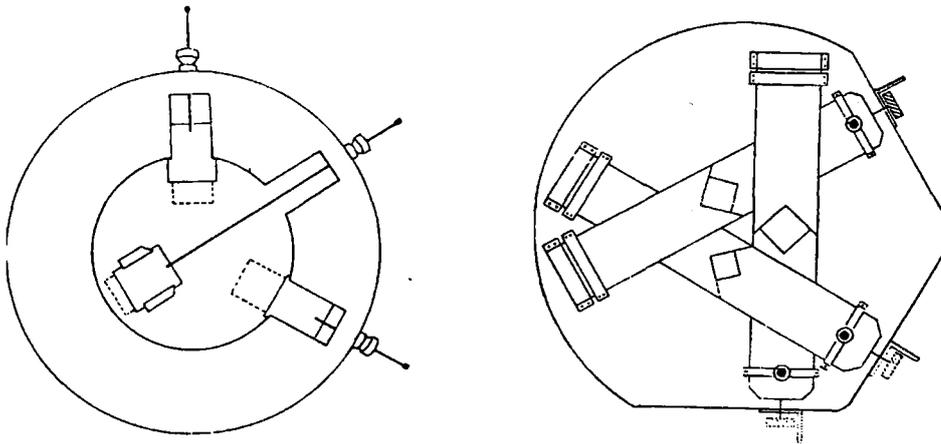


Fig. 3.3.a y b.- Placas metálicas portadoras de los filtros.
a.- Colorímetro de referencia. b.- Colorímetro variable.

Sobre los filtros incide luz colimada, ya que la lámpara colocada en el interior del colorímetro está en el plano focal objeto de la primera de las lentes. La segunda lente de la pareja hace incidir la luz transmitida por los filtros sobre la entrada, de 1.5 cm de diámetro, de la cavidad integradora I, pero de manera que sobre esta entrada se forme la imagen del filamento de la lámpara a través de las dos lentes, para así aprovechar al máximo la luz emitida.

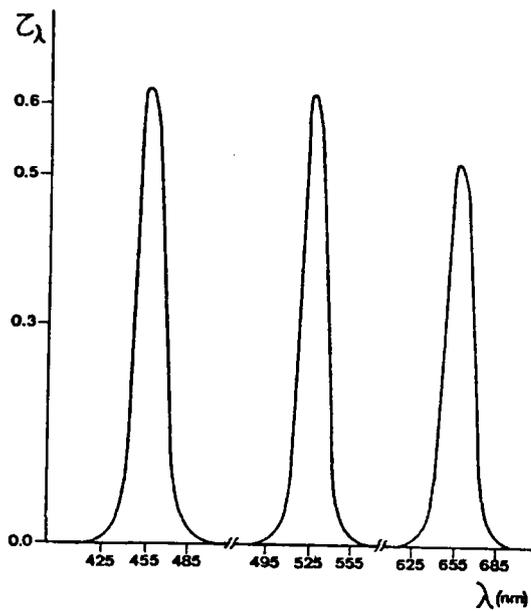


Fig. 3.4.- Curva de transmitancia espectral de los filtros utilizados.

La figura 3.5 es un dibujo de la cavidad integradora I de nuestro dispositivo experimental. Las principales características de ésta son un diámetro de 7 cm, una altura de 4 cm y tres orificios, dos de entrada y uno de salida, de 1.5 cm de diámetro y situados en el plano ecuatorial de la cavidad, a 120° cada uno. El interior de la cavidad está recubierto con una capa de MgO para fusionar los primarios convenientemente, y además este interior está dividido en dos pequeñas cavidades, de manera que la luz de cada colorímetro no se fusione con la del otro.

Originalmente el dispositivo experimental poseía dos cavidades integradoras, de las que eliminamos una para construir el nuestro. A la cavidad restante se le añadió una pared interior que, como dijimos en el párrafo anterior, dividía la cavidad integradora inicial en dos más pequeñas. El interés de esta división radicaba en conseguir niveles de luminancia más elevados que los que las cavidades iniciales nos permitían conseguir, ya que uno de los objetivos de este trabajo era calcular umbrales de discriminación cromática con el parámetro luminancia variable.

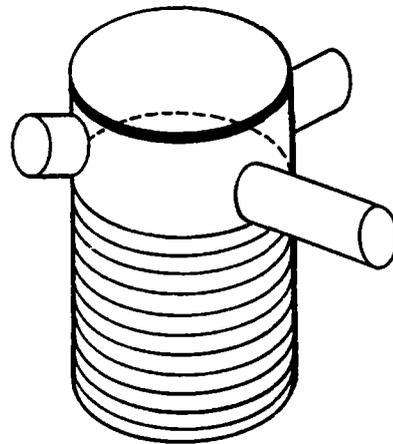


Fig. 3.5.- Cavidad integradora.

3.2.- Sistema de observación

Las experiencias de discriminación cromática de este trabajo se hicieron por comparación simultánea de parejas de estímulos yuxtapuestos en un campo fotométrico circular y bipartito. Esta yuxtaposición de los estímulos se produce en el orificio de salida de la cavidad integradora, ya que ésta está dividida en dos verticalmente en su interior, de modo que la fusión de la luz emitida por cada colorímetro se realiza por separado en cada una de las partes de la cavidad, sin mezclarse.

Pegado al orificio de salida de la cavidad integradora se colocó un obturador electromagnético pegado a su vez a una superficie semiesférica, como se ve en la figura 3.1. Este obturador es una placa soldada a una varilla de hierro que penetra en el interior de una bobina que actúa como electroimán y que, unida a un generador de pulsos eléctricos, nos permite controlar los intervalos de tiempo entre presentaciones de estímulos y también la duración de cada una de ellas. La cara de la placa del obturador que el observador puede ver durante las sesiones experimentales está pintada del mismo blanco (blanco acrílico óxido de titanio) que el interior de la superficie semiesférica sobre la que se proyecta un campo adaptante, ya que según Miyahara et al. (1993) los campos circundantes oscuros y la adaptación a ellos presentan algunas dificultades al realizar discriminaciones relacionadas con los conos L y M. Así, cuando el obturador está cerrado, el observador se halla inmerso en un campo adaptante uniforme, y cuando el obturador se abre, puede ver la pareja de estímulos a analizar, a través de un agujero de 1.5 cm de diámetro practicado en la superficie hemiesférica que sustiende un ángulo de 2° y que coincide justamente con el orificio de salida de la cavidad integradora.

En el extremo del banco óptico sobre el que se sujetan los elementos del dispositivo experimental hay un obturador de ojo, porque trabajamos con visión monocular, y también un diafragma circular de apertura variable que actuará como pupila artificial, situándose el observador sobre una mentonera, procurando que su pupila coincida con la pupila artificial para que esta última pueda actuar como tal. La pupila artificial puede resultar al principio un poco incómoda, pero se colocó por resultar útil para nuestros intereses, tal y como ahora analizaremos.

Uno de los objetivos de este trabajo es estudiar la influencia de la luminancia sobre los umbrales de discriminación, tanto en el diagrama CIE1931 como en un espacio de excitación de conos. Si pretendemos estudiar los resultados en este último diagrama, será importante conocer con exactitud el diámetro de esta pupila debido a que la iluminación retiniana (L+M) de cualquier estímulo depende de la superficie de la pupila en la forma

$$(L + M) = A \cdot Y$$

donde (L+M) es la iluminación retiniana y se expresa en trolands, A es la superficie de la pupila y se expresa en mm² e Y es la luminancia del estímulo en cuestión, expresándose en cd/m², Lozano (1978).

Vista la dependencia de la iluminación retiniana con el diámetro de la pupila, parece claro que hay que controlar el valor de ésta, porque es un hecho conocido que la luminancia Y (en cd/m²) de un estímulo influye en el diámetro de la pupila del ojo del observador. Esta variación ha sido estudiada por diversos autores, como Crawford (1936), Flamant (1948) y Reeves (1920), que encontraron una gran variabilidad en este parámetro. Crawford encontró la relación aproximada y empírica

$$d = 5 - 3 \tanh(0.4 \cdot \log Y)$$

de alcance limitado, con Y en cd/m^2 y d en mm.

Por todo esto, colocamos una pupila artificial de diámetro tal que ésta era siempre menor que la pupila del observador, con lo que podíamos asegurar que el valor calculado teóricamente de la iluminación retiniana era el correcto.

El último elemento es una cabina dentro de la que se colocaba el observador, una cabina que además de aislarlo del resto del dispositivo experimental, le impide ver al experimentador, con lo que nunca tendrá idea sobre la pareja de estímulos que se le presenta.

En resumen, por las posiciones de todos los elementos del dispositivo, el observador tiene ante sí un campo circular bipartito de 2° , empleando visión directa, sin ningún tipo de lentes o dobletes acromáticos y una pupila artificial de un tamaño siempre igual o menor que la propia.

3.3.- Sistema de calibrado

Es evidente que para calcular las coordenadas de cromaticidad de los estímulos para los que se van a obtener umbrales de discriminación cromática es necesario conocer las coordenadas de los estímulos producidos por cada colorímetro con todas las posibles aperturas de los diafragmas acoplados a los filtros.

Para ello, se realizó un calibrado del dispositivo experimental, midiendo los valores triestímulo de estímulos generados por uno de los colorímetros con un espectralradiómetro Spectrascan modelo PR-704/PC de Photo Research, con rango del espectro de medida 380-780 nm, y con un error del 4.1% en la toma de medidas fotométricas si éstas son absolutas, mientras que si son relativas el error se encuentra entre el 1 y el 2%. En cuanto a las coordenadas de cromaticidad, el error es de ± 0.003 .

El calibrado se hizo midiendo los valores triestímulos de la luz emergente de cada uno de los filtros con diferentes aperturas. Así, se obtuvo una matriz 55x3 para cada uno de los tres filtros del colorímetro, siendo cada fila una posición diferente del mando que controla ese filtro y las columnas los valores triestímulos del estímulo producido.

El colorímetro C2 es el que proporcionó los estímulos que fueron comparados con el de referencia, producido por el colorímetro C1, por lo que debe tener una gran reproducibilidad, es decir, que siempre que los mandos estén en una misma posición el estímulo generado debe ser el mismo. Esta reproducibilidad se comprobó repitiendo posiciones de los mandos del colorímetro, y por otra parte, para evitar posibles errores por la lógica variación del calibrado con el paso del tiempo, se realizaron cinco calibrados

durante el tiempo que duró la toma de medidas experimentales. Los posibles errores cometidos se consideran sujetos a la propagación de errores en colorimetría, tal y como describen Nimeroff (1957) y Wyszecki (1959).



**Capítulo 4: Método general y
desarrollo de las experiencias**

4.- MÉTODO GENERAL Y DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS

4.1.- Elección del método experimental

En cualquier experiencia psicofísica y, en particular, en colorimetría diferencial y en visión del color, son de gran importancia las condiciones experimentales y el dispositivo con los que se realizan las experiencias y, sobre todo, el método experimental utilizado. Muchos trabajos se han realizado para tratar de analizar las posibles influencias de esta gran variedad de parámetros; por ejemplo, Brown (1957) y García et al. (1993-a) analizaron la variabilidad interobservador; el efecto del tamaño del campo, cromaticidad del campo circundante y nivel de luminancia se estudiaron en los trabajos de García et al. (1993-b) y Brown (1951, 1952). También han sido estudiados el tiempo de exposición, Siegel (1965), Hita et al. (1982-a), el tipo de fusión de primarios, Hita et al. (1979), el modo de comparación entre estímulos, Uchikawa e Ikeda (1981), Uchikawa (1983), Romero et al. (1986) y el grado de metamerismo en las igualaciones de partida, Hita et al. (1986). Por ello, la

CIE lanzó unas recomendaciones, Robertson (1978), sobre el interés de analizar la influencia de todos estos parámetros experimentales

En cuanto al método experimental, éste se intenta mejorar progresivamente, pero no hay ningún trabajo que analice la influencia que éste pueda tener en el tipo de experiencias que tratamos. Por tanto, antes de comenzar con las medidas experimentales de este trabajo, se analizaron diferentes métodos experimentales para elegir el más apropiado de acuerdo con el dispositivo experimental del que se disponíamos y los objetivos planteados. Para realizar esta comparación, obtuvimos umbrales de discriminación en los ejes tritán y rojo-verde de un estímulo para 5 observadores, con el mismo dispositivo experimental, pero con cuatro métodos diferentes.

Para poder emplear métodos experimentales diferentes el dispositivo debía ser muy versátil, por lo que el utilizado se basa en un monitor color CRT. Éste era un monitor color Samsung CSD5577 Multisync CRT 15" controlado por una tarjeta gráfica TigaStar con 8 bits por cañón instalada en una CPU Compaq 486/33M. El hardware permitía la generación de 16.7 millones de colores, trabajando con una resolución de 1152x 900 pixels, una frecuencia de barrido vertical de 54 Hz y horizontal de 52 KHz.

El observador se colocó dentro de una cabina de aislamiento pintada de negro que lo aislaba de posibles luces parásitas, a una distancia de 1 m del monitor, con lo que la pantalla de éste sustentaba un ángulo de 14.25x11.25°.

El monitor fue calibrado utilizando un espectrorradiómetro Spectrascan PR-704 de Photo Research, situado a 1 m de la pantalla y perpendicular a ésta. El calibrado se basó en las hipótesis de independencia espacial con un

factor de escala simple e independencia de los fósforos, Brainard (1989), Cowan y Rowell (1986), Lucassen y Walraven (1990). Para asegurar la estabilidad de las condiciones de trabajo, se fijaron las posiciones de los mandos de brillo y contraste, Díaz et al. (1996). Sin embargo, en el calibrado no se supuso la constancia de los fósforos, de acuerdo con un trabajo previo de este mismo laboratorio, Jiménez del Barco et al. (1995). Este calibrado se realizó antes de comenzar las sesiones experimentales, y, debido a que la emisión de los fósforos se deterioraba con el tiempo, se volvió a repetir aproximadamente a la mitad de la toma de medidas; el monitor se encendía 30 minutos antes de cada sesión experimental para asegurar su estabilidad.

En estas primeras medidas experimentales se contó con 5 observadores, identificados como AY, CN, FN, JA y TS, de edades 26, 27, 20, 36 y 21 años, respectivamente. Todos ellos, dos mujeres y tres hombres, realizaron los tests de Ishihara y Farnsworth D-15 y pruebas con el anomaloscopio de Pickford-Nicolson para detectar posibles anomalías en la visión del color, tras lo que se consideró la visión al color de los 5 observadores como normal. Uno de los observadores no presentaba ningún tipo de ametropía y los cuatro restantes las tenían compensadas.

La mayoría de estos observadores poseían experiencia previa en este campo de investigación; a pesar de ello, todos tuvieron un tiempo de acomodación al dispositivo experimental y realizaron varias sesiones de entrenamiento con cada uno de los métodos analizados.

En principio, sería deseable contar con un número mayor de observadores, aunque cinco es ya más de lo que aparece en la mayoría de trabajos sobre colorimetría diferencial, Ronchi y Ferrera Mori (1963). Ya que no pretendíamos estudiar la variabilidad interobservador con diferentes métodos, sino cuál de ellos era el más conveniente según nuestros objetivos,

estimamos que cinco observadores era un número adecuado que nos permitiría obtener un conjunto de datos suficientemente amplio como para poder elegir un método experimental.

Los umbrales de discriminación se calcularon para un estímulo metámero del equienergético, coordenadas (0.333, 0.333), y luminancia 12 cd/m². Este estímulo fue el elegido, por una parte, debido a las características del dispositivo experimental utilizado, ya que el monitor ofrece máxima fiabilidad en estos valores; por otra parte, la elección se debe a que en este estímulo tanto el canal rojo-verde como el azul-amarillo se encuentran equilibrados.

Cualquiera de los métodos que se utilice en la medida de umbrales diferenciales de cromaticidad tiene que tener una serie de características importantes. En primer lugar, los resultados no deben verse afectados por aspectos asociados a situaciones psicológicas determinadas del observador. Además, éste debe actuar como un mero "elemento de cero", sin intervención alguna sobre el dispositivo o el desarrollo de las sesiones, todo ello para evitar cualquier influencia sobre su respuesta.

Algunos de los métodos utilizados en trabajos como los de MacAdam (1942) y Wyszecki y Fielder (1971) consistían en realizar igualaciones de color en las que el observador actuaba sobre los mandos del dispositivo, hecho criticable por la aparición de posibles efectos táctiles, Le Grand (1972). Otra crítica que se hace a diversos métodos es la presentación de estímulos yuxtapuestos, que obliga al observador a decidir de un modo estricto la igualdad o no de estos dos estímulos. Por ello, algunos autores proponen nuevos métodos en los que la opción no sea sólo "sí" o "no", sino que el observador pueda elegir entre más de un estímulo; a pesar de esto, los

métodos de elección forzada siguen siendo muy empleados debido a los buenos resultados que con ellos se obtienen.

De los métodos que se encuentran en la literatura al respecto hemos elegido cuatro representativos de ellos, todos métodos llamados de "estímulos constantes", es decir, métodos en los que la única tarea del observador es responder si ve iguales o no los estímulos que se le presentan, y no ir variando continuamente uno de los estímulos hasta conseguir la igualación, o bien, hasta apreciar diferencias respecto a una igualación previa (método de los "límites"), circunstancia en la que puede aparecer una adaptación continua al estímulo, como indica Le Grand (1972). El hecho de analizar sólo métodos de "estímulos constantes" se basa en que parece que este tipo de métodos ofrece mayor objetividad y reproducibilidad en las medidas, ya que con ellos el observador participa exclusivamente en las respuestas y no en la presentación de los estímulos, evitando, como comentamos anteriormente, posibles efectos táctiles, Boynton et al. (1986), Krauskopf y Gegenfurtner (1992).

Al llevar a cabo las experiencias con los cuatro métodos comparados se ha procurado que las condiciones experimentales sean comunes en todos ellos (por ejemplo, un tiempo de exposición de 1 s y entre exposiciones sucesivas de 10 s -Hita et al. (1980, 1982-a)-, visión monocular y pupila natural) para que la diferencia entre umbrales no se pueda atribuir a diferencias en estas condiciones .

A continuación haremos una descripción de los métodos analizados, que hemos llamado métodos 1, 2, 3 y 4.

Método 1

Este método es utilizado por diversos autores, entre ellos Romero et al. (1993). Con él, al observador se le presentaban simultáneamente durante 1 s en un campo circular bipartito de 2° un estímulo de referencia, y yuxtapuesto a él otro estímulo variable próximo a él en el espacio de color. Así, todos los estímulos variables que se han comparado con el de referencia formaban una "nube" que rodeaba a este último, de modo que los extremos de este conjunto son vistos "claramente diferentes" por el observador.

Durante los 10 s existentes entre exposiciones sucesivas, el observador debía responder si veía iguales o no los dos estímulos que aparecían en las dos mitades del campo bipartito. Cada estímulo variable fue presentado un total de 10 veces, siempre de modo aleatorio para que el observador no pudiese hacer juicios previos. Así, a cada uno de los estímulos se le asociaba un peso estadístico dependiendo de las veces que el observador lo había visto igual al estímulo de referencia. De esta forma, el umbral de discriminación se obtuvo al ajustarle a la nube de estímulos variables un elipsoide de discriminación según Wyszecki (1959), aunque en nuestro caso, al trabajar en un plano de luminancia constante, el ajuste será simplemente una elipse.

La principal objeción a este método experimental es que el ajuste de la nube de estímulos presupone la simetría de los umbrales a ambos lados de una línea, con lo que si a partir de la elipse de discriminación obtenida queremos calcular el umbral a lo largo de cualquier línea, éste será igual al movernos en un sentido u otro de esa línea. Esta objeción se ve apoyada por trabajos como los de Parra (1970), Dupont-Henius (1977) e Hita et al. (1982-b), que cuestionan el que un umbral de discriminación quede bien representado por un contorno elíptico.

Métodos 2 y 3

Los siguientes métodos son dos variantes del propuesto por Boynton et al. (1986). Los estímulos variables utilizados en sus experiencias se situaban a lo largo de líneas que pasaban sobre el estímulo de referencia. La presentación se hacía en dos campos de $0.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ separados $11'$ y duraba 1.5 s para evitar que la exposición continuada de los estímulos pudiera producir adaptación, a pesar de que esta variación continua de los estímulos ya había sido empleada por algunos de estos autores en trabajos anteriores, Boynton y Kambe (1980) y Boynton et al. (1983).

Para obtener nuestros propios datos con este método tomamos el mismo campo circular bipartito que describimos para el método 1 y tomamos un tiempo de exposición de 1 s e interexposiciones de 10 s. Los estímulos variables se eligieron sobre las líneas de confusión tritán y rojo-verde, pero, como ya hemos comentado, para su presentación al observador utilizamos dos variantes del procedimiento descrito por Boynton et al. (1986). En una de ellas, que llamaremos método 2, los estímulos variables se presentaron en orden, es decir, que siempre sobre una de las líneas elegidas, los estímulos a comparar se alejaban progresivamente del de referencia hasta que el observador notaba diferencia entre las dos mitades del campo. Entonces, el estímulo variaba en sentido contrario hacia el otro lado de la línea hasta que el observador indicaba nuevamente, tras "pasar" por la igualación, que existía diferencia entre los dos estímulos, para que el umbral no dependiese del sentido de variación de los estímulos sobre la línea. En la otra variante, a la que denominaremos método 3, las condiciones experimentales son las mismas, pero los estímulos variables se presentaban de modo aleatorio, con lo que se evitaban los juicios previos que pudiera hacer el observador, ganando en objetividad.

Método 4

En todos los métodos descritos anteriormente la única respuesta posible del observador es "sí" o "no", dependiendo de si los dos estímulos a comparar son iguales o no. Este tipo de respuesta es demasiado estricta y a veces el observador no se encuentra demasiado seguro de la respuesta que da. Por ello, algunos autores proponen un tipo de método en el que el observador no sólo responde "sí" o "no", sino que además debe decir qué parte del campo es la que ha variado o en qué dirección se ha producido este cambio.

Un ejemplo de este método general es el del trabajo de Miyahara et al. (1993), en el que los estímulos eran tres rectángulos, susteniendo cada uno de ellos un ángulo de 40' de ancho y 60' de alto, separados entre sí 32'. Al principio de cada sesión los tres rectángulos contenían el mismo estímulo, y el del centro y uno de los laterales permanecían así durante toda ella. El otro lateral, elegido arbitrariamente, empezaba a cambiar gradualmente en una

dirección determinada. La respuesta del observador se producía cuando notaba ese cambio; además, debía señalar cuál de los dos rectángulos había variado, aunque no en qué dirección había sido.

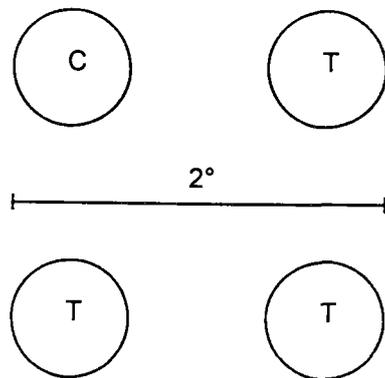


Fig. 4.1.- Distribución de los estímulos con el método 4. T es el estímulo de referencia y C el variable.

Como último de los métodos analizados tenemos otro ejemplo de método, que hemos llamado método 4, que piden al observador una respuesta no tan estricta; éste

es el descrito por Krauskopf y Gegenfurtner (1992). Con él, el observador debía fijar la vista sobre la pantalla del ordenador, sobre la que cada 10 s aparecían durante un intervalo de 1 s cuatro círculos inscritos en las cuatro esquinas de un cuadrado que sustentaba un ángulo de 2° , distribución que se muestra en la figura 4.1. Tres de estos círculos eran del color de referencia, y el restante era del color a comparar, situándose éste último aleatoriamente en cualquiera de las cuatro posiciones. Para nuestras experiencias, cada estímulo se presentaba al observador en tandas de 5 veces, en las que éste debía decir dónde estaba el círculo de color diferente. Con este método es el mismo observador el que determinaba dónde estaba su umbral, tanto en función del número de aciertos que haya tenido como de la facilidad en discriminar el color diferente. Para que el observador no pudiera hacer juicios "a priori" sobre si los estímulos iban a ser muy parecidos o distintos, éstos eran presentados aleatoriamente, como se hizo también con el denominado método 3.

Las sesiones para obtener los umbrales con los tres primeros métodos fueron relativamente rápidas y durante ellas, los observadores no encontraron ningún problema. Sin embargo, con el método 4 los observadores necesitaron bastantes más sesiones de entrenamiento para acostumbrarse al modo de presentar los estímulos.

En la tabla IV.1 aparecen los diferentes umbrales obtenidos en el diagrama CIE1931 para cada observador con los distintos métodos. Cuando en una casilla se muestran dos umbrales, el primero de ellos es el obtenido con estímulos menos azules que el acromático de partida, en el caso del umbral sobre la línea de confusión tritán, y con estímulos más verdes, en el caso del umbral sobre la línea rojo-verde. Con el método 1 sólo aparece un valor, que corresponde al umbral en cualquiera de los dos sentidos, como ya señalamos al describir este método.

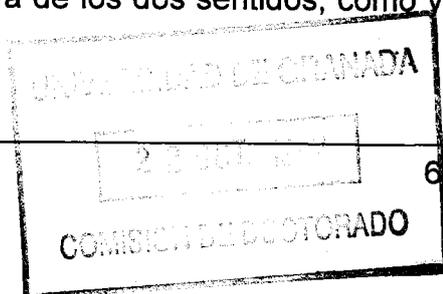


TABLA IV.I

		Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3	Mét. 4
AY	Tritán	0.0140	0.0082 0.0043	0.0066 0.0112	0.0135 0.0090
	Rojo-verde	0.0056	0.0032 0.0046	0.0019 0.0054	0.0042 0.0071
CN	Tritán	0.0102	0.0100 0.0054	0.0107 0.0054	0.0159 0.0112
	Rojo-verde	0.0048	0.0023 0.0056	0.0047 0.0072	0.0082 0.0111
FN	Tritán	0.0104	0.0084 0.0029	0.0110 0.0034	0.0159 0.0112
	Rojo-verde	0.0051	0.0023 0.0062	0.0047 0.0072	0.0082 0.0111
JA	Tritán	0.0152	0.0081 0.0106	0.0086 0.0091	0.0135 0.0090
	Rojo-verde	0.0115	0.0049 0.0085	0.0038 0.0054	0.0059 0.0091
TS	Tritán	0.0082	0.0081 0.0034	0.0081 0.0075	0.0159 0.0112
	Rojo-verde	0.0061	0.0040 0.0071	0.0067 0.0031	0.0082 0.0111

Tabla IV.I.- Umbrales obtenidos en el espacio CIE1931 con los distintos métodos para todos los observadores.

Si comparamos los resultados obtenidos con todos los métodos experimentales, vemos que hay diferencias no sólo relativas al tamaño de los umbrales, distintos según el método utilizado, sino también respecto a la simetría en su representación en un espacio de color, ya que los umbrales son diferentes según el sentido en el que nos movamos sobre la línea. Sin

embargo, esta diferencia, al ajustar una elipse a la nube de puntos, queda oculta con el método 1.

También existen diferencias de tipo cuantitativo. Generalmente los valores mayores los presentan los obtenidos con el método 4, mientras que con el método 1 se obtienen unos valores intermedios, pero tiene el inconveniente del mayor número de sesiones que necesitó cada observador para calcular su umbral. En cuanto a los dos métodos restantes, el 2 y el 3, los resultados son similares entre sí y generalmente los menores de la tabla. Durante las sesiones experimentales utilizando estos dos últimos métodos pudimos constatar que era con éstos con los que los observadores se sentían más cómodos y seguros, lo que queda reflejado en el valor menor de los umbrales.

Destacan en la tabla IV.I los umbrales obtenidos con el método 4, que son iguales tanto sobre la línea de confusión tritán como sobre la rojo-verde para los observadores CN, FN y TS, e iguales sobre la línea tritán para los otros dos, AY y JA. Como antes comentamos, los observadores estimaron que con este método resultaba complicado discriminar cromáticamente, lo que posiblemente provocó que los umbrales fuesen mayores que aquellos obtenidos con el resto de métodos analizados. Por tanto, si los umbrales en este caso son mayores, el estímulo en el "límite" estará más alejado del de referencia, con lo que probablemente la mayoría de los observadores lo verán diferente de éste y así los umbrales se obtendrán con valores muy similares, e incluso iguales. Sin embargo, con los otros métodos los umbrales son menores, y al estar ese estímulo "límite" más cerca del de referencia es probable que unos observadores los vean iguales mientras que otros no.

Para comparar los métodos 2 y 3 tomamos como umbral la media de los dos umbrales sobre cada línea de confusión, según se muestra en la tabla

TABLA IV.II

		Mét. 2	Mét. 3
AY	Titán	0.0063	0.0089
	Rojo-verde	0.0039	0.0037
CN	Tritán	0.0077	0.0081
	Rojo-verde	0.0040	0.0060
FN	Tritán	0.0057	0.0072
	Rojo-verde	0.0043	0.0060
JA	Tritán	0.0094	0.0089
	Rojo-verde	0.0067	0.0046
TS	Tritán	0.0058	0.0078
	Rojo-verde	0.0056	0.0049

Tabla IV.II.- Umbrales medios obtenidos con los métodos 2 y 3 para todos los observadores.

IV.II. Como era de esperar, generalmente los umbrales obtenidos con la variación ordenada de los estímulos son menores que cuando los estímulos se presentan aleatoriamente, ya que en el primer caso el observador podía intuir el siguiente estímulo. Sólo el observador JA obtuvo umbrales mayores con el llamado método 2, aunque la diferencia en los umbrales sobre la línea tritán es muy pequeña. También con la variación ordenada los observadores AY y TS tienen umbrales mayores sobre la línea rojo-verde, aunque en el caso de AY la diferencia es poco apreciable. Con estos dos métodos existe mucha más diferencia entre los observadores que con el método 4, pero no tanta como al realizar el ajuste de la elipse, y entre ellos dos el que menos variabilidad interobservador presenta es el 3.

TABLA IV.III

		Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3	Mét. 4
AY	Tritán	9.500	5.443 2.953	4.420 7.839	8.858 6.264
	Rojo-verde	1.061	0.609 0.880	0.356 1.026	0.802 1.354
CN	Tritán	6.938	6.602 3.734	7.091 3.734	10.376 7.839
	Rojo-verde	0.909	0.440 1.069	0.886 1.372	1.536 2.137
FN	Tritán	7.090	5.598 1.961	7.234 2.363	10.376 7.839
	Rojo-verde	0.976	0.440 1.181	0.886 1.372	1.536 2.137
JA	Tritán	10.325	5.385 7.420	5.734 6.328	8.858 6.264
	Rojo-verde	2.182	0.928 1.632	0.718 1.026	1.112 1.745
TS	Tritán	5.567	5.385 2.363	5.385 5.214	10.376 7.839
	Rojo-verde	1.163	0.760 1.354	1.262 0.597	1.536 2.137

Tabla IV.III.- Umbrales obtenidos en el espacio de excitación de conos con los distintos métodos para todos los observadores

Como uno de los objetivos de este trabajo es analizar umbrales de discriminación en el espacio de excitación de conos, calcularemos a continuación los umbrales obtenidos con los cuatro métodos en este espacio. Los nuevos valores se muestran en la tabla IV.III, en la que se puede ver que la diferencia entre el umbral sobre la línea tritán y el umbral sobre la línea rojo-verde es mucho mayor en este espacio de excitación de conos que en el

CIE1931. Sin embargo, la relación entre los umbrales sobre cada línea para un mismo observador con diferentes métodos es similar en ambos casos, y también la relación entre los de distintos observadores.

Tras el análisis de los cuatro métodos experimentales, decidimos que para nuestras experiencias resultaba más adecuado el método 3. Casi desde el principio el método 1 quedó descartado, debido a que el ajuste elíptico presupone la simetría de los umbrales a ambos lados de una misma línea, lo que no se puede asegurar a la vista de los resultados obtenidos con los restantes métodos. Además, también resulta un inconveniente el gran número de sesiones experimentales necesario para obtener una nube de puntos alrededor del estímulo de referencia.

Los resultados obtenidos con el método 4 presentan menos diferencias entre observadores y no esconden la falta de simetría entre los dos umbrales sobre una misma línea. Pero este método también se descartó debido a que el dispositivo experimental del que disponíamos no nos permitía utilizar este tipo de método. Además, como ya se ha comentado, es con este método con el que los observadores se encontraban más incómodos, a pesar de la seguridad con la que daban sus respuestas.

Los otros dos métodos, el 2 y el 3, son los que de acuerdo con nuestros objetivos más ventajas presentan. Ambos son perfectamente factibles con el dispositivo experimental disponible, por lo que resultan más adecuados que el método 4, además de que son mucho más cómodos para el observador. Si los comparamos con el método 1, la principal ventaja es que no ocultan las diferencias de umbrales en cada lado de la línea, aparte de que son bastante más ágiles a la hora de realizar las sesiones experimentales. La ventaja en cuanto a la presentación de los estímulos a lo largo de una línea aleatoria y no ordenadamente estriba en que del primer

modo el observador se limita a discriminar cromáticamente dos estímulos y los resultados que se obtienen son más objetivos, mientras que con la presentación ordenada puede hacer juicios "a priori" de los estímulos que van a presentársele en la siguiente exposición.

Una vez elegido el método experimental, se debió elegir también las líneas sobre las que se iban a calcular los umbrales. Naturalmente, dos de ellas serán las líneas de confusión tritán y rojo-verde que pasan por cada uno de los estímulos de referencia. Las otras dos líneas elegidas fueron diferentes para cada caso, pero siempre líneas que sean las bisectrices de los ángulos que forman las líneas tritán y rojo-verde en el espacio CIE-1931.

Para evitar el cansancio del observador, las sesiones experimentales no duraron más de 25 min, incluyendo el tiempo de adaptación a la oscuridad primero y luego al campo adaptante. Además, las sesiones se realizaron en distintos días y a diferentes horas para promediar las condiciones psicológicas del observador, como se desprende de trabajos como los de Wyszecki (1972) e Hita y Romero (1981).

4.2.- Descripción y justificación de los parámetros experimentales

A pesar de que previamente ya se han hecho algunos comentarios sobre algunos de los parámetros experimentales, en este apartado vamos a hacerlo de un modo más detallado, por lo que clasificaremos estos parámetros de la manera siguiente:

a) Parámetros fotométricos:

- 1) Estímulos estudiados.
- 2) Nivel de luminancia.
- 3) Carácter de la igualación.
- 4) Tipo de fusión de primarios.

b) Parámetros temporales:

- 1) Tiempo de exposición de estímulos.
- 2) Tiempo entre exposiciones sucesivas.

c) Parámetros visuales:

- 1) Tipo de visión.
- 2) Modo de apariencia del estímulo.
- 3) Área y zona de la retina a estimular.
- 4) Tamaño y forma del campo.
- 5) Adaptación previa.
- 6) Adaptación temporal y espacial.

d) Observadores: Características y número.

4.2.1.- PARÁMETROS FOTOMÉTRICOS

De acuerdo con los objetivos planteados al comienzo de este trabajo, la elección de los estímulos es una cuestión de gran importancia. Está claro que esta elección se verá condicionada por el dispositivo experimental del que disponemos, pero de todos modos podemos exigirle al conjunto de estímulos elegido una serie de características con las que poder conseguir nuestros objetivos.

Para efectuar el estudio en el espacio CIE1931 buscamos estímulos distribuidos por todo el diagrama y que, además, para las mismas coordenadas de cromaticidad tuviesen diferentes niveles de luminancia. Estos estímulos son los que se muestran en la figura 4.2, y en las tablas IV.IV, V y VI aparecen especificadas además de las coordenadas de cromaticidad la luminancia de cada uno de los 66 estímulos estudiados. Como se puede observar, en el diagrama CIE1931 tenemos 6 planos de luminancia constante distintos: 2.41 cd/m² (14 estímulos), 3.87 cd/m² (14 estímulos), 5.93 cd/m² (13 estímulos), 9.04 cd/m² (10 estímulos), 13.02 cd/m² (9 estímulos) y 19.83 cd/m² (6 estímulos).

Además, pensando en una interpretación de los resultados según modelos de visión del color, los estímulos están situados en los puntos de intersección de 3 líneas de confusión tritán y 6 líneas de confusión rojo-verde. La llamada línea tritán 2 pasa por el estímulo equienergético, con lo que en ella el canal rojo-verde se encuentra equilibrado. Las otras líneas tritán, la 1 y la 3, se buscaron para que en ellas el canal rojo-verde se encontrase en el máximo desequilibrio que nuestro dispositivo permitía, hacia el verde la línea 1 y hacia el rojo la 3.

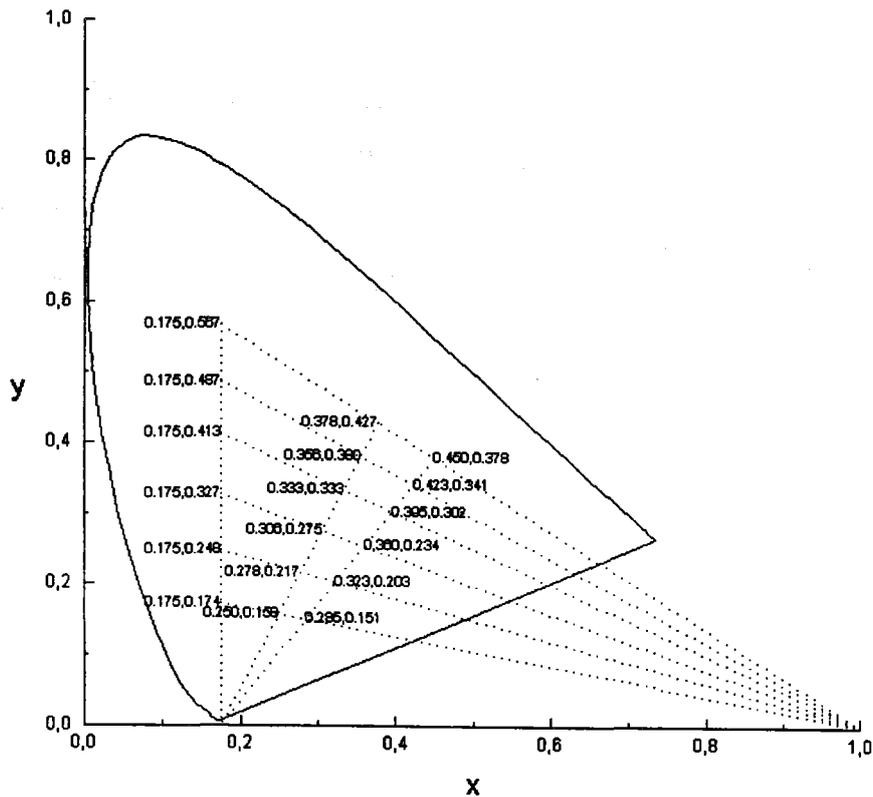


Fig. 4.2.-Situación en el diagrama CIE1931 de los estímulos estudiados.

Esta distribución de estímulos en el espacio de excitación de conos permitirá analizar umbrales de discriminación en planos de L+M constante. Además, al tener diferentes niveles de luminancia bien escogidos, tenemos conjuntos de estímulos en los que sólo varía la excitación de un canal y se mantiene constante la de los otros dos. La particular distribución de los estímulos se ve mejor en los cortes transversales de las tres líneas de confusión tritán que se muestran en las figuras 4.3, 4 y 5.

TABLA IV.IV

x	y	Y(cd/m ²)
0.175	0.567	19.83
		13.02
		5.93
		2.41
0.175	0.487	19.83
		13.02
		9.04
		3.87
0.175	0.413	13.02
		9.04
		5.93
		2.41
0.175	0.327	9.04
		5.93
		3.87
0.175	0.248	5.93
		3.87
		2.41
0.175	0.174	3.87
		2.41

TABLA IV.V

x	y	Y(cd/m ²)
0.378	0.427	19.83
		13.02
		9.04
		5.93
		3.87
		2.41
0.356	0.380	19.83
		13.02
		9.04
		5.93
		3.87
0.333	0.333	2.41
		9.04
		5.03
		3.87
		13.02
0.306	0.275	9.04
		5.93
		3.87
		2.41
0.278	0.217	5.93
		3.87
		2.41
0.250	0.158	3.87
		2.41

Tablas IV.IV y V.- Coordenadas de cromaticidad en el diagrama CIE1931 y luminancias en cd/m² de los estímulos situados sobre las líneas tritán 1 y 2.

TABLA IV.VI

x	y	Y(cd/m ²)
0.450	0.378	19.83
		13.02
		5.93
		2.41
0.423	0.341	19.83
		13.02
		9.04
		3.87
0.395	0.302	13.02
		9.04
		5.93
		2.41
0.360	0.254	9.04
		5.93
		3.87
0.323	0.203	5.93
		3.87
		2.41
0.285	0.151	3.87
		2.41

Tabla IV.VI.- Coordenadas de cromaticidad en el diagrama CIE1931 y luminancias en cd/m² de los estímulos situados sobre la línea tritán 3.

En estas figuras 4.3, 4 y 5 se ve claramente que tenemos los estímulos agrupados de la siguiente manera:

a) Grupos de estímulos con el mismo valor de iluminación retiniana L+M (líneas horizontales): Para cada línea de confusión tritán se tienen seis grupos con L+M desde 15.48 td hasta 127.25 td.

b) Grupos de estímulos con las mismas coordenadas de cromaticidad (líneas verticales): Para cada línea tritán volvemos a tener seis grupos. En estas líneas verticales las excitaciones de S y L-2M varían sólo porque lo hace L+M.

c) Grupos de estímulos con el mismo valor de S (líneas oblicuas): La excitación del canal S depende de las coordenadas de cromaticidad del estímulo y de su luminancia, pero a lo largo de estas líneas varían ambos parámetros de modo que S siempre es constante. En la línea tritán 2 tenemos 5 de estos grupos, con valores de S desde 16 Std hasta 116 Std, y tanto en la línea 1 como en la 3, 4 grupos de estímulos, con valores de S desde 16 Std hasta 116 Std.

Además de los grupos de estímulos que hemos comentado, existen otras agrupaciones posibles, ya que los tres estímulos que están en la misma posición de cada una de las figuras 4.3, 4 y 5 pertenecen a la misma línea rojo-verde; por tanto, tenemos un total de 20 ternas de estímulos que están en la misma línea de confusión rojo-verde.

Una vez determinadas las coordenadas de cromaticidad y la luminancia de los estímulos a estudiar, las posiciones de los diafragmas de los filtros se calcularon mediante un programa desarrollado a partir de los datos del calibrado de los colorímetros. En cuanto a la fusión de primarios,

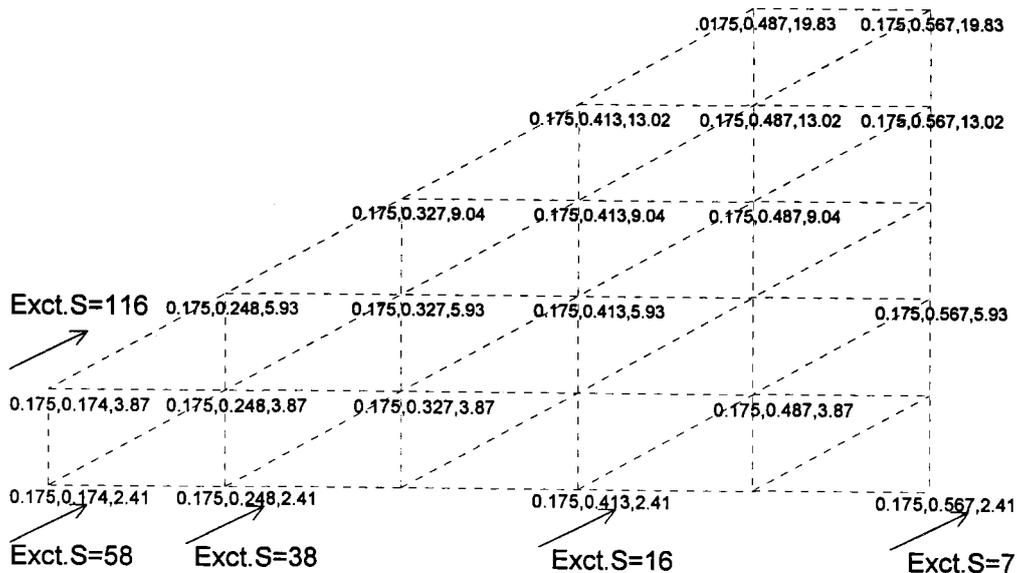


Fig. 4.3.- Corte vertical del diagrama cromático CIE1931 en la línea tritán 1.

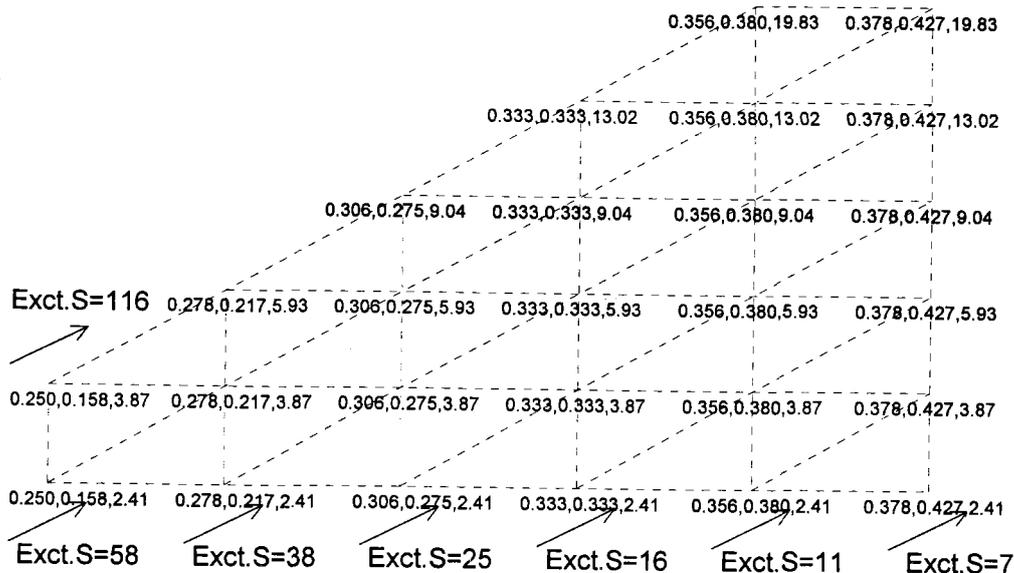


Fig. 4.4.- Corte vertical del diagrama cromático CIE1931 en la línea tritán 2.

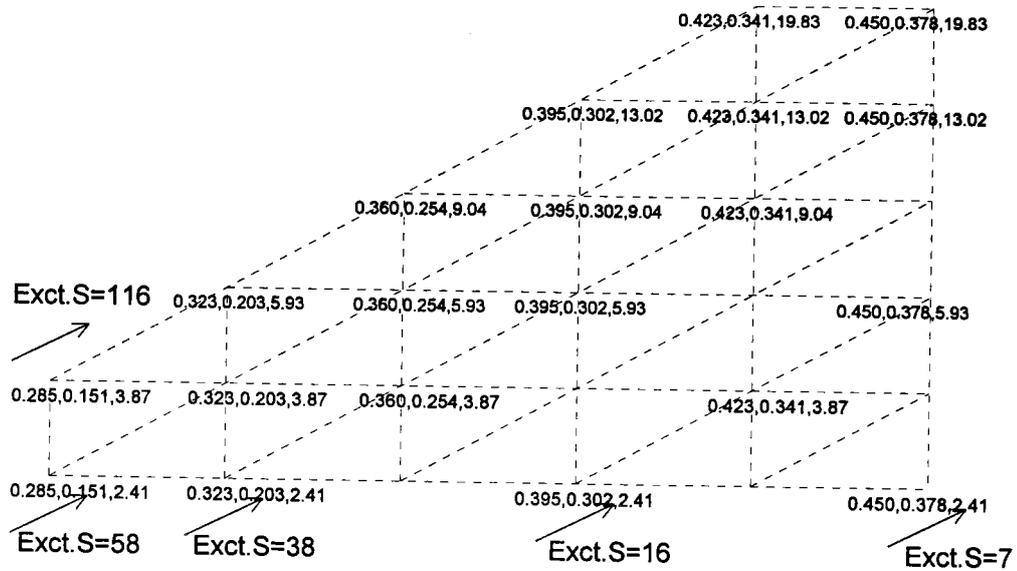


Fig. 4.5.- Corte vertical del diagrama cromático CIE1931 en la línea tritán 3.

ésta fue espacial, realizada en una cavidad integradora. Según algunos trabajos, Hita y Jiménez (1980), el tipo de fusión empleada no parece influir en la discriminación, lo que nos llevó a decidimos por la espacial debido a la facilidad en su obtención frente a la temporal. Como explicamos anteriormente al describir el tipo de filtros utilizados, las igualaciones fueron isómeras.

4.2.2.- PARÁMETROS TEMPORALES

Cada sesión experimental comenzaba con una adaptación previa del observador a un campo adaptante durante 10 minutos. Muchos autores los emplean para comodidad del observador en las sesiones experimentales, y otros como Miyahara et al. (1993) comparan diversos resultados obtenidos con diferentes campos. Después de la adaptación inicial el campo adaptante no desaparecía, sino que la sesión experimental se desarrollaba con él. Cada sesión duraba un total de aproximadamente 25 minutos, de los cuales los 15 últimos se dedicaban a la toma de medidas.

En cuanto a los tiempos de exposición y entre exposiciones sucesivas, éstos se fijaron en 1 y 10 s, respectivamente, basándonos en trabajos como los de Hita et al. (1980, 1982-a), que muestran que la discriminación mejora hasta tiempos de 1s, y que un tiempo interexposiciones de 10 s es suficiente para que el experimentador mueva los diafragmas de los filtros.

4.2.3.- PARÁMETROS VISUALES

Respecto al modo de visión, al diseñar el dispositivo experimental hemos intentado que éste se aproxime lo máximo posible al modo usual de observación, por lo que la visión empleada fue directa y no maxwelliana. Al dispositivo experimental del que disponíamos, Romero et al. (1993), se le efectuaron algunos cambios, como por ejemplo eliminar el uso de lentes o dobletes acromáticos. El cambio más importante fue la introducción de una pupila artificial (de 3 mm de diámetro, excepto al hacer observaciones con parejas de estímulos cuya excitación del cono S era de 116 Std, para los que el diámetro hubo de aumentar hasta 3.5 mm) que nos permitiese en todo momento tener controlada la iluminación retiniana. El observador podía acoplarse a esta pupila artificial gracias a una mentonera que lo mantenía inmóvil. El interés en colocar esta pupila artificial ya ha sido ampliamente descrito tanto en este capítulo como en el dedicado al dispositivo experimental.

La visión empleada en este trabajo ha sido central, foveal y monocular, fijado un campo circular bipartito de 2°, tamaño parecido a los de trabajos clásicos dentro de la colorimetría, como MacAdam (1942), Brown y MacAdam (1949) o Wyszecki y Fielder (1971). El modo de apariencia de los estímulos era de apertura.

Como indicamos en otro apartado anterior a éste, antes de cada sesión experimental hubo un periodo de adaptación a un campo proyectado sobre una superficie hemiesférica, de coordenadas de cromaticidad $x=0.532$ e $y=0.409$, y luminancia $Y=0.425$ cd/m². El uso de campos adaptantes y circundantes en este tipo de experiencias se va haciendo cada vez más corriente, McFadden (1992), Finkelstein (1993), Wei y Shevell (1995), y

autores como Miyahara et al. (1993) dejan claro que aunque habitualmente se usan campos circundantes oscuros, éstos no presentan demasiadas ventajas cuando se trata de realizar experiencias de este tipo, ya que obligan al observador a realizar un esfuerzo cada vez que aparece el estímulo a discriminar. Por esto, el campo adaptante se mantenía durante toda la sesión experimental.

4.2.4.- OBSERVADORES

En las medidas experimentales participaron dos observadores, AY y JA, una mujer y un hombre de 27 y 38 años, respectivamente. La visión al color de estos observadores, ya entrenados en tareas de discriminación, se considera "normal", después de realizar pruebas como el test de Ishihara, la del Colegio Médico de Tokio, el Farnsworth D-15 y el anomaloscopio de Pickford-Nicolson. Estos dos observadores son amétropes, aunque compensados.

El número de observadores que participaron es el normal en estas experiencias, tal y como se describe en la literatura, Ronchi y Ferrara Mori (1963). Por supuesto que sería interesante contar con muchos más observadores con el ánimo de generalizar resultados, pero un número excesivo de ellos haría excesivamente largo el tiempo total de toma de medidas. Además, existen estudios sobre la variabilidad interobservador, como el de García et al. (1993), Brown (1957), que nos ha llevado a considerar como "normal" las diferencias entre los umbrales de JA y AY, por lo que el número de observadores que iban a participar en las experiencias quedó fijado en dos.

4.3.- Desarrollo de las experiencias y evaluación de los datos

Una vez elegido el método a seguir, se comenzaron las sesiones experimentales encaminadas a obtener los umbrales de discriminación que luego se analizarían. Dado que los observadores que participaron poseían amplia experiencia en este campo de investigación con este tipo de dispositivos, no fue necesario el previo entrenamiento que se suele llevar a cabo habitualmente.

Antes de empezar la sesión experimental, el observador se adaptaba durante unos 10 minutos a un campo descrito anteriormente, y después comenzaban a aparecer los estímulos durante 1 s a intervalos de 10 s. Con el método experimental utilizado, los estímulos variables se movían a lo largo de una misma línea pero aparecían de modo aleatorio; además, en una misma sesión se analizaba más de una línea para evitar que el observador se acostumbrase a la variación concreta de los estímulos sobre una línea.

Cada aproximadamente 10 exposiciones, al observador se le presentaba en los dos semicampos el mismo estímulo para comprobar si los seguía viendo iguales. En caso contrario, se rectificaba la posición de su cabeza que había podido cambiar durante la sesión o se abandonaba ésta si el observador ya se encontraba fatigado.

Las primeras sesiones se dedicaban a determinar en qué zona se encontraba el umbral sobre cada línea, es decir, establecer la zona en la que el observador empezaba a ver desiguales con más frecuencia los estímulos. En las siguientes sesiones se intentaba encontrar este límite con mayor exactitud, variando los estímulos siempre en esa zona, pero sin dejar de

volver cada 10 exposiciones aproximadamente a la igualación para evitar la adaptación del observador.

Finalmente, para determinar el umbral se tenía en cuenta la respuesta objetiva del observador ("sí" o "no"). En principio se decidía tomar como umbral el estímulo ante el que el observador había respondido sólo un 20% de veces que era igual al de referencia, y después se le volvía a presentar este estímulo umbral y otros de la misma línea cercanos a él para confirmarlo como umbral o no. Los estímulos que con más frecuencia se le presentaban al observador eran, además de la igualación, los que se encontraban en la zona en la que se había determinado en las primeras sesiones que iba a estar el umbral; estos estímulos se presentaban siempre un mínimo de 10 veces.

El orden en el que los estímulos se muestran en las tablas IV.IV, V y VI no responde al orden real en el que se estudiaron. No obstante, se estudiaban seguidos los estímulos sobre la misma línea de excitación de S constante (líneas oblicuas), aunque en un orden totalmente arbitrario.

Dependiendo de las características del estímulo estudiado y de cada observador, fueron necesarias de 5 a 8 sesiones por estímulo de referencia para determinar sus umbrales de discriminación, lo que supone entre 450 y 720 observaciones para cada observador. Teniendo en cuenta que se han estudiado 66 estímulos, la obtención de los datos experimentales de este trabajo ha supuesto más de 75000 observaciones.

En cuanto a la evaluación de los datos experimentales, encontramos que sería interesante comparar los umbrales calculados por nosotros con los de otros autores en el diagrama CIE1931. El problema estaba en que muchos de estos umbrales son elipses, mientras que nosotros, debido al método

seguido, obtuvimos umbrales sobre líneas. Por eso intentamos ajustar los extremos de los umbrales sobre cada línea (un total de 8 extremos, 2 por cada una de las 4 líneas) a una elipse, cuya expresión matemática vendría dada por:

$$(dS)^2 = g_{11}\Delta x^2 + 2g_{12}\Delta x\Delta y + g_{22}\Delta y^2$$

y cuya bondad de ajuste la expresa χ^2 , De Groot (1986).

Aparte, también se deseaba analizar los resultados en el espacio de excitación de conos. En este diagrama se representa en las abcisas el valor L-2M del estímulo, y en ordenadas el nivel de excitación del cono S, siendo este diagrama a luminancia L+M constante.

La transformación de un diagrama a otro se debe hacer estímulo a estímulo según la relación entre los espectros de acción de los conos del modelo de Boynton (1986) y las funciones de mezcla modificadas por Judd:

$$L_\lambda = 0.15514\bar{x}'_\lambda + 0.54321\bar{y}'_\lambda - 0.03286\bar{z}'_\lambda$$

$$M_\lambda = -0.15514\bar{x}'_\lambda + 0.45684\bar{y}'_\lambda + 0.03286\bar{z}'_\lambda$$

$$S_\lambda = \bar{z}'_\lambda$$

Con estas expresiones, ya podríamos calcular los valores L, M y S de un estímulo de radiancia espectral R_λ utilizando:

$$L = \int_{vis} R_\lambda L_\lambda d\lambda \quad , \quad M = \int_{vis} R_\lambda M_\lambda d\lambda \quad , \quad S = \int_{vis} R_\lambda S_\lambda d\lambda \quad .$$



**Capítulo 5: Análisis y discusión de los
resultados experimentales
en el diagrama CIE1931**

5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EN EL DIAGRAMA CIE1931

En este capítulo mostraremos en el diagrama CIE1931 los resultados obtenidos, y los analizaremos y discutiremos, comparándolos con los de algunos trabajos clásicos dentro de la literatura. Como indicamos al principio, uno de los objetivos de este trabajo es analizar la influencia del parámetro luminancia sobre los umbrales de cromaticidad, por lo que se han estudiado estímulos con iguales coordenadas de cromaticidad y con 3 ó 4 niveles de luminancia diferentes.

Por ello, hemos creído conveniente dividir este capítulo en dos apartados: en el primero se analizarán los umbrales de cromaticidad en el diagrama CIE1931, presentados éstos en planos de luminancia constante, y en el segundo se estudiará la influencia de la luminancia sobre los umbrales, que se verá reflejada cuando mostremos las elipses obtenidas para cada par de coordenadas de cromaticidad con los diferentes niveles de luminancia.

5.1.- Análisis y discusión de las elipses de discriminación en planos de luminancia constante del diagrama CIE1931

Como ya comentamos en el capítulo dedicado a la revisión bibliográfica de trabajos sobre discriminación cromática, la mayoría de ellos analizan sus resultados en el espacio cromático CIE1931, ya que eso posibilita la comparación de los resultados obtenidos en cada uno de ellos con los de otros trabajos dentro de este campo.

En la mayoría de éstos, los umbrales se obtuvieron a una luminancia constante que iban por ejemplo desde las 12 cd/m² de Miyahara et al. (1993) (que no analizan sus resultados en el diagrama CIE1931) y Romero et al. (1993) hasta las 48 cd/m² de MacAdam (1942). Por eso, para poder establecer una comparación entre los resultados de estos autores y los obtenidos en nuestro laboratorio, presentaremos en este apartado las elipses de discriminación en el diagrama CIE1931 en planos de luminancia constante.

A continuación exponemos la tabla V.I, donde aparecen los parámetros característicos de las elipses de los 14 estímulos de luminancia $Y=2.41$ cd/m² para los dos observadores. En esta tabla los estímulos están divididos en tres grupos correspondientes a cada una de las líneas de confusión tritán sobre las que se encuentre situado cada uno. De la observación de la tabla podemos ver que las elipses con una orientación mayor son las del primer grupo (línea tritán a 90°) y las de menor son las del tercer grupo (línea tritán a 53.95°), y que generalmente las elipses tienden a tener una orientación similar a la de la línea de confusión tritán correspondiente. Las elipses que más se apartan de esta tendencia son las del primer grupo, pero si nos fijamos en la tabla, veremos que son elipses muy redondeadas, perdiendo

TABLA V.I

x	y	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
0.175	0.567	JA	0.61	127.31	20.42
		AY	0.50	116.02	28.85
0.175	0.413	JA	0.82	107.19	23.84
		AY	0.89	114.43	27.19
0.175	0.248	JA	0.73	78.39	3.00
		AY	0.74	58.46	2.94
0.175	0.174	JA	0.59	89.87	1.28
		AY	0.67	99.72	1.12
0.378	0.427	JA	0.33	63.17	8.44
		AY	0.32	76.95	10.77
0.356	0.380	JA	0.36	74.13	13.33
		AY	0.37	74.29	13.11
0.333	0.333	JA	0.23	80.69	8.83
		AY	0.16	46.47	15.17
0.306	0.275	JA	0.37	70.25	7.06
		AY	0.09	55.20	3.39
0.278	0.217	JA	0.42	71.65	3.10
		AY	0.12	52.08	2.50
0.250	0.158	JA	0.31	68.20	5.12
		AY	0.27	60.82	4.40
0.450	0.378	JA	0.38	70.53	7.46
		AY	0.14	72.08	18.98
0.395	0.302	JA	0.37	69.56	5.75
		AY	0.18	61.92	12.32
0.323	0.203	JA	0.41	37.89	5.04
		AY	0.10	57.83	7.70
0.285	0.151	JA	0.25	51.96	2.62
		AY	0.25	37.75	1.35

Tabla V.I.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática para estímulos con luminancia $Y=2.41 \text{ cd/m}^2$.

entonces importancia el valor de la orientación.

En cuanto a la relación de semiejes, los valores son muy variados (desde 0.09 hasta 0.89), pero por regla general son elevados, sobre todo para las elipses de los estímulos de la línea tritán 1 (los estímulos más verdes) y los de la coordenada y mayor. Por otra parte, las elipses más elongadas son las obtenidas para los estímulos situados en la zona de los azules.

En la tabla anterior hemos podido observar que los valores de la orientación y de la relación de semiejes son relativamente variados, pero el parámetro que más varía para los diferentes estímulos es el área de las elipses, ya que los valores se mueven en un intervalo desde 1.12 hasta 28.85. Dentro de cada grupo de los tres en los que se dividen los estímulos, las áreas de las elipses son normalmente menores para aquellas de los estímulos más azules. La diferencia en área entre elipses correspondientes a la misma línea de confusión tritán es mayor para los estímulos situados sobre la línea tritán 1 (90°).

Todos estos comentarios que hemos hecho sobre los parámetros característicos de las elipses son válidos para ambos observadores, aunque entre ellos puedan existir algunas diferencias. Los valores de la orientación de las elipses son parecidos, pero si nos fijamos en la relación de semiejes, se puede ver que generalmente las elipses obtenidas para el observador AY son más elongadas que para el observador JA, y esta diferencia es más acusada en los estímulos de las líneas tritán 2 (a 64.59°) y 3 (a 53.95°). También existe una diferencia entre los observadores en cuanto a las áreas de las elipses, que normalmente son mayores para AY, aunque para los estímulos más azules este mismo observador suele obtener áreas más pequeñas que JA. Es este último observador el que muestra unos resultados más uniformes, al contrario que AY, algunas de cuyas elipses se salen de la

norma general que siguen el resto, lo que se puede ver claramente en la figura 5.1. Algunos de estos resultados "anormales" son, por ejemplo, la orientación de 58.46° para la elipse del estímulo (0.175, 0.248) o la relación de semiejes de 0.09 para la de (0.306, 0.275). Estas diferencias se deben fundamentalmente a la variabilidad interobservador y al hecho de trabajar con el sistema visual humano, sobre el que pueden influir múltiples parámetros, a pesar de que se intentó promediar las condiciones psicológicas del observador durante todo el tiempo que duró la toma de datos.

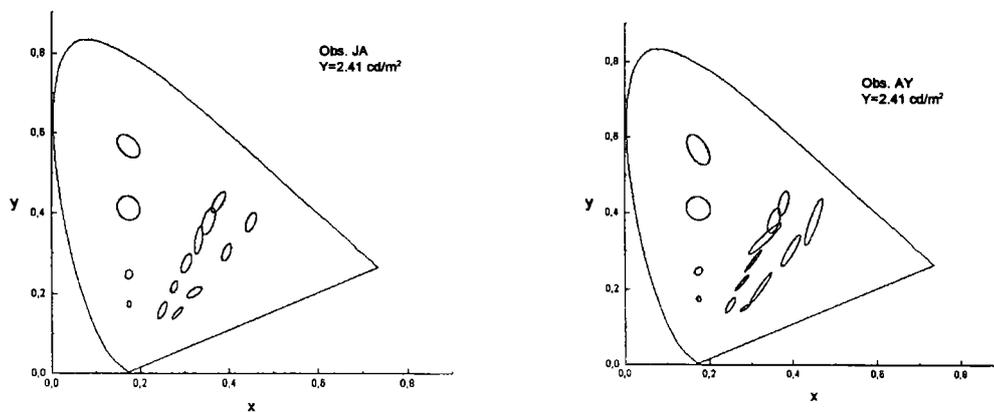


Fig. 5.1.- Elipses de discriminación en planos de luminancia constante igual a 2.41 cd/m^2 del diagrama cromático CIE1931 para los observadores JA y AY.

Una vez expuestas las características principales de la tabla V.I, pasaremos a comparar estos resultados con los de otros trabajos que encontramos en la literatura al respecto. No hay que olvidar que la mayoría de estos trabajos han sido realizados con niveles de luminancia claramente fotópicos (12 cd/m^2 de Romero et al. (1993) o 48 cd/m^2 de MacAdam (1942)), con lo que sólo sería adecuada una comparación con los resultados que hemos obtenido para las luminancias mayores, de 9.04 cd/m^2 en adelante, no

siendo tal vez tan válida para las de 2.41, 3.87 ó 5.93 cd/m². No obstante, debido al gran número de resultados de los que disponemos y a la importancia de estos trabajos, no queremos dejar de realizar esta comparación.

Empezaremos comparando el plano de luminancia constante igual a 2.41 cd/m² con el único de 12 cd/m² de Romero et al. (1993), cuyas elipses cubren como en nuestro caso todo el diagrama cromático, comprobando que los resultados son similares. Las elipses de discriminación muestran la tendencia a orientarse sobre la línea de confusión tritán que pasa por el centro de la elipse, y las que más parecen apartarse de la línea tritán son las correspondientes a estímulos verdes.

En el trabajo de MacAdam (1942) también se observa esta alineación del eje mayor de las elipses con la línea de confusión tritán correspondiente, alejándose tan sólo de ella las elipses de los estímulos verdes, y en el de Brown y MacAdam (1949), aunque la orientación de la línea tritán queda generalmente por encima de la orientación de las elipses, sus resultados muestran la misma tendencia que los nuestros.

En cuanto a la relación de semiejes, vemos que las de las elipses de MacAdam (1942) son siempre iguales o menores que 0.5, es decir, bastante elongadas en comparación con las nuestras, probablemente debido a que MacAdam (1942) trabajó a luminancia constante. Elipses más redondeadas obtuvieron Brown y MacAdam (1949) y Romero et al. (1993), y además valores mucho más variados. En nuestros resultados podemos ver que el rango de valores dentro del que varía la relación de semiejes en un plano de luminancia constante es mucho mayor que en los casos anteriores (por ejemplo, para el observador AY la relación de semiejes varía desde 0.09 hasta 0.89), pero encontramos la similitud con éstos de que las elipses más

elongadas corresponden a la zona de los azules. Sin embargo, en nuestro caso, las elipses más redondeadas no corresponden a la zona de los naranjas-rojos, sino a la de los verdes.

El siguiente parámetro a analizar será el área de las elipses. La primera característica que notamos es que los umbrales obtenidos son similares en tamaño a los de Romero et al. (1993). Como ejemplo podemos citar que estos autores obtienen para estímulos acromáticos elipses de áreas entre 4×10^{-4} y 9×10^{-4} dependiendo del observador, muy parecidas a las nuestras. En cambio, menores son las elipses de MacAdam (1942) y Brown y MacAdam (1949), como se puede apreciar comparando nuestras figuras y la de los resultados de estos autores que aparecen en el capítulo 2. Aparte de esta diferencia, debida principalmente a haber utilizado diferentes métodos experimentales, en todos los trabajos podemos encontrar que las elipses de menor área corresponden a estímulos situados en la zona de los azules del diagrama cromático, y que generalmente las de mayor área están en la zona de los verdes, aunque la diferencia en cada plano de luminancia entre la elipse de mayor área y la menor no es tan grande como en el caso de MacAdam (1942).

El siguiente plano a analizar es el correspondiente a la luminancia $Y=3.87 \text{ cd/m}^2$. En la tabla V.II tenemos los parámetros de las elipses de los 14 estímulos con esta luminancia, y en ella observamos las mismas características que apuntamos en la tabla V.I. Como en el plano de $Y=2.41 \text{ cd/m}^2$, las mayores orientaciones son las de las elipses de estímulos situados sobre la línea tritán 1, y las menores las de los que están sobre la línea tritán 3, pero de modo que las elipses se orienten aproximadamente sobre la línea de confusión tritán correspondiente. Las relaciones de semiejes son también elevadas y parecidas a las de la primera tabla, aunque la diferencia entre valores no sea quizá tan grande, ya que los valores van en este caso desde

TABLA V.II

x	y	Obs.	b/a	θ (°)	Área $\times 10^4$
0.175	0.487	JA	0.80	148.36	15.85
		AY	0.86	93.20	17.42
0.175	0.327	JA	0.71	112.06	5.94
		AY	0.71	50.09	5.46
0.175	0.248	JA	0.70	169.65	5.73
		AY	0.58	64.87	5.06
0.175	0.174	JA	0.70	95.82	2.07
		AY	0.61	108.95	1.81
0.378	0.427	JA	0.49	63.24	5.09
		AY	0.19	35.47	3.07
0.356	0.380	JA	0.65	63.52	6.81
		AY	0.73	57.77	6.36
0.333	0.333	JA	0.21	67.71	6.62
		AY	0.65	73.44	4.15
0.306	0.275	JA	0.36	64.16	7.15
		AY	0.22	61.67	7.60
0.278	0.217	JA	0.25	74.99	11.23
		AY	0.58	55.06	2.71
0.250	0.158	JA	0.17	78.97	4.98
		AY	0.37	61.26	3.10
0.423	0.341	JA	0.27	66.70	9.27
		AY	0.26	67.93	5.15
0.360	0.254	JA	0.30	44.98	1.89
		AY	0.20	62.07	3.49
0.323	0.203	JA	0.36	28.62	3.59
		AY	0.46	55.86	6.03
0.285	0.151	JA	0.53	74.90	1.12
		AY	0.53	54.99	1.00

Tabla V.II.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática para estímulos con luminancia $Y=3.87 \text{ cd/m}^2$.

0.17 hasta 0.86. Se sigue comprobando que también ahora las elipses más elongadas, es decir, las de relación de semiejes menores, son las de los estímulos azules, aunque eso no se vea tan claro en los estímulos situados sobre la línea tritán 3, y las más redondeadas, o sea, las de relación de semiejes mayores, las de los estímulos situados en la zona de los verdes. Lo que sí se ve claramente es que el área de las elipses es menor a medida que nos vamos acercando a la zona de los azules, a pesar de que algunos estímulos no siguen esa pauta, y que ésta es generalmente similar para las elipses de ambos observadores, aunque para los estímulos más azules el observador AY obtiene elipses generalmente más pequeñas.

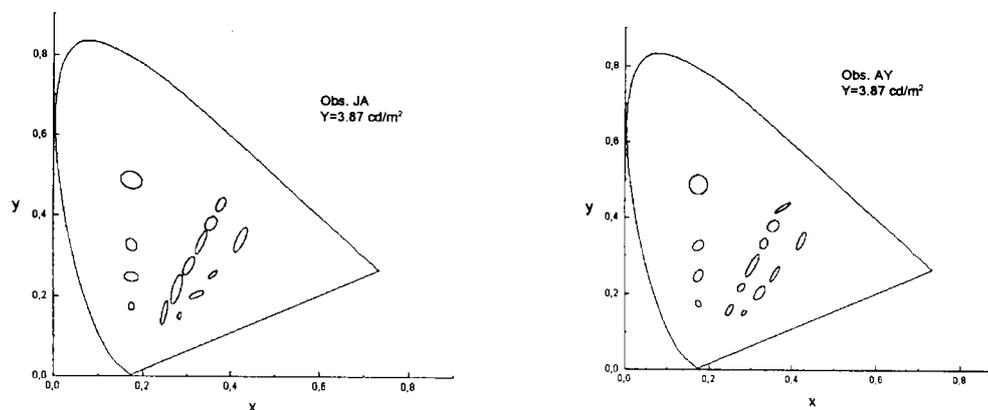


Fig. 5.2.- Elipses de discriminación en planos de luminancia constante igual a 3.87 cd/m^2 del diagrama cromático CIE1931 para los observadores JA y AY.

En la figura 5.2, correspondiente a $Y=3.87 \text{ cd/m}^2$ y a ambos observadores, JA y AY, se pueden ver las mismas características que hemos comentado anteriormente para el plano de $Y=2.41 \text{ cd/m}^2$ y explicado al presentar la tabla V.II. Nuevamente las elipses tienden a orientarse sobre la línea tritán, y las que más se apartan de esta tendencia son las elipses de los estímulos más verdes. Esto se puede observar claramente en la primera

gráfica de la figura 5.2, correspondiente al observador JA. En ella se ve que las elipses de estímulos situados sobre la línea 2 se orientan sobre ella, mientras que las elipses de los estímulos de coordenadas (0.175,0.487) y (0.175,0.327), por ejemplo, que están sobre la línea tritán 1 (90°) tienen una orientación de 148.36 y 112.06°, respectivamente.

Las relaciones de semejez de las elipses de estímulos con $Y=3.87$ cd/m^2 son muy variadas, aunque no tanto como en el caso anterior de $Y=2.41$ cd/m^2 , y entre ellas existe más diferencia que entre las de MacAdam (1942). Como ejemplo tenemos las relaciones del observador AY con esta luminancia, que van desde 0.19 a 0.86. Otra vez podemos notar que las elipses más redondeadas son las de los estímulos verdes.

Son también ahora las elipses de los verdes las que tienen un área mayor, aunque las de los estímulos sobre la línea tritán 2 casi son del mismo orden. De cualquier modo, la elipse mayor es la del estímulo más verde (0.175,0.487) que tiene un área de 15.85 y 17.42 para los observadores JA y AY, respectivamente. Como en trabajos anteriores, Romero et al. (1993), MacAdam (1942) y Brown y MacAdam (1949), las elipses más pequeñas se sitúan en la zona de los azules del diagrama cromático.

Pasamos ahora a la tabla V.III y a la representación de estas elipses obtenidas con un nivel de luminancia de 5.93 cd/m^2 en la figura 5.3. Como en los dos planos de luminancia que ya hemos visto, las principales características son las mismas: elipses que se orientan sobre la línea de confusión tritán correspondiente (las de los verdes son las que más se apartan de esta línea), la relación de semejez son en bastantes casos mayores de 0.5 y mucho más diferentes entre sí que las de otros trabajos, y las elipses de mayor área son las correspondientes a estímulos verdes, mientras que las menores son las de las azules. Sin embargo, debemos

TABLA V.III

x	y	Obs.	b/a	θ (°)	Área $\times 10^4$
0.175	0.567	JA	0.67	144.81	23.02
		AY	0.63	136.10	24.31
0.175	0.413	JA	0.64	108.92	9.25
		AY	0.69	118.57	10.86
0.175	0.327	JA	0.59	114.98	6.12
		AY	0.86	70.36	7.99
0.175	0.248	JA	0.67	95.15	2.05
		AY	0.73	104.83	1.79
0.378	0.427	JA	0.31	61.34	5.31
		AY	0.26	59.84	5.60
0.356	0.380	JA	0.28	60.32	6.38
		AY	0.29	59.19	5.93
0.333	0.333	JA	0.52	51.86	5.07
		AY	0.28	63.78	8.11
0.306	0.275	JA	0.45	64.16	4.66
		AY	0.62	70.23	6.80
0.278	0.217	JA	0.29	52.82	3.28
		AY	0.22	49.50	2.81
0.450	0.378	JA	0.32	29.61	7.86
		AY	.023	51.32	3.77
0.395	0.302	JA	0.21	69.93	4.71
		AY	0.50	52.76	11.20
0.360	0.254	JA	0.22	50.58	4.06
		AY	0.26	41.86	6.53
0.323	0.203	JA	0.51	56.27	1.70
		AY	0.35	55.86	1.62

Tabla V.III.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática para estímulos con luminancia $Y=5.93 \text{ cd/m}^2$.

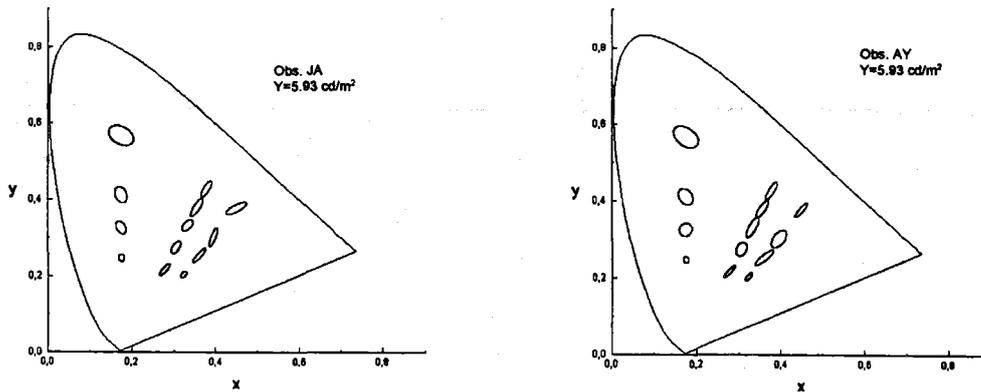


Fig. 5.3.- Elipses de discriminación en planos de luminancia constante igual a 5.93 cd/m² del diagrama cromático CIE1931 para los observadores JA y AY.

resaltar el hecho de que, como se puede constatar a la vista de la tabla y las figuras correspondientes, la variabilidad interobservador es ahora mucho menor, a la vez que destaca la ausencia de irregularidades como las que comentamos en el plano de $Y=2.41$ cd/m².

Las tablas que mostraremos ahora son la tabla V.IV y su correspondiente figura 5.4, y también la tabla V.V y su figura 5.5, de interés ya que corresponden a luminancias de 9.04 y 13.02 cd/m², muy parecidas a las 12 cd/m² utilizadas por Romero et al. (1993) en sus experiencias, por lo que la comparación con estos resultados es más adecuada que en los otros casos.

En estas tablas y figuras encontramos nuevamente las características que ya hemos apuntado para las otras luminancias, y que se pueden ver también a la vista de la tabla V.VI y de la siguiente figura 5.6, aunque en esta última, al existir sólo 6 elipses en cada gráfica, estas características no parecen tan claras. Se sigue manteniendo la tendencia de las elipses a orientarse sobre la línea de confusión tritán correspondiente, pero, por

TABLA V.IV

x	y	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
0.175	0.487	JA	0.46	124.09	10.95
		AY	0.47	121.58	13.04
0.175	0.413	JA	0.71	125.22	6.52
		AY	0.61	108.60	7.73
0.175	0.327	JA	0.43	79.88	2.88
		AY	0.60	107.31	5.85
0.378	0.427	JA	0.35	52.65	4.86
		AY	0.32	65.89	7.05
0.356	0.380	JA	0.37	79.61	6.80
		AY	0.56	49.77	5.80
0.333	0.333	JA	0.34	50.39	8.93
		AY	0.28	55.21	6.93
0.306	0.275	JA	0.39	85.14	3.04
		AY	0.15	84.97	8.80
0.423	0.341	JA	0.26	44.15	1.35
		AY	0.14	48.52	2.52
0.395	0.302	JA	0.24	65.46	3.62
		AY	0.22	69.91	2.44
0.360	0.254	JA	0.47	72.05	2.18
		AY	0.44	65.91	2.51

Tabla V.IV.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática para estímulos con luminancia $Y=9.04$ cd/m².

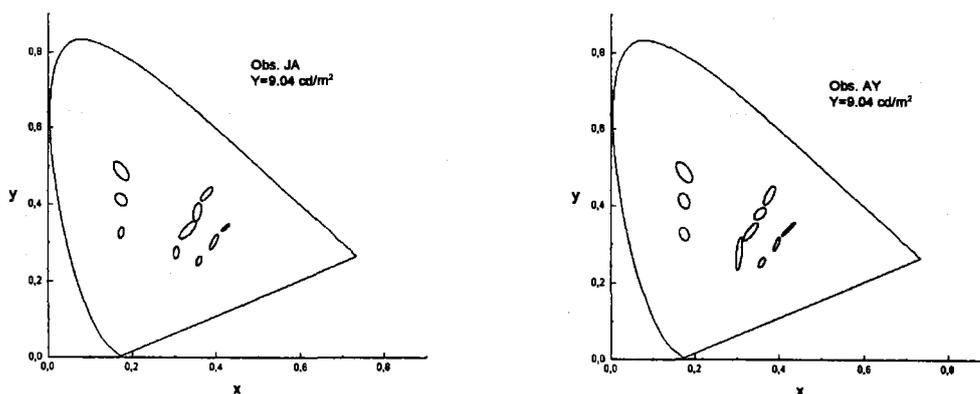


Fig. 5.4.- Elipses de discriminación en planos de luminancia constante igual a 9.04 cd/m² del diagrama cromático CIE1931 para los observadores JA y AY.

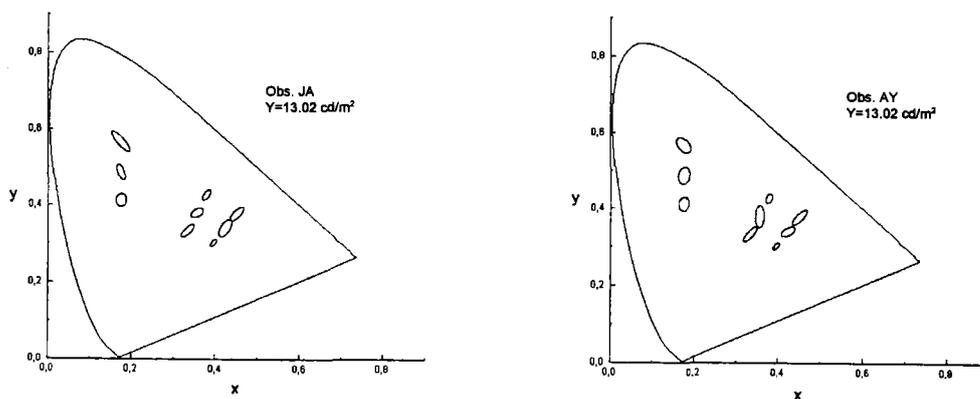


Fig. 5.5.- Elipses de discriminación en planos de luminancia constante igual a 13.02 cd/m² del diagrama cromático CIE1931 para los observadores JA y AY.

TABLA V.V

x	y	Obs.	b/a	θ (°)	Área $\times 10^4$
0.175	0.567	JA	0.27	127.77	9.57
		AY	0.55	124.34	9.84
0.175	0.487	JA	0.37	105.80	5.04
		AY	0.62	111.92	9.26
0.175	0.413	JA	0.74	82.68	6.68
		AY	0.68	84.87	7.06
0.378	0.427	JA	0.41	56.18	3.23
		AY	0.57	70.35	2.98
0.356	0.380	JA	0.58	35.16	5.10
		AY	0.37	88.69	9.36
0.333	0.333	JA	0.35	48.34	5.04
		AY	0.29	52.57	5.61
0.450	0.378	JA	0.37	48.88	6.25
		AY	0.33	49.59	6.54
0.423	0.341	JA	0.45	61.23	8.80
		AY	0.50	33.13	5.58
0.395	0.302	JA	0.45	54.36	1.64
		AY	0.45	53.19	1.61

Tabla V.V.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática para estímulos con luminancia $Y=13.02 \text{ cd/m}^2$.

ejemplo, al no haber elipses de estímulos azules, no podemos ver si para la luminancia de 19.83 cd/m^2 , éstas siguen siendo las de menor área. Lo que más destaca en las figuras de los planos de luminancia de 9.04, 13.02 y 19.83 cd/m^2 es que los resultados son mucho más parecidos entre ambos observadores que cuando la luminancia era más baja, y además, para cada observador, más uniformes.

Como resumen de los comentarios que se han hecho para todos los niveles de luminancia expuestos, citaremos una serie de características que han aparecido en todos ellos. La primera es que las elipses de discriminación cromática tienden a orientar su semieje mayor sobre la línea de confusión tritán, lo que indicaría que la capacidad de discriminación es peor en el eje amarillo-azul que en el rojo-verde. Las que más se apartan de la línea tritán son las elipses de los estímulos verdes, aunque esto no es especialmente significativo ya que son tan redondeadas que el valor de la orientación pierde importancia. También se apartan de la línea tritán las elipses correspondientes a estímulos sobre la línea 3, pero no tanto como las de la línea 1, lo que indicaría una menor sensibilidad en el mecanismo rojo-verde cuando éste se encuentra desequilibrado. Cuanto más desequilibrado esté, peor deberá ser la discriminación en este mecanismo, con lo que la elipse se apartará más de la línea tritán. Esta es la causa de que las elipses de la línea 1 sean las que menos tienden a orientarse sobre la línea tritán, ya que sobre ella el mecanismo rojo-verde se encuentra más desequilibrado que en la línea 3, y por supuesto, que en la 2.

El que, como hemos indicado anteriormente, la capacidad de discriminación sea peor en el eje amarillo-azul explicaría el hecho de que las elipses más elongadas sean las situadas en la zona de los azules, ya que los estímulos de esta zona tienen un alto contenido de primario azul, lo que implicaría una peor discriminación en el mecanismo tritán. De todas formas, la

TABLA V.VI

x	y	Obs.	b/a	θ (°)	Área $\times 10^4$
0.175	0.567	JA	0.16	96.09	8.31
		AY	0.59	109.20	6.45
0.175	0.487	JA	0.59	110.79	10.12
		AY	0.33	77.43	8.29
0.378	0.427	JA	0.41	85.14	3.71
		AY	0.18	81.05	3.24
0.356	0.380	JA	0.86	120.04	3.21
		AY	0.27	87.22	9.88
0.450	0.378	JA	0.32	25.46	2.89
		AY	0.29	63.63	5.12
0.423	0.341	JA	0.46	56.90	1.43
		AY	0.50	50.51	1.24

Tabla V.VI.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática para estímulos con luminancia $Y=19.83 \text{ cd/m}^2$.

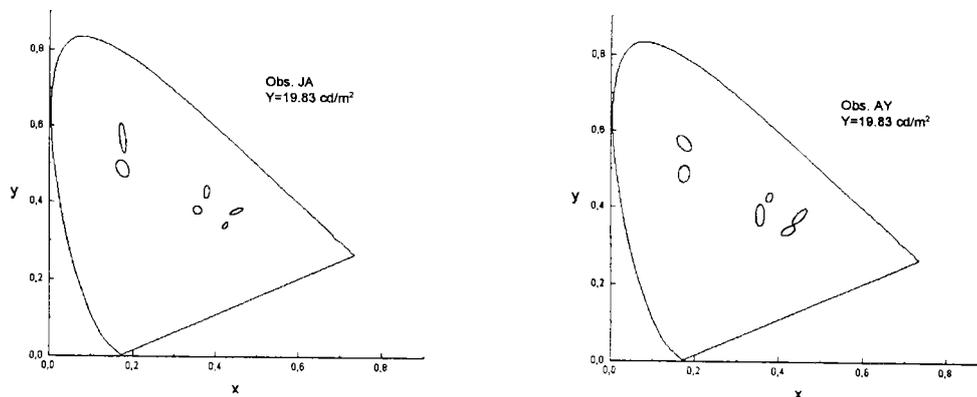


Fig. 5.6.- Elipses de discriminación en planos de luminancia constante igual a 19.83 cd/m^2 del diagrama cromático CIE1931 para los observadores JA y AY.

gran variabilidad en cuanto a la orientación y la relación de semiejes de las elipses hace difícil que se puedan extraer conclusiones definitivas.

Otra de las características que se mantiene para todas las luminancias es que las elipses de menor área son las de los estímulos azules y las mayores las de los verdes, lo que se debe principalmente a la propia definición del diagrama cromático CIE1931, es decir, a su falta de uniformidad.

En relación a los observadores, se puede decir que la variabilidad interobservador es más pequeña cuando la luminancia tiene un valor de 5.93 cd/m^2 o mayor. En cambio, cuando la luminancia es menor, la diferencia entre los resultados de ambos aumenta, obteniendo el observador AY elipses mucho más elongadas y mostrando algunos resultados irregulares que no siguen la norma general del resto. La explicación a esto se encontraría no sólo en que el número de estímulos es menor a medida que la luminancia aumenta (de 14 estímulos a 2.41 cd/m^2 a 6 a 19.83 cd/m^2) y por tanto existe menor posibilidad de encontrar esas irregularidades, sino también en que la discriminación empeora al disminuir la luminancia, con lo que es mucho más fácil que las irregularidades en los resultados aparezcan. Además, la propia variabilidad interobservador inherente a este tipo de experiencias también es causa de las diferencias que aparecen entre los resultados de ambos observadores. De cualquier modo, la influencia de la luminancia sobre la capacidad de discriminación se analizará en el siguiente apartado.

Por último, no debemos olvidar destacar la coincidencia de nuestros resultados con los de trabajos de diversos autores, a pesar de que en cada uno de ellos se han utilizado diferentes métodos experimentales y se han comparado niveles de luminancia muy diferentes.

5.2.- Análisis y discusión en el diagrama CIE1931 de elipses de estímulos con iguales coordenadas de cromaticidad y diferentes niveles de luminancia

Uno de los objetivos de nuestro trabajo, como explicamos en la introducción de esta memoria, es hacer un análisis de la discriminación cromática atendiendo también al parámetro de la luminancia de los estímulos. Por tanto, abordaremos ahora el análisis de las elipses de discriminación cuando las coordenadas de cromaticidad x,y permanecen constantes y es la coordenada Y la que varía.

Las elipses obtenidas para todos los estímulos estudiados y para los dos observadores se mostrarán en este apartado, así como las tablas con sus parámetros característicos. Para realizar el análisis que nos proponemos, las elipses están agrupadas: elipses para estímulos con las mismas coordenadas de cromaticidad x,y y con diferentes niveles de luminancia.

Las figuras y tablas que mostraremos a continuación, figuras de la 5.7 a la 5.12 y tablas de la V.VII a la V.XII, son las de las elipses correspondientes a estímulos situados sobre la línea de confusión tritán 1, es decir, la de pendiente de 90° , para ambos observadores.

TABLA V.VII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.175 y=0.567	Y=19.83	JA	0.16	96.09	8.31
		AY	0.59	109.20	6.45
	Y=13.02	JA	0.27	127.77	9.57
		AY	0.55	124.34	9.84
	Y=5.93	JA	0.67	144.81	23.02
		AY	0.63	136.10	24.31
	Y=2.41	JA	0.61	127.31	20.42
		AY	0.50	116.02	28.85

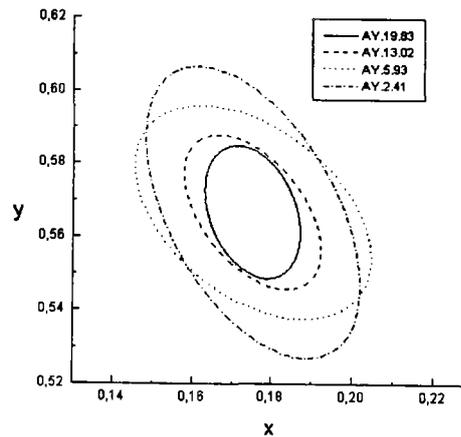
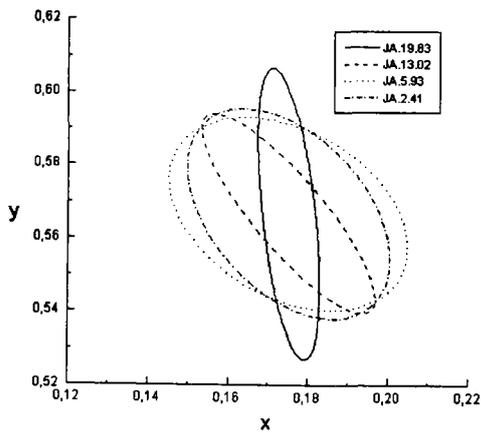


Tabla V.VII y fig. 5.7.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.175,0.567 (línea tritán 1) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.VIII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.175 y=0.487	Y=19.83	JA	0.59	110.79	10.12
		AY	0.33	77.43	8.29
	Y=13.02	JA	0.37	105.80	5.04
		AY	0.62	111.92	9.26
	Y=9.04	JA	0.46	124.09	10.95
		AY	0.47	121.58	13.04
	Y=3.87	JA	0.80	148.36	15.85
		AY	0.86	93.20	17.42

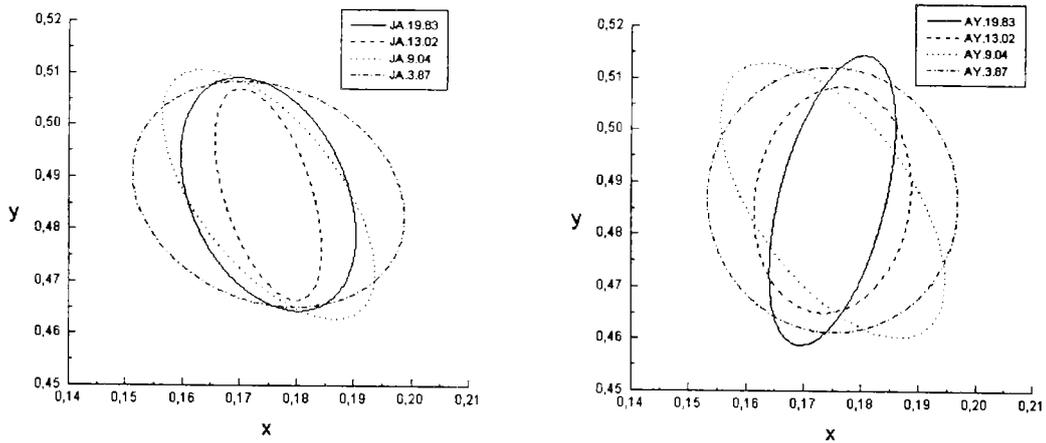


Tabla V.VIII y fig. 5.8.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.175,0.487 (línea tritán 1) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V. IX

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.175 y=0.413	Y=13.02	JA	0.74	82.68	6.68
		AY	0.68	84.87	7.06
	Y=9.04	JA	0.71	125.22	6.52
		AY	0.61	108.60	7.73
	Y=5.93	JA	0.64	108.92	9.25
		AY	0.69	118.57	10.86
	Y=2.41	JA	0.82	107.19	23.84
		AY	0.89	114.43	27.19

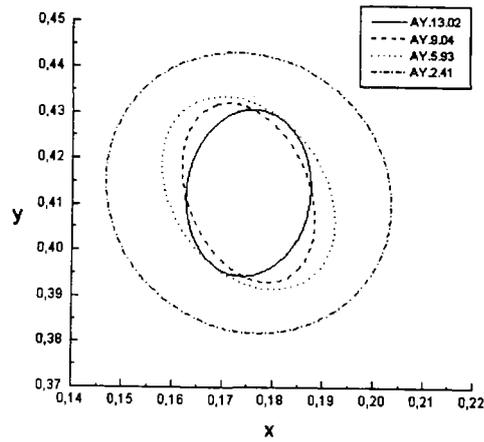
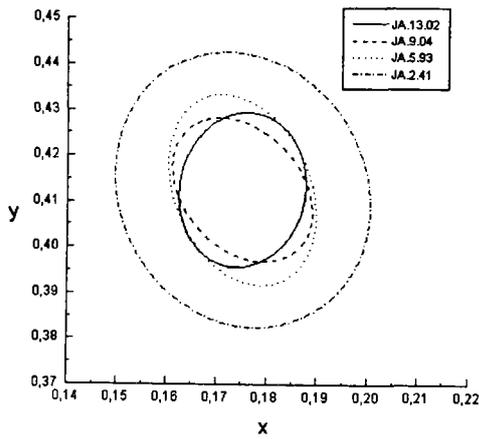


Tabla V.IX y fig. 5.9.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.175,0.413 (línea tritán 1) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.X

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.175 y=0.327	Y=9.04	JA	0.43	79.88	2.88
		AY	0.60	107.31	5.85
	Y=5.93	JA	0.59	114.98	6.12
		AY	0.86	70.36	7.99
	Y=3.87	JA	0.71	112.06	5.94
		AY	0.71	50.09	5.46

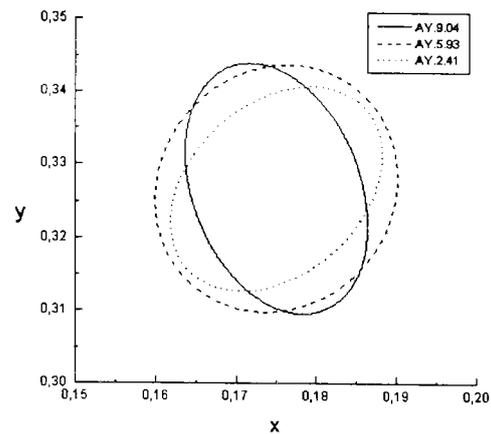
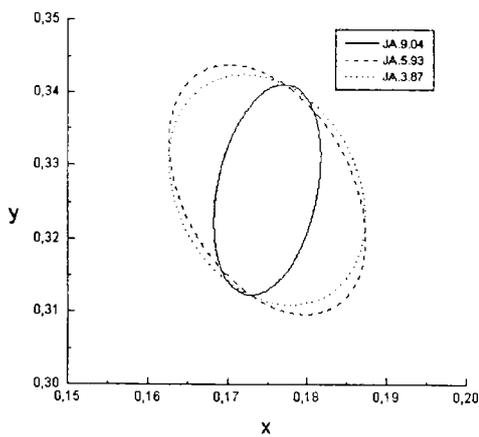


Tabla V.X y fig. 5.10.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.175,0.327 (línea trítán 1) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XI

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.175 y=0.248	Y=5.93	JA	0.67	95.15	2.05
		AY	0.73	104.83	1.79
	Y=3.87	JA	0.70	169.65	5.73
		AY	0.58	64.87	5.06
	Y=2.41	JA	0.73	78.39	3.00
		AY	0.74	58.46	2.94

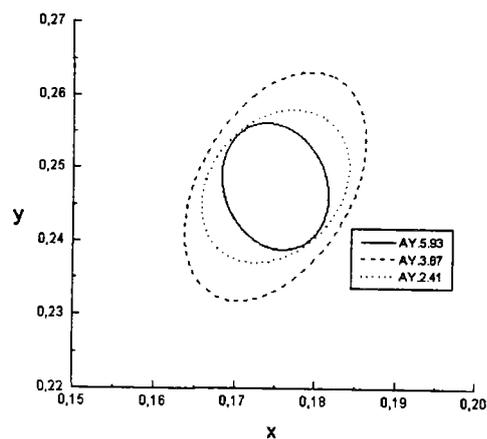
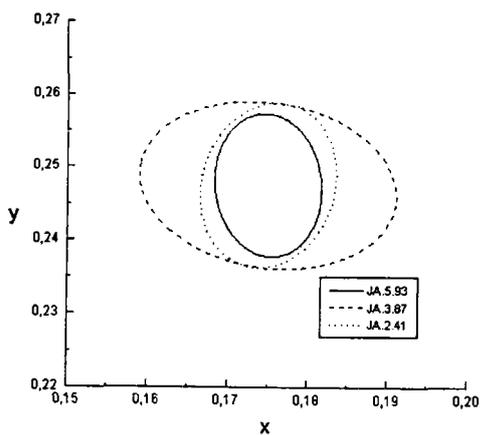


Tabla V.XI y fig. 5.11.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.175,0.248 (línea tritán 1) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.175	Y=3.87	JA	0.70	95.82	2.07
		AY	0.61	108.95	1.81
y=0.174	Y=2.41	JA	0.59	89.87	1.28
		AY	0.67	99.72	1.12

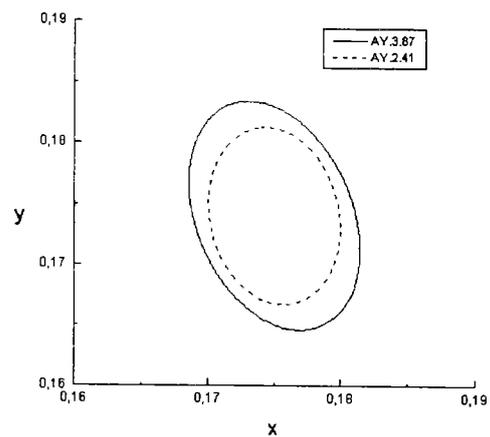
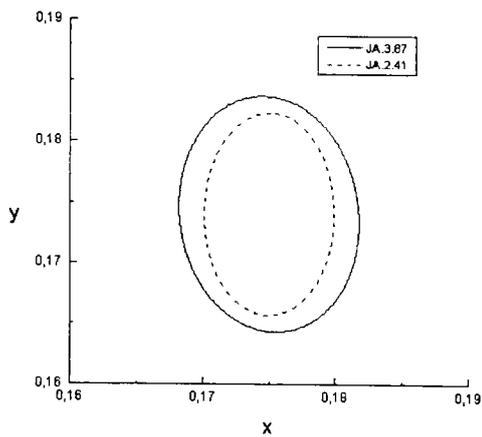


Tabla V.XII y fig. 5.12.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.175,0.174 (línea tritán 1) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

A la vista de las figuras anteriores, podemos destacar que las orientaciones de las elipses son generalmente mayores que los 90° a los que se orienta la línea de confusión tritán sobre la que están situados este primer grupo de estímulos. Las elipses correspondientes a ellos son las que más se apartan de la orientación de la línea tritán, como ya comentamos en el apartado anterior, y presentan una gran variabilidad, lo que se ve en la tabla V.VII en las orientaciones de las elipses del observador JA, que van desde 96.09 a 144.81° según la luminancia.

En muchos casos la orientación de las elipses no puede ser considerada un parámetro muy significativo, concretamente cuando las elipses son muy redondeadas y tienen una relación de semiejes muy alta. Un ejemplo es la elipse del estímulo $(0.175,0.487)$ con 3.87 cd/m^2 para el observador JA, que presenta una orientación de 148.36° , un valor excesivamente alto si no tenemos en cuenta que la relación de semiejes es 0.80 . A pesar de que la mayoría de las elipses son muy redondeadas, la relación de semiejes varía en un intervalo muy amplio que va desde 0.16 hasta 0.89 .

De las tablas, no parece que se pueda encontrar una relación clara entre la orientación de las elipses o su relación de semiejes con la luminancia; sin embargo, sí parece existir una clara relación entre el área de las elipses y la luminancia. En cada tabla, especialmente en las que se analizan un mayor número de niveles de luminancia, se observa claramente como el área de las elipses aumenta cuando la luminancia se hace menor. El mejor ejemplo es la variación de las áreas de las elipses con centro en $0.175,0.567$ para el observador AY, que pasa de 6.45×10^{-4} cuando la luminancia es de 19.83 cd/m^2 a 28.85×10^{-4} cuando ésta es de 2.41 cd/m^2 . En las tablas V.XI y V.XII, esta variación del área no es tan clara, sino que

incluso ésta parece mantenerse constante, lo que sugeriría una especie de separación entre los niveles de luminancia, separación que se encontraría alrededor de las 6 cd/m².

Respecto a los observadores, encontramos resultados similares para ambos, aunque AY suele obtener elipses de mayor área que JA, especialmente en los menores niveles de luminancia.

Las siguientes figuras y tablas que expodremos son las de los estímulos situados sobre la línea de confusión tritán 2, o sea, la que pasa por el acromático equienergético y tiene una pendiente de 64.59°. Estas figuras van numeradas de la 5.13 a la 5.18, y las tablas de la V.XIII a la V.XVIII.

TABLA V.XIII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.378	Y=19.83	JA	0.41	85.14	3.71
		AY	0.18	81.05	3.24
	Y=13.02	JA	0.41	56.18	3.23
		AY	0.57	70.35	2.98
	Y=9.04	JA	0.35	52.65	4.86
		AY	0.32	65.89	7.05
y=0.427	Y=5.93	JA	0.31	61.34	5.31
		AY	0.26	59.84	5.60
	Y=3.87	JA	0.49	63.24	5.09
		AY	0.19	35.47	3.07
	Y=2.41	JA	0.33	63.17	8.44
		AY	0.32	76.95	10.77

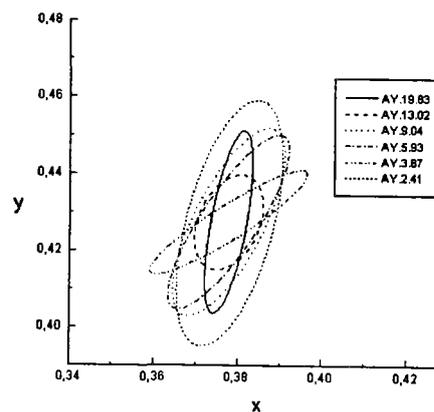
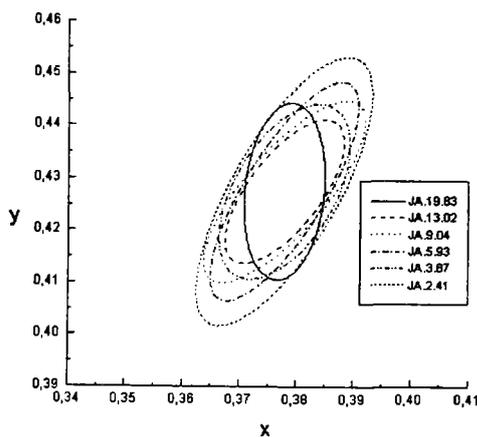


Tabla V.XIII y fig. 5.13.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.378,0.427 (línea tritán 2) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XIV

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.356	Y=19.83	JA	0.86	120.04	3.21
		AY	0.27	87.22	9.88
	Y=13.02	JA	0.58	35.16	5.10
		AY	0.37	88.69	9.36
	Y=9.04	JA	0.37	79.61	6.80
		AY	0.56	49.77	5.80
y=0.380	Y=5.93	JA	0.28	60.32	6.38
		AY	0.29	59.19	5.93
	Y=3.87	JA	0.65	63.52	6.81
		AY	0.73	57.77	6.36
	Y=2.41	JA	0.36	74.13	13.33
		AY	0.37	74.29	13.11

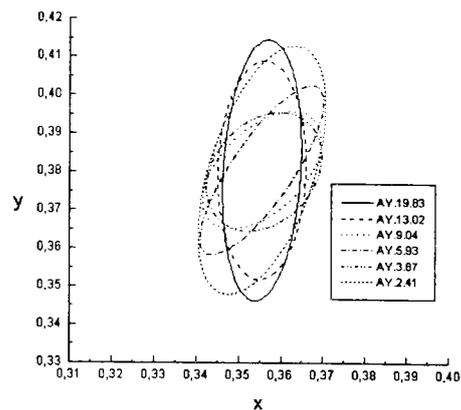
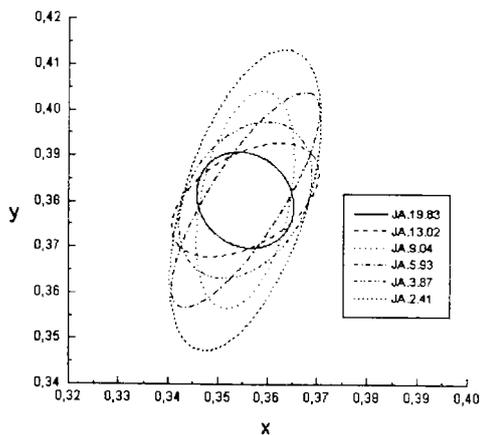


Tabla V.XIV y fig. 5.14.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.356,0.380 (línea tritán 2) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XV

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.333	Y=13.02	JA	0.35	48.34	5.04
		AY	0.29	52.57	5.61
	Y=9.04	JA	0.34	50.39	8.93
		AY	0.28	55.21	6.93
y=0.333	Y=5.93	JA	0.52	51.86	5.07
		AY	0.28	63.78	8.11
	Y=3.87	JA	0.21	67.71	6.62
		AY	0.65	73.44	4.15
	Y=2.41	JA	0.23	80.69	8.83
		AY	0.16	46.47	15.17

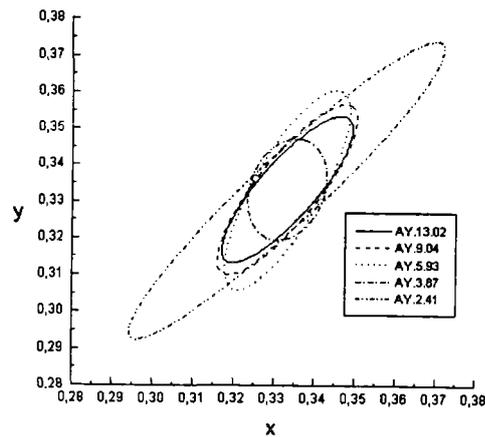
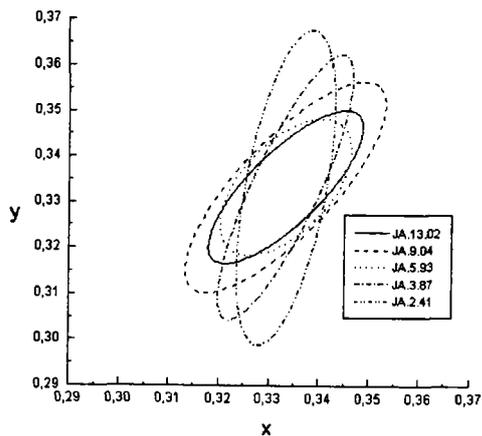


Tabla V.XV y fig. 5.15.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.333,0.333 (línea tritán 2) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XVI

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.306	Y=9.04	JA	0.39	85.14	3.04
		AY	0.15	84.97	8.80
	Y=5.93	JA	0.45	64.16	4.66
		AY	0.62	70.23	6.80
y=0.275	Y=3.87	JA	0.36	64.16	7.15
		AY	0.22	64.67	7.60
	Y=2.41	JA	0.37	70.25	7.06
		AY	0.09	55.20	3.39

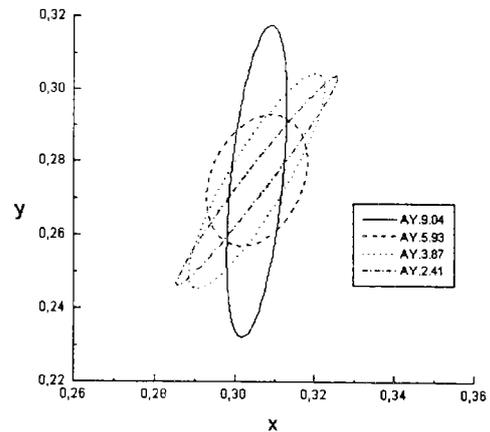
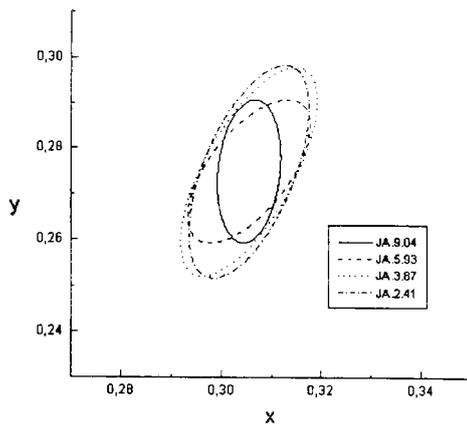


Tabla V.XVI y fig. 5.16.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.306,0.275 (línea tritán 2) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XVII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Área x 10 ⁴
x=0.278	Y=5.93	JA	0.29	52.82	3.28
		AY	0.22	49.50	2.81
y=0.217	Y=3.87	JA	0.25	74.99	11.23
		AY	0.58	55.06	2.71
y=0.217	Y=2.41	JA	0.42	71.65	3.10
		AY	0.12	52.08	2.50

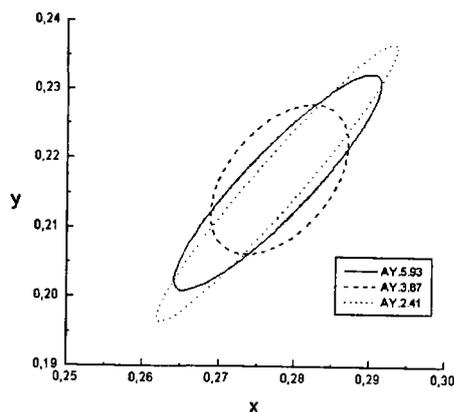
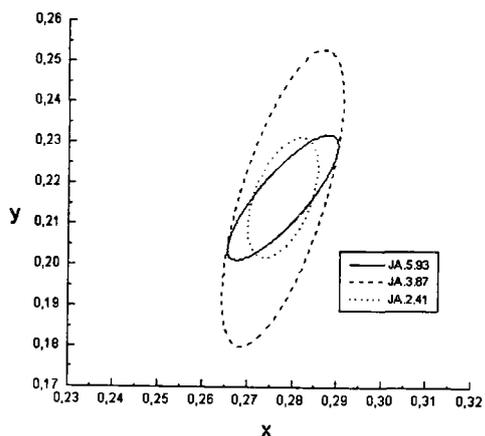


Tabla V.XVII y fig. 5.17.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.278,0.217 (línea tritán 2) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XVIII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.250	Y=3.87	JA	0.17	78.97	4.98
		AY	0.37	61.26	3.10
y=0.158	Y=2.41	JA	0.31	68.20	5.12
		AY	0.27	60.82	4.40

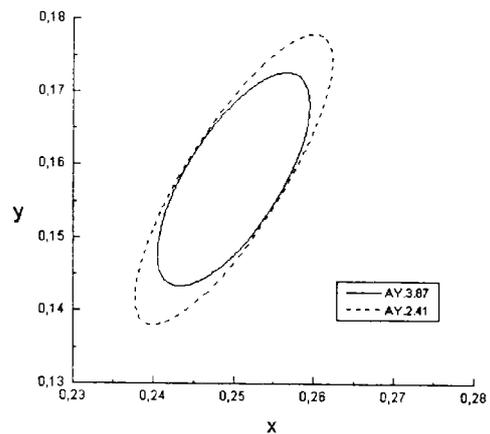
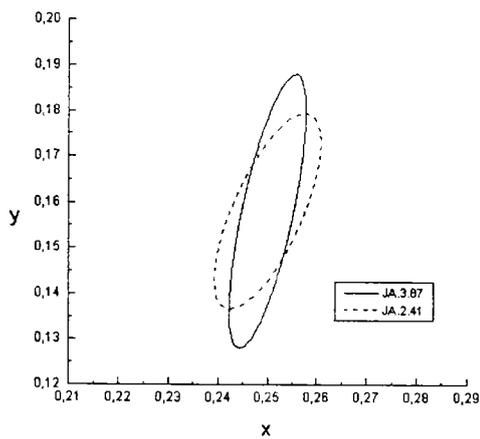


Tabla V.XVIII y fig. 5.18.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.250,0.158 (línea tritán 2) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

En este segundo grupo de figuras y tablas que se han mostrado se observan básicamente las mismas características que ya apuntamos para el primer grupo. En el caso de la orientación de las elipses, vemos que los valores son muy variados, pero no tan diferentes entre sí como ocurría en el caso de las primeras elipses. Además, en este grupo las orientaciones de las elipses son más parecidas a la de la línea de confusión tritán correspondiente, de 64.59° , que las del primer grupo.

La elipse que más se aparta de la línea tritán es la del estímulo de coordenadas 0.356,0.380 y luminancia 19.83 cd/m^2 para el observador JA, ya que tiene una orientación de 120.04° . Al comentar los resultados del primer grupo ya dijimos que estos valores no son muy significativos si las elipses son muy redondeadas, y en el caso mencionado la relación de semiejes es de 0.86. No todas las elipses tienen una relación de semiejes tan alta, sino que generalmente ésta es menor de 0.50, ya que en las tablas se puede comprobar que de las 52 elipses de este segundo grupo cuyos parámetros se muestran, sólo 8 de ellas tienen una relación de semiejes mayor de 0.50.

Nuevamente no podemos encontrar una relación clara entre la orientación y la relación de semiejes de la elipse con la luminancia, pero sí la encontramos al tratar el área. Se puede ver un aumento del área de las elipses al disminuir la luminancia, sobre todo cuando la luminancia alcanza los valores más bajos de los analizados, 2.41 y 3.87 cd/m^2 . Esta variación en el área se produce para los dos observadores, pero, como también sucedía en las elipses del primer grupo, es más acusada en las obtenidas para el observador AY, como se puede ver principalmente en las tablas V.XIII y V.XIV.

A pesar de que tanto los valores de la orientación como los de la relación de semiejes de las elipses de este grupo son muy variados, no lo son tanto como podíamos ver en el primero; incluso, se observan menos diferencias entre los resultados de ambos observadores.

El último grupo de figuras y tablas que presentamos es el de las figuras de la 5.19 a la 5.24 y las tablas de la V.XIX a la V.XXIV. Las elipses a las que se refieren corresponden a estímulos situados sobre la línea de confusión tritán 3, de orientación 53.95° .

TABLA V.XIX

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.450	Y=19.83	JA	0.32	25.46	2.89
		AY	0.29	63.63	5.12
	Y=13.02	JA	0.37	48.88	6.25
		AY	0.33	49.59	6.54
y=0.378	Y=5.93	JA	0.32	29.61	7.86
		AY	0.23	51.32	3.77
	Y=2.41	JA	0.38	70.53	7.46
		AY	0.14	72.08	18.98

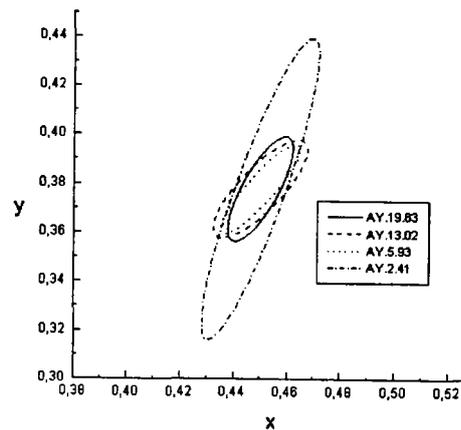
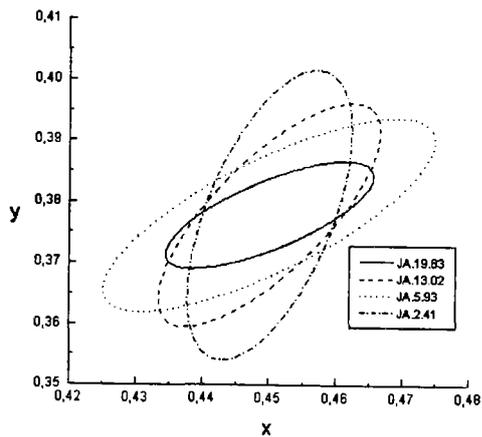


Tabla V.XIX y fig. 5.19.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.450,0.378 (línea tritán 3) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XX

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.423	Y=19.83	JA	0.46	56.90	1.43
		AY	0.50	50.51	1.24
	Y=13.02	JA	0.45	61.23	8.80
		AY	0.50	33.13	5.58
y=0.341	Y=9.04	JA	0.26	44.15	1.35
		AY	0.14	48.52	2.52
	Y=3.87	JA	0.27	66.70	9.27
		AY	0.26	67.93	5.15

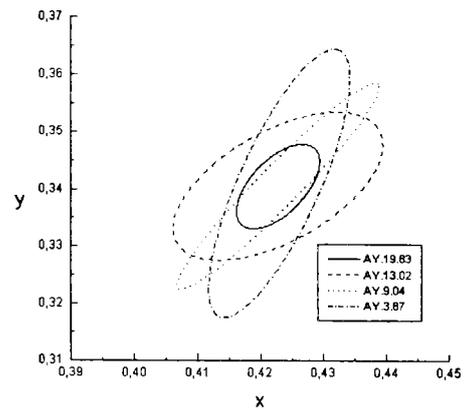
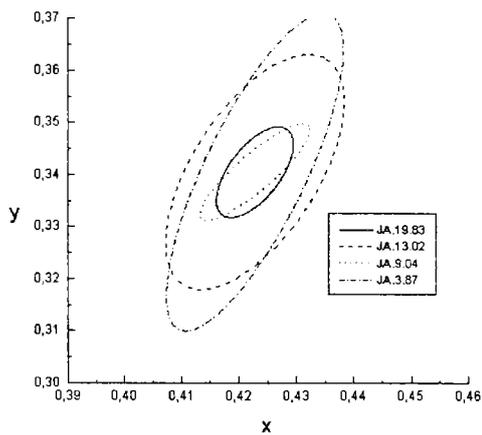


Tabla V.XX y fig. 5.20.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.423,0.341 (línea trítan 3) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XXI

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.395	Y=13.02	JA	0.45	54.36	1.64
		AY	0.45	53.19	1.61
	Y=9.04	JA	0.24	65.46	3.62
		AY	0.22	69.91	2.44
y=0.302	Y=5.93	JA	0.21	69.93	4.71
		AY	0.50	52.76	11.20
	Y=2.41	JA	0.37	69.56	5.75
		AY	0.18	61.92	12.32

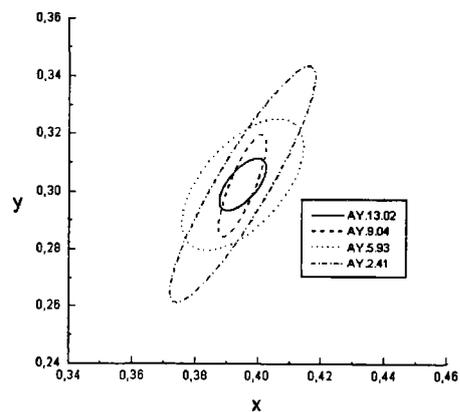
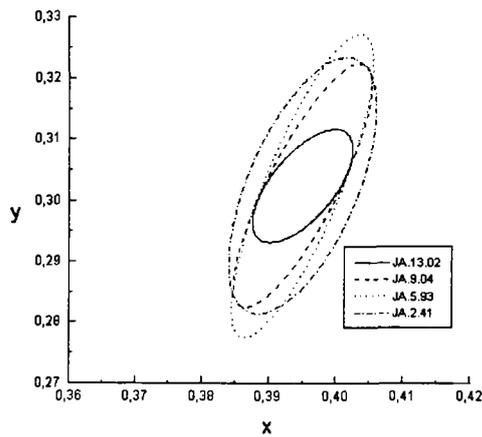


Tabla V.XXI y fig. 5.21.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.395,0.302 (línea tritán 3) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XXII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.360	Y=9.04	JA	0.47	72.05	2.18
		AY	0.44	65.91	2.51
y=0.254	Y=5.93	JA	0.22	50.58	4.06
		AY	0.26	41.86	6.53
y=0.254	Y=3.87	JA	0.30	44.98	1.89
		AY	0.20	62.07	3.49

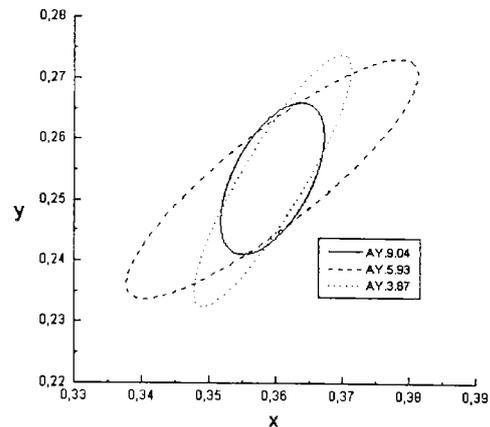
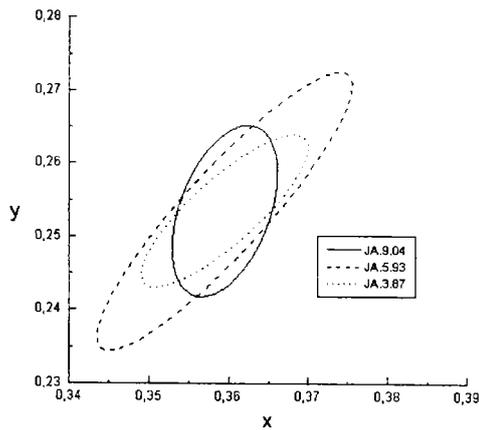


Tabla V.XXII y fig. 5.22.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.360,0.254 (línea tritán 3) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XXIII

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.323	Y=5.93	JA	0.51	56.27	1.70
		AY	0.35	55.86	1.62
y=0.203	Y=3.87	JA	0.36	28.62	3.59
		AY	0.46	55.86	6.03
y=0.203	Y=2.41	JA	0.41	37.89	5.04
		AY	0.10	57.83	7.70

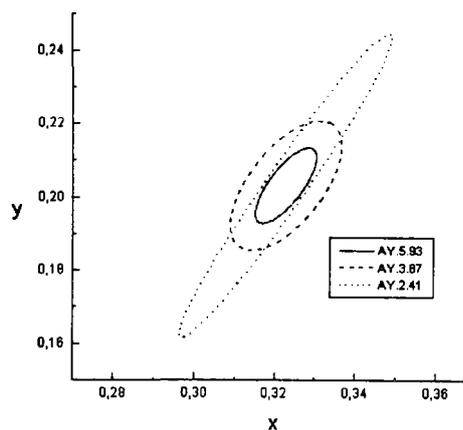
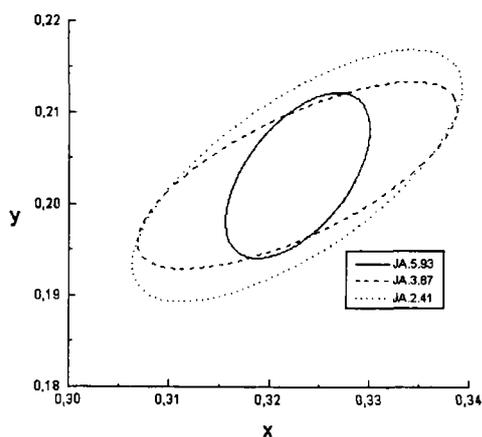


Tabla V.XXIII y fig. 5.23.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.323,0.203 (línea tritán 3) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

TABLA V.XXIV

Coord.	Luminancia (cd/m ²)	Obs.	b/a	θ (°)	Áreax10 ⁴
x=0.285	Y=3.87	JA	0.53	74.90	1.12
		AY	0.53	54.99	1.00
y=0.151	Y=2.41	JA	0.25	51.96	2.62
		AY	0.25	37.75	1.35

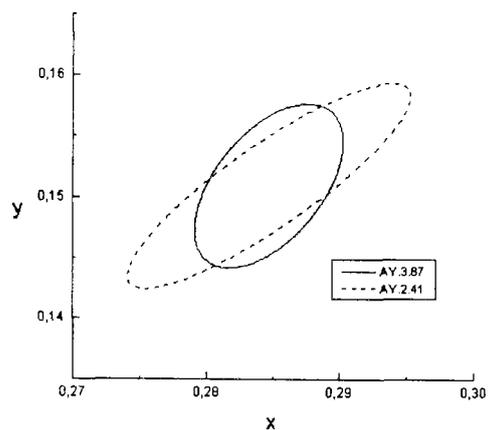
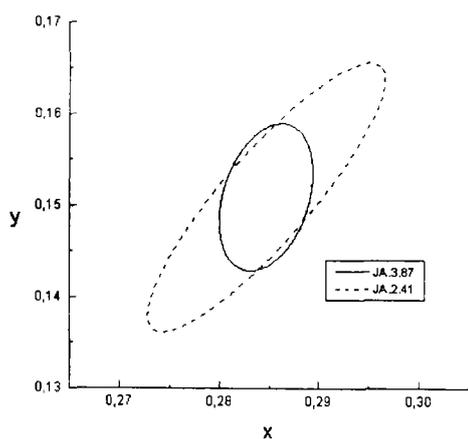


Tabla V.XXIV y fig. 5.24.- Tabla de parámetros característicos y elipses de discriminación del estímulo 0.285,0.151 (línea tritán 3) con diferentes niveles de luminancia para los observadores JA y AY.

En las figuras y tablas de este último grupo de elipses se pueden observar las mismas características que ya se indicaron para los otros dos grupos. Las elipses tienden a orientarse sobre la línea tritan correspondiente (en este caso de pendiente 53.95°), pero la orientación de éstas varían mucho de una a otra, aunque no parece que esta variación tenga relación con los diferentes niveles de luminancia. Las elipses también difieren entre sí en cuanto a la relación de semiejes, pero generalmente este valor se encuentra por debajo de 0.50 (de 40 elipses sólo 4 tienen una relación de semiejes mayor que 0.50).

Es otra vez el área de las elipses el único parámetro que parece tener una relación con la variación en luminancia, aunque en este grupo no sea tan claro como en los dos anteriores. Como en estos casos, es a partir de un nivel de luminancia de aproximadamente 6 cd/m^2 cuando parece que se produce claramente ese aumento en el área de las elipses al disminuir la luminancia, lo que se puede ver mejor en las elipses del observador AY que aparecen en las tablas V.XIX y V.XXI.

La comparación de nuestros resultados con los de otros autores es complicada, ya que la mayoría de sus umbrales se obtuvieron a luminancia constante. De todos modos, hay algunos trabajos sobre colorimetría en los que la luminancia es un parámetro variable, y en ellos también se observa esta variación de las elipses con la luminancia. No obstante, de sus resultados no se pueden extraer conclusiones claras sobre la influencia de este parámetro, ya que diferentes niveles de luminancia estudiados correspondían a diferentes coordenadas de cromaticidad, Brown y MacAdam (1949), Brown (1952).

En otro trabajo de Brown (1951) se estudiaban diferentes niveles de luminancia, desde menos de 1 a 30 cd/m^2 , para un mismo estímulo, pero sólo calculó umbrales para tres de ellos, que además se encontraban muy próximos en el diagrama cromático. Su principal conclusión era que las elipses de discriminación se agrandaban cuando el nivel de luminancia se hacía más bajo, un agrandamiento más claro cuando la luminancia estaba muy por debajo de 1 cd/m^2 , manteniéndose las elipses correspondientes a niveles de luminancia mayores muy parecidas entre sí. Esta conclusión también la podemos extraer de nuestros resultados experimentales, pero con alguna diferencia que veremos al final del apartado.

Como resumen de todo lo comentado, podemos decir que las elipses tienden a orientarse sobre la línea de confusión tritán, lo que ya se había expuesto en otros trabajos, Romero et al. (1993), indicando una peor discriminación en este eje amarillo-azul. En nuestros resultados se observa que son sobre todo las elipses correspondientes a los estímulos situados sobre la línea 2 las que tienen una orientación más parecida a la de la línea tritán correspondiente. En cambio, las elipses de los estímulos sobre las líneas 1 y 3 son las que más se apartan de esta orientación, es decir, de 90° y 53.95° , respectivamente. Esto nos lleva a pensar que cuando el mecanismo rojo-verde se encuentra desequilibrado (líneas 1 y 3) empeora también la discriminación en este eje, con lo que las elipses se apartarían de la línea tritán, lo que no ocurre en el caso de la línea 2, en la que $L-2M=0$.

En cuanto a la relación de semiejes, vemos que en principio existe una gran variabilidad en este parámetro, pero que generalmente las elipses se hacen más elongadas a bajas luminancias (también indicado por Brown (1951)), sobre todo las correspondientes a estímulos situados sobre la línea 2. Este elongamiento de las elipses pone de manifiesto que al bajar la luminancia la discriminación empeora más en el mecanismo tritán que en el

rojo-verde, y se ve más claro en la línea 2 porque, como ya hemos comentado, al estar en este caso equilibrado el mecanismo rojo-verde, la sensibilidad en él será mayor en esta línea que en las líneas 1 y 3, donde el balance rojo-verde se encuentra desequilibrado. Por ello, los semiejes menores de las elipses de la línea 2 serán menores que los de las elipses de las otras líneas, con lo que serán más elongadas, si comparamos las tres líneas en un mismo plano de luminancia. Además, como el mecanismo está más desequilibrado en la línea 1 que en la 3, las elipses de la primera línea son más redondeadas, con lo que la posible variación en la relación de semiejes al disminuir la luminancia se notará menos en la primera de las líneas.

También se observa que para los estímulos más azules se acentúa ese empeoramiento de la discriminación al bajar la luminancia indicado por el elongamiento de las elipses, lo que se debe a que para valores bajos de ésta se necesitó un mayor contenido de primario azul para obtener estos estímulos con el dispositivo, por lo que la capacidad de discriminación en el

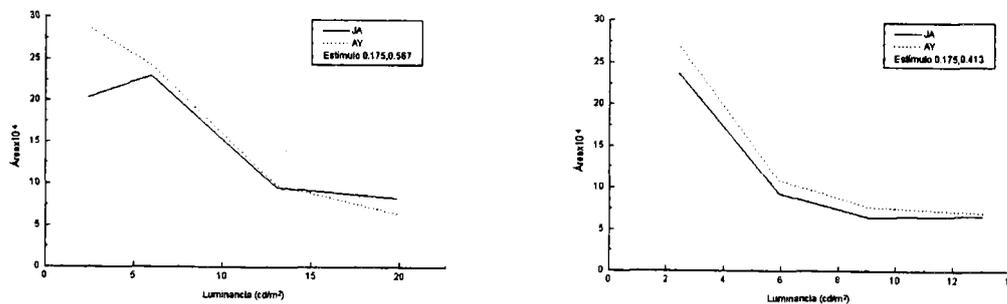


Fig. 5.25.a.- Área de las elipses de discriminación frente a la luminancia en cd/m^2 para los observadores JA y AY y los estímulos de coordenadas (0.175,0.567) y (0.175,0.413).

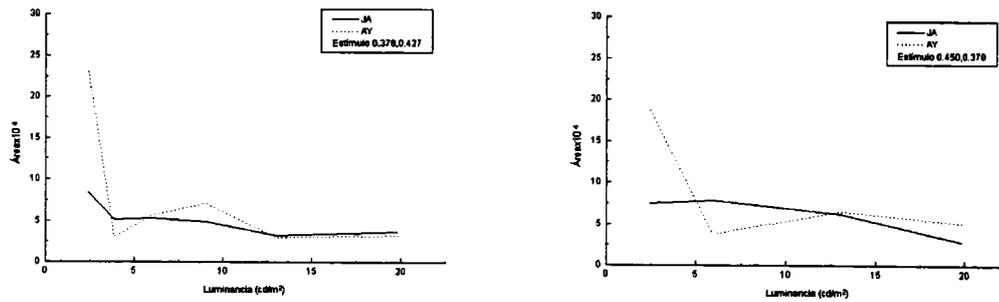


Fig. 5.25.b.- Área de las elipses de discriminación frente a la luminancia en cd/m^2 para los observadores JA y AY y los estímulos de coordenadas (0.378,0.413) y (0.450,0.378).

mecanismo tritán disminuye y la elipse, además de hacerse más grande, se hace también más elongada.

A pesar de lo comentado en el párrafo anterior sobre la influencia de la luminancia sobre la relación de semiejes, el único parámetro sobre el que parece influir claramente la luminancia es el área de las elipses. Por ello, mostraremos en las figuras 5.25.a y 5.25.b cuatro gráficas referentes a los estímulos de coordenadas de cromaticidad (0.175,0.567), (0.175,0.413), (0.378,0.427) y (0.450,0.378), presentando el área de las elipses de discriminación frente a la luminancia en cd/m^2 . En estos cuatro ejemplos se puede ver, como comentamos anteriormente, que el área de las elipses disminuye al aumentar el nivel de luminancia, pero que esta disminución sólo se observa bien a partir de unas 6 cd/m^2 .

Entonces, parece claro que mientras que el nivel de luminancia sea fotópico, o incluso levemente algo menor, el área de las elipses de discriminación cromática es prácticamente constante, es decir, que la luminancia tiene un pequeño efecto o quizás ninguno sobre las áreas; sin embargo, para luminancias menores crece ostensiblemente.



**Capítulo 6: Análisis y discusión de los
umbrales de discriminación en el
espacio de excitación de conos**

6.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS UMBRALES DE DISCRIMINACIÓN EN EL ESPACIO DE EXCITACIÓN DE CONOS

En este segundo capítulo de discusión y análisis de los resultados obtenidos nos centraremos en el análisis de éstos en el espacio de excitación de conos. Para ello, comenzaremos con un primer apartado en el que se analizará si el umbral de discriminación de un mecanismo es igual, o no, cuando aumenta la excitación de éste que cuando disminuye. Posteriormente, entraremos en el análisis y discusión de los umbrales en cada mecanismo: primero se analizan los umbrales de discriminación en el eje tritán de este diagrama de cromaticidad, y después se analizan en el mecanismo rojo-verde. A su vez cada apartado se subdivide con objeto de discutir por separado la posible influencia de la luminancia sobre estos umbrales o de un canal sobre otro.

6.1.- Umbral de discriminación de un mecanismo

En el capítulo 4 de esta memoria se realizó una serie de comparaciones entre diversos métodos experimentales encaminada a elegir de todos ellos el más adecuado según nuestros objetivos y el dispositivo experimental del que se disponía. Recordemos que de estas experiencias parecía desprenderse que los dos umbrales sobre una línea, cada uno a un lado del estímulo de referencia, no eran iguales, y éste fue uno de los motivos por los que algún método, concretamente el método 1, quedó descartado desde un principio al ocultar esta información.

Las experiencias de este trabajo se plantearon para obtener los umbrales de discriminación de un estímulo en el mecanismo tritán y en el rojo-verde, con lo que los estímulos a comparar con el de referencia debían estar situados a lo largo de las líneas de confusión correspondientes. En cada línea se obtuvieron dos umbrales, uno con estímulos de excitación del mecanismo correspondiente mayor que la del estímulo de referencia, y otro con estímulos de menor excitación; por ejemplo, para obtener el umbral sobre el eje tritán del estímulo de coordenadas (0.333, 0.333), se pueden presentar estímulos en la línea tritán hacia el amarillo (los estímulos tendrían cada vez menor excitación del cono S), o bien hacia el azul (la excitación de S sería cada vez mayor), e igual se haría en el eje rojo-verde.

Del mismo modo que se observó diferencias entre ambos umbrales cuando analizamos diversos métodos experimentales, también aquí se encontraron diferencias a ambos lados de la línea. Esto quiere decir que, al estudiarse 66 estímulos y calcularse dos umbrales sobre cada una de las dos líneas, cada observador obtuvo un total de 264 umbrales, 132 sobre la línea tritán y otros 132 sobre la rojo-verde. El número total de umbrales obtenidos

es enorme, pero comparando entre sí los umbrales para cada mecanismo, aparecen una serie de características comunes y tendencias que nos llevaron a plantearnos si sería adecuado considerar como umbral de un eje el valor medio de los dos umbrales obtenidos a ambos lados de la línea. Para ello, comparemos dichos umbrales.

La primera cuestión que se nos plantea es la diferencia en tamaño entre los umbrales de discriminación en el mecanismo tritán cuando la excitación de éste aumenta o disminuye respecto al estímulo de referencia, y además, si existe alguna relación entre el lado en el que el umbral es mayor con que la excitación de S aumente o disminuya. Revisando los resultados experimentales obtenidos se pudo observar que no siempre el umbral era mayor en el mismo lado. En el caso del observador JA, ΔS era mayor en el lado en el que la excitación del cono S era mayor que la del estímulo de referencia en 32 de los estímulos. En los 34 estímulos restantes, ΔS era mayor en el lado en el que la excitación de S era menor. Analizando los datos del observador AY notamos que no sucedía lo mismo que con los de JA, ya que en el caso de este último casi la mitad de los estímulos presentaba el umbral S mayor en un lado de la línea y la otra mitad mayor en el otro. Para AY, sólo en 24 de los estímulos ΔS es mayor cuando la excitación de S aumentaba, mientras que para los restantes 42 estímulos, casi el doble, ΔS es mayor en el lado de la línea en el que S disminuía. Así, no parece claro que la excitación del canal S influya en que el umbral de discriminación sea mayor a un lado u otro de la línea tritán.

Hasta el momento hemos visto que los umbrales de discriminación tritán son diferentes a ambos lados de la línea, y que no parece que el nivel de S tenga que ver con que el mayor de los umbrales esté a un lado u otro. Pero en muchos de los casos ambos umbrales presentan valores, aunque distintos, muy parecidos, por lo que podríamos preguntarnos si la diferencia

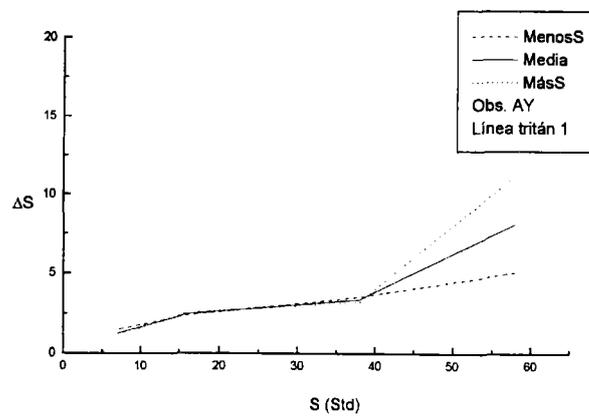
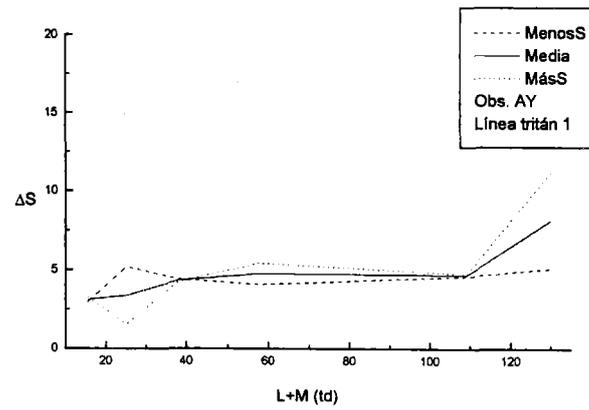
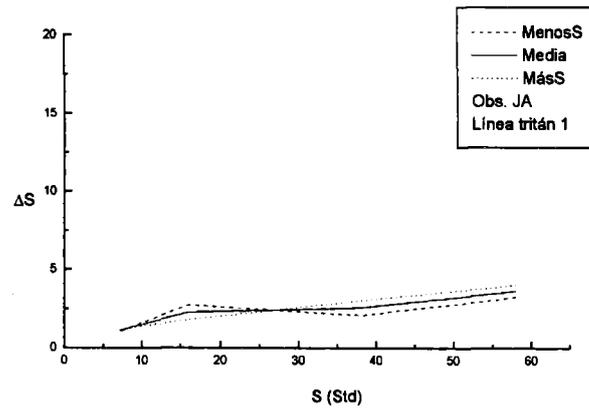


Fig. 6.1.1, 2 y 3.- Ejemplos de los dos valores de ΔS a ambos lados de la línea tritán frente a diferentes parámetros.

entre umbrales es suficiente como para considerar que realmente son distintos, o, por el contrario, la diferencia entra dentro de la propia variabilidad que aparece en las experiencias psicofísicas. Así pues, hemos considerado que cuando la diferencia entre ambos umbrales es del 10% o menor se puede decir que los dos son prácticamente iguales, lo que sucede en 14 de los estímulos para JA y en 20 para el observador AY. Para el resto de los estímulos (52 para JA y 46 para AY), la diferencia entre los dos umbrales ΔS es algo mayor. Sin embargo, sólo en unos pocos casos (2 estímulos de 66 para JA y 6 de 66 para AY) el umbral tritán a un lado es 5 veces, o más, mayor que el del otro lado. La mayoría de los estímulos en los que aparece esta diferencia en tamaño suelen ser aquellos con los menores niveles de iluminación retiniana, 16 y 25 td, estímulos con los que los observadores encontraban dificultades para discriminar.

Ante la gran cantidad de datos y diferentes valores de umbrales para diferentes estímulos, el mejor modo para ver que sobre cualquiera de los dos umbrales (y sobre el valor medio de ellos) existen las mismas influencias y se encuentran las mismas tendencias sea mostrar diversas gráficas en las que aparezcan los umbrales ΔS a ambos lados del eje tritán y el valor medio de ellos dos. En la página anterior mostramos tres ejemplos, los de las figuras 6.1.1, 2 y 3, en las que aparecen los umbrales ΔS a los dos lados de la línea tritán y el valor medio frente a parámetros como la excitación de S o la iluminación retiniana L+M. El motivo para elegir estos ejemplos es que es en estas gráficas donde aparecen representados más estímulos, ya que aquellas donde sólo aparezcan dos o tres no resultan suficientemente representativas. Por otra parte, hemos elegido ejemplos en los que los estímulos correspondientes estén sobre una línea horizontal (figura 6.1.1), una línea oblicua (figura 6.1.2) y una línea vertical (figura 6.1.3), tal y como se describió en las figuras 4.3, 4 y 5.

En la figura 6.1.1 se muestra ΔS para el observador JA frente a S con L+M constante e igual 16 td, y en ella se ve que cualquiera de los tres valores de ΔS se mantiene prácticamente constante. En la figura 6.1.2 los umbrales ΔS aparecen frente a L+M cuando la excitación de S es constante e igual a 58 Std, para el observador AY. Al igual que en el caso anterior, las líneas son similares para los tres valores de ΔS : el umbral se mantiene casi constante con L+M hasta que se alcanza el valor de 109 td, a partir del cual el umbral crece, aunque esto último no se aprecia casi en el caso del umbral ΔS sobre el lado en el que la excitación de S es menor que la del estímulo de referencia correspondiente. La figura 6.1.3 también corresponde al observador AY, y presenta ΔS frente a S para estímulos que tienen las mismas coordenadas de cromaticidad en el espacio CIE1931 (0.175, 0.567) y diferentes niveles de luminancia. Nuevamente podemos comprobar que los valores de los tres umbrales son muy parecidos, y que mantienen un valor casi constante hasta 38 Std, excitación de S a partir de la cual los umbrales empiezan a crecer. En esta última gráfica se puede ver que para los mayores valores de S existe mayor diferencia entre los umbrales a los dos lados de la línea, pero que para cualquiera de ellos, incluso para el valor medio, se observa el aumento de ΔS con S y las mismas características.

Por todo ello, parece correcto realizar la discusión de los resultados obtenidos con el valor medio de los umbrales ΔS a ambos lados, ya que lo que se pretende es analizar las influencias de diversos parámetros sobre el umbral en el eje tritán, y según los comentarios hechos y a la vista de las figuras presentadas, éstas influencias son las mismas sobre cualquiera de los umbrales ΔS y también sobre su valor medio.

Además del análisis del umbral en el mecanismo tritán también se llevó a cabo el del umbral en el mecanismo rojo-verde. Del mismo modo que se obtuvieron dos umbrales ΔS , también obtuvimos dos umbrales sobre la línea

rojo-verde, uno cuando la excitación de este mecanismo aumentaba respecto al estímulo de referencia y otro cuando disminuía. También en este caso nos planteamos si los umbrales obtenidos a cada lado de la línea rojo-verde seguían las mismas tendencias y si el análisis del valor medio de ambos equivaldría al de cualquiera de ellos dos.

Para ello, seguimos los mismos pasos que con el umbral ΔS . En primer lugar vimos para cada estímulo en cuál de los dos sentidos de la línea rojo-verde el umbral $\Delta(L-2M)$ era mayor, y si generalmente ocurría en el mismo lado o existía al menos una relación entre este hecho y la excitación de este mecanismo. Para el observador JA, en 31 de los estímulos el umbral $\Delta(L-2M)$ era mayor cuando el balance rojo-verde se desplazaba hacia el verde; en 33, era mayor cuando este equilibrio se rompía hacia el rojo; y en los 2 estímulos restantes los umbrales eran iguales a ambos lados de la línea. Para el observador AY se obtuvo algo muy parecido, ya que para 36 de los estímulos el umbral era mayor hacia el verde, y en los otros 30, mayor hacia el rojo. En el caso del umbral $\Delta(L-2M)$ podemos ver que aproximadamente para la mitad de los estímulos y los dos observadores el umbral es mayor en un sentido de la línea y para la otra mitad en el otro sentido. A pesar de ello y al igual que cuando tratamos el umbral ΔS , no parece que exista una relación clara entre la excitación del canal L-2M y el lado de la línea en qué es mayor el umbral $\Delta(L-2M)$.

Debido al menor valor de $\Delta(L-2M)$ comparado con ΔS , puede parecer a primera vista que, a pesar de que a ambos lados de la línea los umbrales son diferentes, estas diferencias no son tan grandes como en el caso de los umbrales tritán. Por eso volvimos a estudiar la diferencia en tamaño que existía entre los umbrales a ambos lados de la línea rojo-verde, considerando que con una diferencia en tamaño del 10% los umbrales eran prácticamente iguales. Dentro de este margen se encontraban los umbrales de 11

estímulos, para el observador JA, y de 8 estímulos, para AY. En el caso de ΔS encontramos más estímulos cuya diferencia entre umbrales era menor del 10%.

En cuanto a los estímulos para los que la diferencia entre umbrales no entra dentro de ese 10%, encontramos ahora un número algo mayor (55 para JA y 58 para AY), y todos ellos sobre la línea tritán 2, línea en la que el balance rojo-verde se encuentra equilibrado. Como comentamos anteriormente, el tamaño de $\Delta(L-2M)$ es menor comparado con el de ΔS , por lo que tal vez para decir que dos umbrales $\Delta(L-2M)$ son muy diferentes debe haber una mayor diferencia que la considerada al tratar ΔS ; entonces, encontraríamos que no hay tantos estímulos en los que la diferencia entre umbrales sea tan grande.

Tal y como hicimos con los umbrales ΔS , presentamos a continuación unos ejemplos en los que se comprueba fácilmente que tanto sobre cualquiera de los dos umbrales $\Delta(L-2M)$ como sobre el valor medio de ellos existen las mismas influencias. Las figuras correspondientes a estos ejemplos son las figuras 6.1.4, 5 y 6. Nuevamente elegimos gráficas en las que aparecieran suficientes estímulos como para que éstas fuesen representativas, y correspondientes a líneas horizontal, oblicua y vertical.

En la figura 6.1.4 aparecen los umbrales $\Delta(L-2M)$ hacia el rojo y hacia el verde y el valor medio correspondiente a ambos frente a la excitación de S cuando se mantiene constante el valor $L+M=16$ td. Los dos umbrales se mantienen constantes, tendencia que, por supuesto, aparece también en el caso de la media. La siguiente figura que analizaremos será la 6.1.5, en la que los umbrales $\Delta(L-2M)$ para el observador AY se representan frente a la iluminación retiniana cuando la excitación del canal S es constante e igual a 58 Std. En esta figura se observa que hasta que se alcanzan los 109 td,

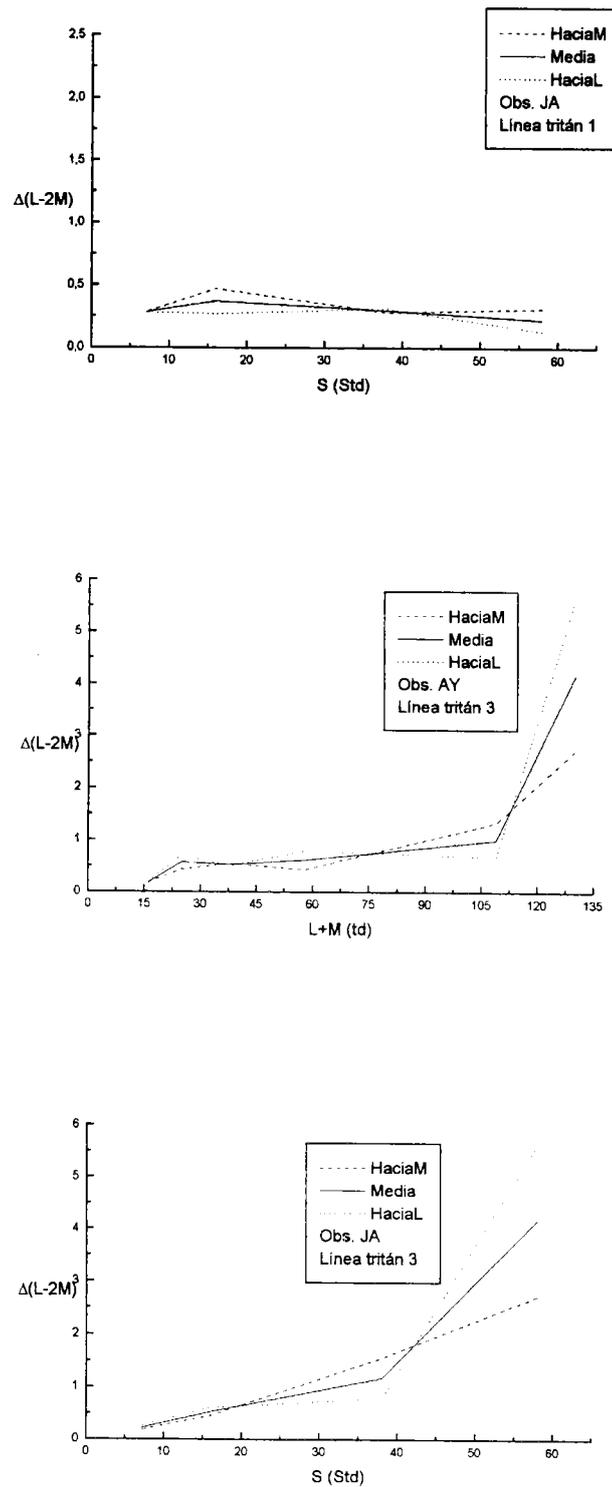


Fig. 6.1.4, 5 y 6.- Ejemplos de los dos valores de $\Delta(L-2M)$ a ambos lados de la línea rojo-verde frente a diferentes parámetros.

$\Delta(L-2M)$ es casi constante en los tres casos, y que a partir de ese valor el umbral aumenta. Este aumento está más acentuado en el umbral en el sentido del rojo, pero se observa en todas las líneas de la figura. La última de las figuras que mostraremos es la 6.1.6, en la que se representa $\Delta(L-2M)$ frente a S cuando se mantienen constantes las coordenadas de cromaticidad (0.450, 0.378) en el espacio CIE1931 y varía la luminancia de los estímulos. Esta figura es similar a la anterior, pues en ella se observa un aumento del umbral más acentuado en la gráfica correspondiente al umbral hacia el rojo, aunque el incremento se detecta en las tres gráficas. En las dos últimas figuras la diferencia entre los dos umbrales $\Delta(L-2M)$ es grande para los mayores valores de L+M y S, respectivamente, pero en cualquiera de las tres líneas de cada figura se observa la misma influencia del parámetro correspondiente.

Por tanto, igual que concluimos con ΔS , estimamos que para analizar las influencias de diferentes parámetros sobre $\Delta(L-2M)$ podríamos utilizar el valor medio de los dos umbrales obtenidos experimentalmente. Por ello, a partir de ahora, en el análisis que realizaremos en los dos apartados posteriores el valor que aparecerá tanto de ΔS como de $\Delta(L-2M)$ es en realidad el valor medio de los umbrales a ambos lados de la línea correspondiente.

6.2.- Análisis y discusión del umbral de discriminación en el eje tritán

En la literatura se encuentran diversos trabajos en los que una de las conclusiones es la dependencia del umbral ΔS con la excitación del canal S, por ejemplo Rodieck (1973), Boynton y Kambe (1980), Miyahara et al. (1993) y Romero et al. (1993), pero trabajando siempre a luminancia constante. En estas experiencias las diferentes excitaciones del cono S se consiguieron variando las coordenadas de cromaticidad de los estímulos a estudiar, como se puede ver en la ecuación

$$Exct.S = \frac{1-x-y}{y} \cdot (L + M)$$

donde x,y son las coordenadas del estímulo en el diagrama CIE1931 y (L+M) la iluminación retiniana del mismo expresada en trolands. Atendiendo a esta ecuación se puede ver que las diversas excitaciones de S también se pueden conseguir variando la iluminación retiniana sin modificar las coordenadas del estímulo, o que el valor de S puede mantenerse constante aun variando tanto (L+M) como x e y.

Así, hemos subdividido el análisis de ΔS en cuatro partes. En la primera se analiza el umbral ΔS frente a S manteniendo (L+M) constante, con lo que obviamente variarán las coordenadas del estímulo, y en la segunda también analizaremos ΔS frente a S, pero esta vez manteniendo constantes las coordenadas de cromaticidad. En la tercera parte estudiaremos ΔS cuando la excitación de S permanece contante, por lo que tanto x e y como (L+M) deben variar. Por último, tenemos una cuarta parte en la que presentamos el umbral ΔS frente a la excitación del canal L-2M.

6.2.1- ANÁLISIS DEL UMBRAL ΔS FRENTE A S CON LUMINANCIA CONSTANTE

Para realizar este análisis mostraremos una serie de figuras en las que se representa el umbral de discriminación ΔS frente a la excitación del cono S manteniendo la luminancia constante, figuras de la 6.2.1 a la 6.2.5. En cada una de las figuras aparecen tres gráficas, correspondientes cada una de ellas a las tres líneas de confusión tritán analizadas en este trabajo. La situación de los estímulos cuyos umbrales aparecen en cada gráfica se muestra con una línea gruesa en la figura recuadrada de cada página.

Comparando en primer lugar las figuras con diferentes niveles de luminancia, vemos que cuando éste es menor también son menores los umbrales de discriminación ΔS . También se observa que para el nivel de luminancia más bajo $L+M=16$ td, figura 6.2.5, los umbrales permanecen prácticamente constantes, especialmente en la primera gráfica en la que el balance rojo-verde está desequilibrado hacia el verde (línea tritán 1). Sin embargo, cuando el nivel de luminancia es más alto, el aumento de ΔS con S es mayor, sobre todo a partir de aproximadamente 60 Std. El que este aumento sea más claro a partir de este valor puede ser una de las razones de que cuando $L+M=16$ td no sea tan patente el incremento de ΔS con S, ya que para este valor de la iluminación retiniana el máximo valor de S que teníamos era 58 Std.

En cuanto a las diferencias existentes entre los dos observadores, las gráficas de ambos muestran las mismas tendencias, salvo en algunos casos como los de las figuras 6.2.2.b y 6.2.3.b. Hay que destacar que la semejanza entre los resultados de ambos observadores es mayor cuanto menor es el nivel de luminancia, lo que se observa claramente en la figura 6.2.5, en la que

la iluminación retiniana tiene un valor de 16 td. El parecido entre las gráficas de los dos observadores es todavía mayor en las correspondientes a la línea de confusión tritán 1 (desequilibrio de L-2M hacia el verde), en las que los resultados de AY y JA son prácticamente iguales, salvo en la gráfica 6.2.2.a.

En todas las gráficas presentadas en este apartado se observa principalmente que el umbral de discriminación ΔS crece a medida que lo hace la excitación del cono S, tendencia que muestran ambos observadores para cualquiera de los niveles de luminancia estudiados.

Esta tendencia ya fue indicada por Rodieck (1973) y trabajos posteriores lo han confirmado, como por ejemplo, el Yeh et al. (1993). En este trabajo aparece un aumento de ΔS con S en la revisión que los autores hicieron de los datos de Brown y MacAdam (1949). Además, también representaron el $\text{Log}\Delta S$ frente al $\text{Log}S$ de datos obtenidos por ellos mismos, mostrando que ΔS crece cuando lo hace S, y que este crecimiento se acentúa cuando la excitación de S es mayor de 100-200 Std. En las experiencias de Miyahara et al. (1993) también encontramos este incremento de ΔS con S, aunque la forma de sus gráficas sea algo diferente debido a que utilizaron diversos campos circundantes. También Boynton y Kambe (1980), en un trabajo que analizaba los umbrales de discriminación a lo largo de los ejes tritán y rojo-verde, llegan a la conclusión de que la discriminación en el eje tritán depende de la excitación del cono S.

En nuestros resultados, aparte del comentado aumento de ΔS con S, podemos observar que en muchas de las gráficas a partir de aproximadamente 60 Std de excitación del cono S se produce un aumento mucho más claro de ΔS frente a S. Esto podría sugerir un cambio en el comportamiento del canal cromático S a partir de unos 60 Std, aunque más allá de ese valor las figuras muestran características dispares; por ejemplo,

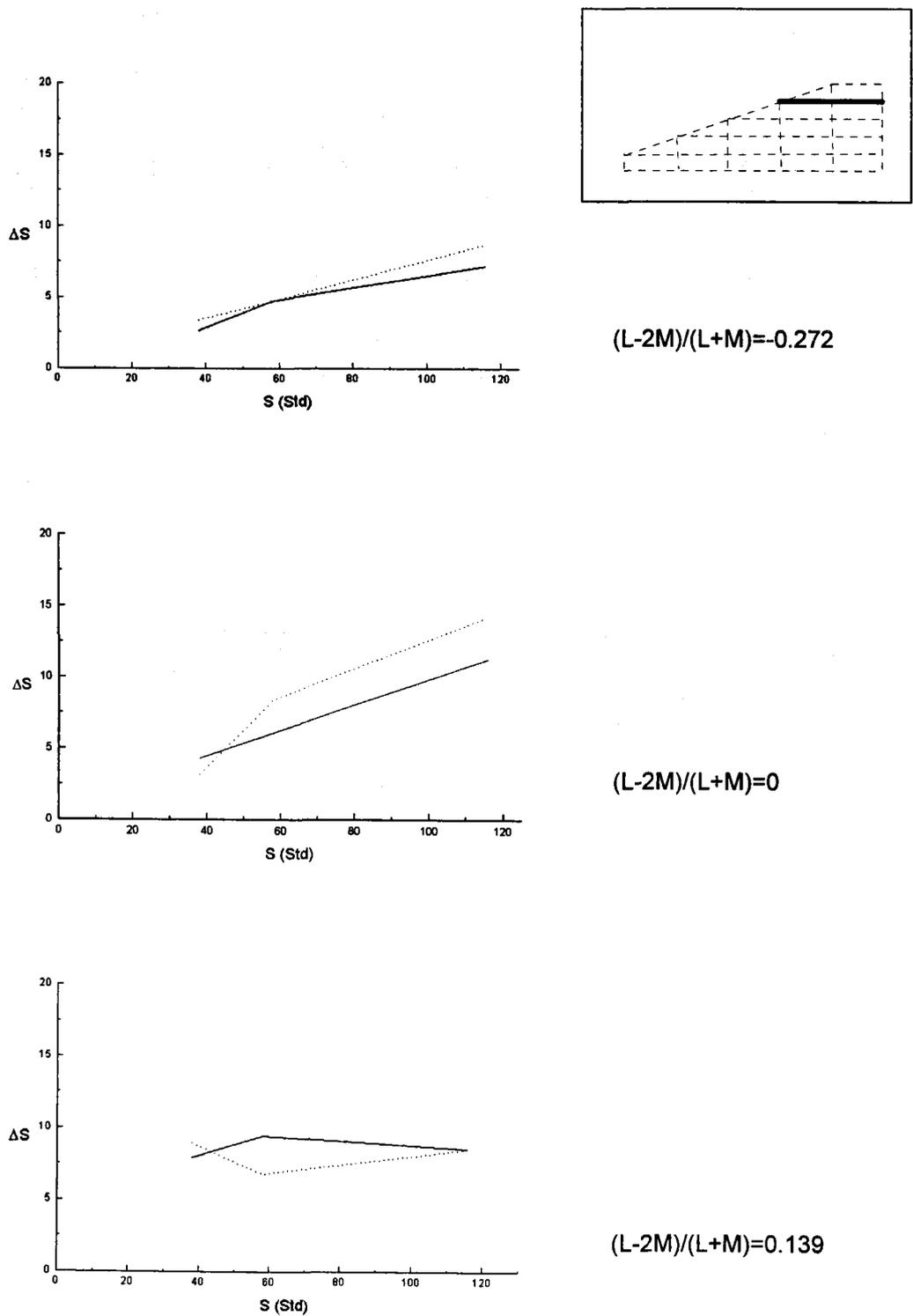
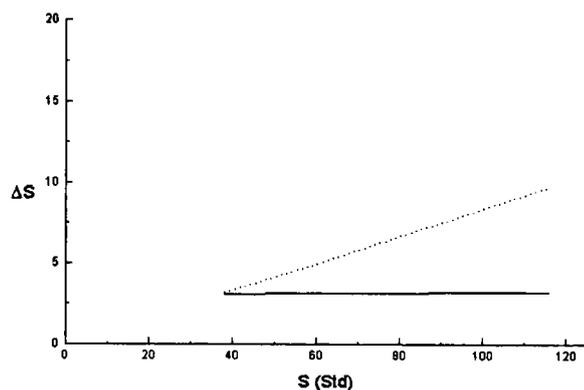
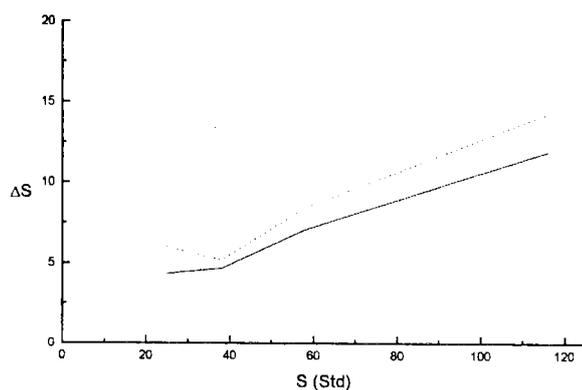


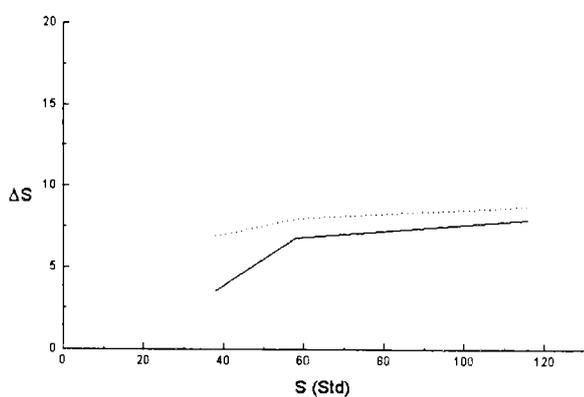
Fig. 6.2.1.a,b y c.- ΔS frente a S en planos de luminancia constante $L+M=109$ td.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.



$$(L-2M)/(L+M)=-0.272$$

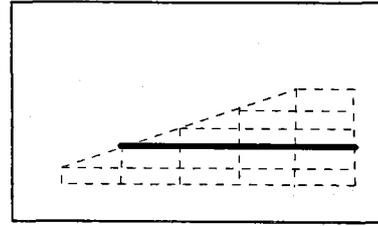
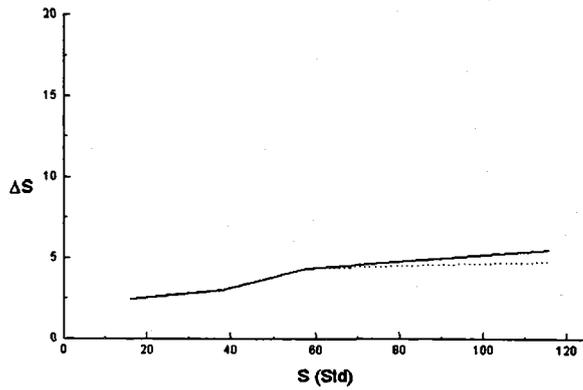


$$(L-2M)/(L+M)=0$$

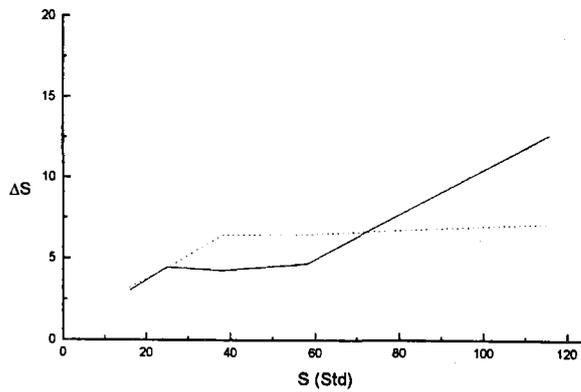


$$(L-2M)/(L+M)=0.193$$

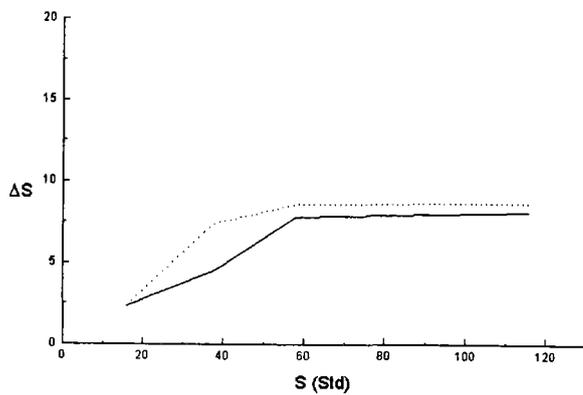
Fig. 6.2.2.a,b y c.- ΔS frente a S en planos de luminancia constante $L+M=58$ td.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.



$$(L-2M)/(L+M)=-0.272$$

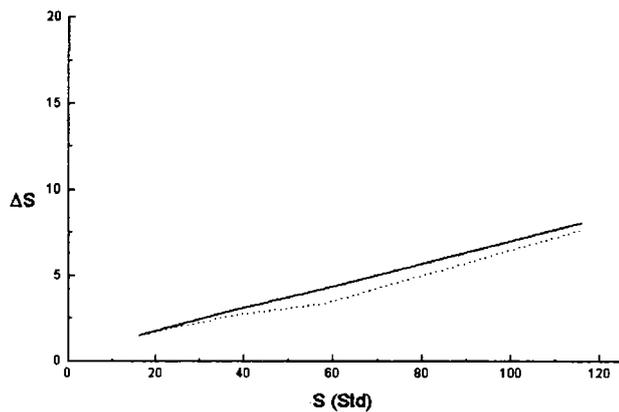


$$(L-2M)/(L+M)=0$$

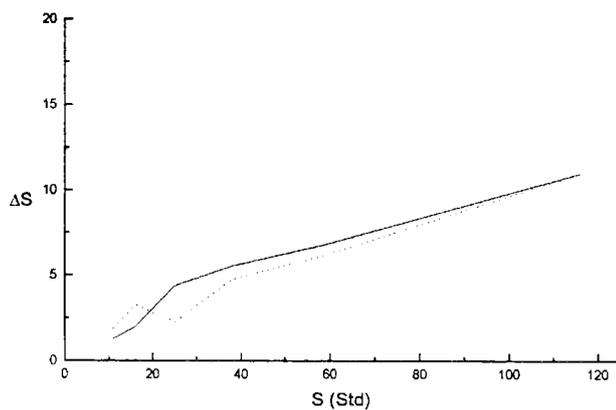


$$(L-2M)/(L+M)=0.193$$

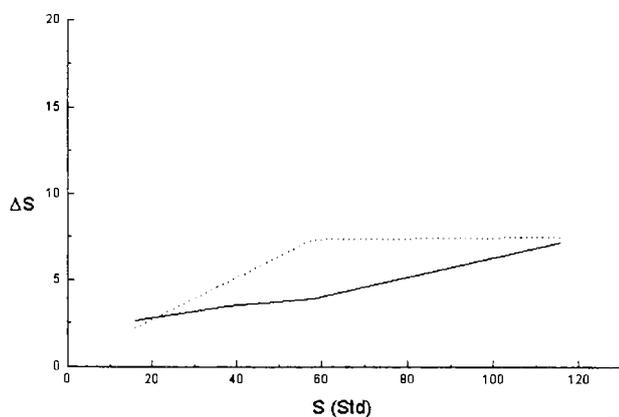
Fig. 6.2.3.a,b y c.- ΔS frente a S en planos de luminancia constante $L+M=38$ td.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.



$$(L-2M)/(L+M)=-0.272$$



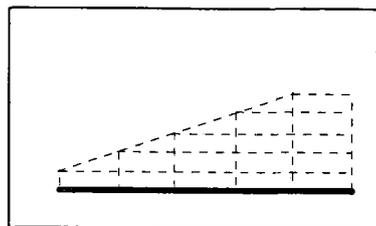
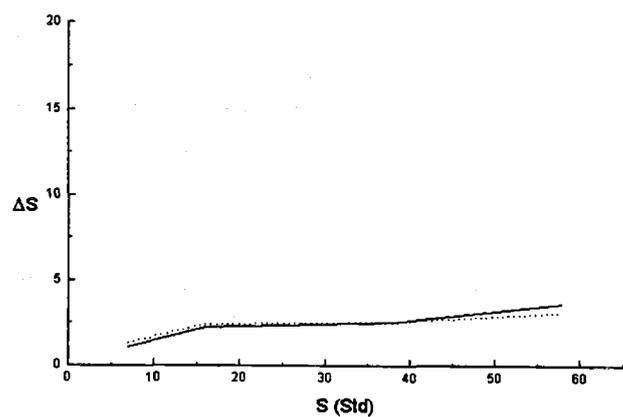
$$(L-2M)/(L+M)=0$$



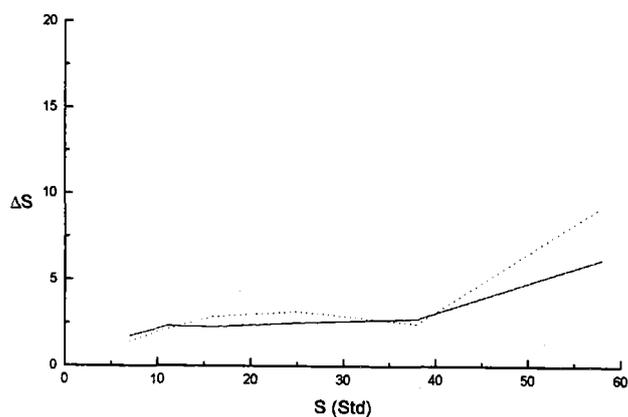
$$(L-2M)/(L+M)=0.193$$

Fig. 6.2.4. a,b y c.- ΔS frente a S en planos de luminancia constante $L+M=25$ td.

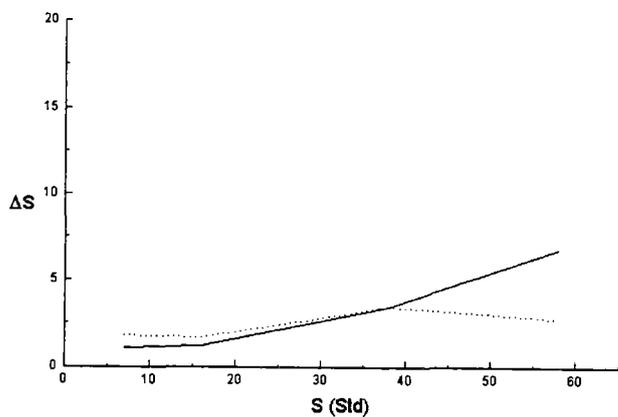
- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.



$(L-2M)/(L+M)=-0.272$



$(L-2M)/(L+M)=0$



$(L-2M)/(L+M)=0.193$

Fig. 6.2.5.a,b y c.- ΔS frente a S en planos de luminancia constante $L+M=16$ td.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

en la figura 6.2.3.b parece que a partir de 60 Std el umbral ΔS se mantiene constante para el observador AY mientras que crece mucho más para JA, mientras que en la 6.2.2.b se produce un aumento claro para los dos y en la 6.2.3.c tanto AY como JA presentan gráficas casi constantes a partir del valor de 60 Std.

A la vista de las figuras que aportamos en este apartado, no parece que el equilibrio rojo-verde influya en esta variación de ΔS con S, lo que ya fue advertido por Romero et al. (1993) al analizar sus resultados. De cada grupo de tres figuras, en la primera el balance rojo-verde está desequilibrado hacia el verde, en la segunda se encuentra equilibrado ($L-2M=0$), y en la tercera hacia el rojo, y en las tres se pueden ver resultados muy similares en cuanto a la variación de ΔS con S. No obstante, como ya hemos comentado en este mismo apartado, parece que cuando el canal rojo-verde se encuentra desequilibrado hacia el verde (línea de confusión tritán 1) los resultados de los dos observadores son mucho más parecidos, aunque en las otras dos líneas tritán también se observan semejanzas entre ambos. De todos modos, esta dependencia del umbral de discriminación ΔS con la excitación del mecanismo L-2M la analizaremos un poco más tarde en otro apartado de este capítulo.

6.2.2.- ANÁLISIS DEL UMBRAL ΔS FRENTE A S CON LAS MISMAS COORDENADAS DE CROMATICIDAD

En este apartado continuamos analizando la variación del umbral de discriminación ΔS para diversos estímulos cuando varía el nivel de excitación de S. Para ello, en este subapartado se muestran las figuras 6.2.6, 7 y 8, donde aparece el umbral ΔS frente a la excitación del cono S cuando la luminancia de los estímulos varía (lo que implica una variación de S) y se mantienen constantes las coordenadas de cromaticidad en el espacio CIE1931. Cada figura corresponde a cada una de las tres líneas de confusión tritán analizadas. En la figura recuadrada, las líneas gruesas señalan los estímulos cuyos umbrales aparecen en cada gráfica de esa página, y en el recuadro de cada gráfica el cociente $S/(L+M)$, que indica a qué grupo vertical de estímulos se refiere, siendo dentro de cada línea tritán los estímulos más azules los que tienen un mayor valor de esta fracción.

En todas la gráficas se observa un claro aumento de ΔS cuando S aumenta, lo que también indican Yeh et al. (1993). Resulta complicado comparar este resultado con los de otros autores, ya que la mayoría de ellos realizan sus experiencias a luminancia constante, Miyahara et al. (1993), Romero et al. (1993), y en los estímulos que analizamos en este apartado la variación de excitación de S conlleva una variación en iluminación retiniana al mantenerse constantes las coordenadas de cromaticidad, como explicamos al principio. Este aumento del umbral se hace más evidente cuando los estímulos tienen un valor de S mayor de 60 Std aproximadamente; no obstante, es precisamente a partir de este valor en los estímulos sobre la línea tritán 3 cuando parece que ΔS se mantiene constante, especialmente para el observador AY.

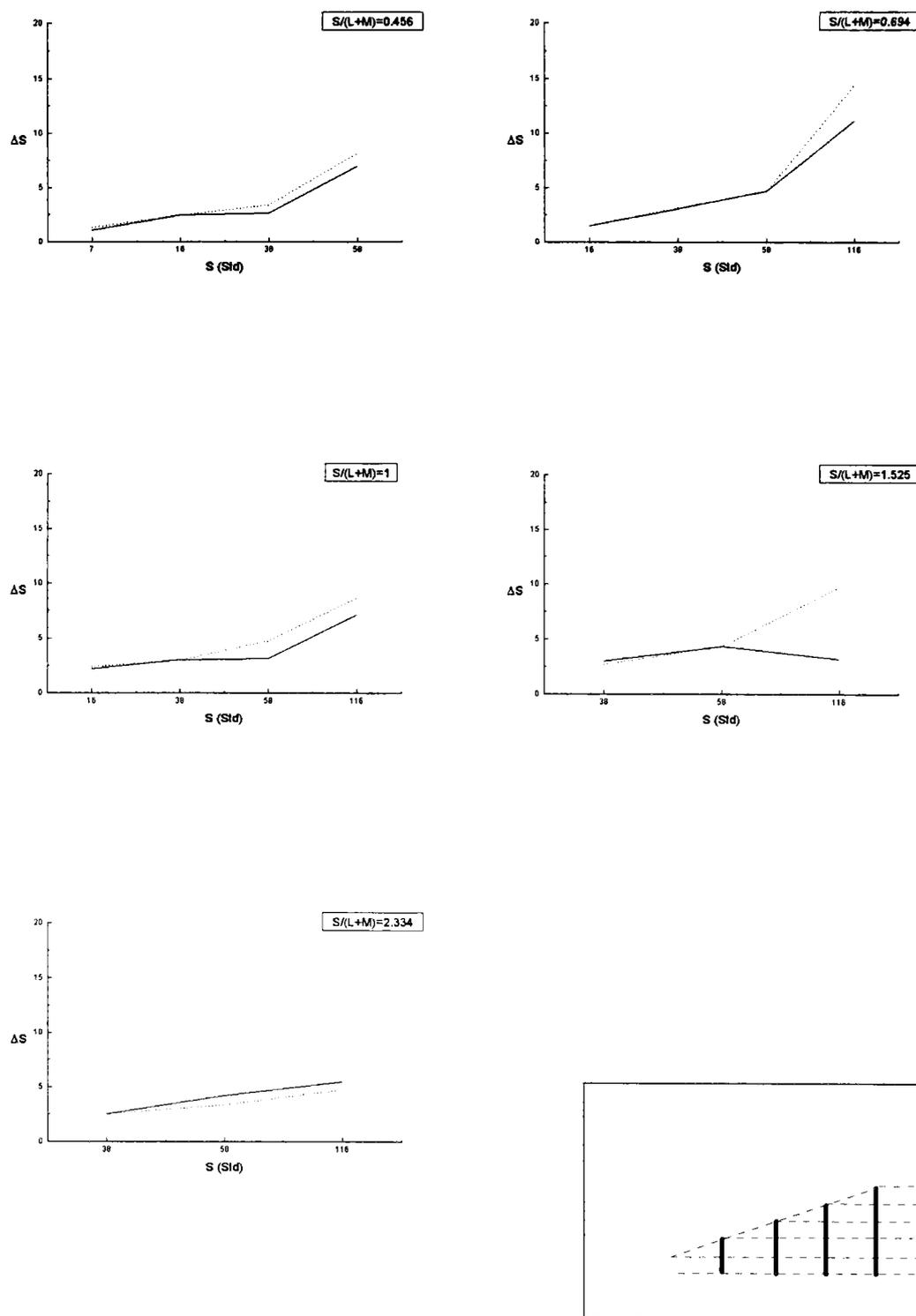


Fig. 6.2.6.- ΔS frente a S para estímulos sobre la línea de confusión tritán 1 con las mismas coordenadas de cromaticidad y diferentes niveles de luminancia.
 — Obs. JA, Obs. AY.

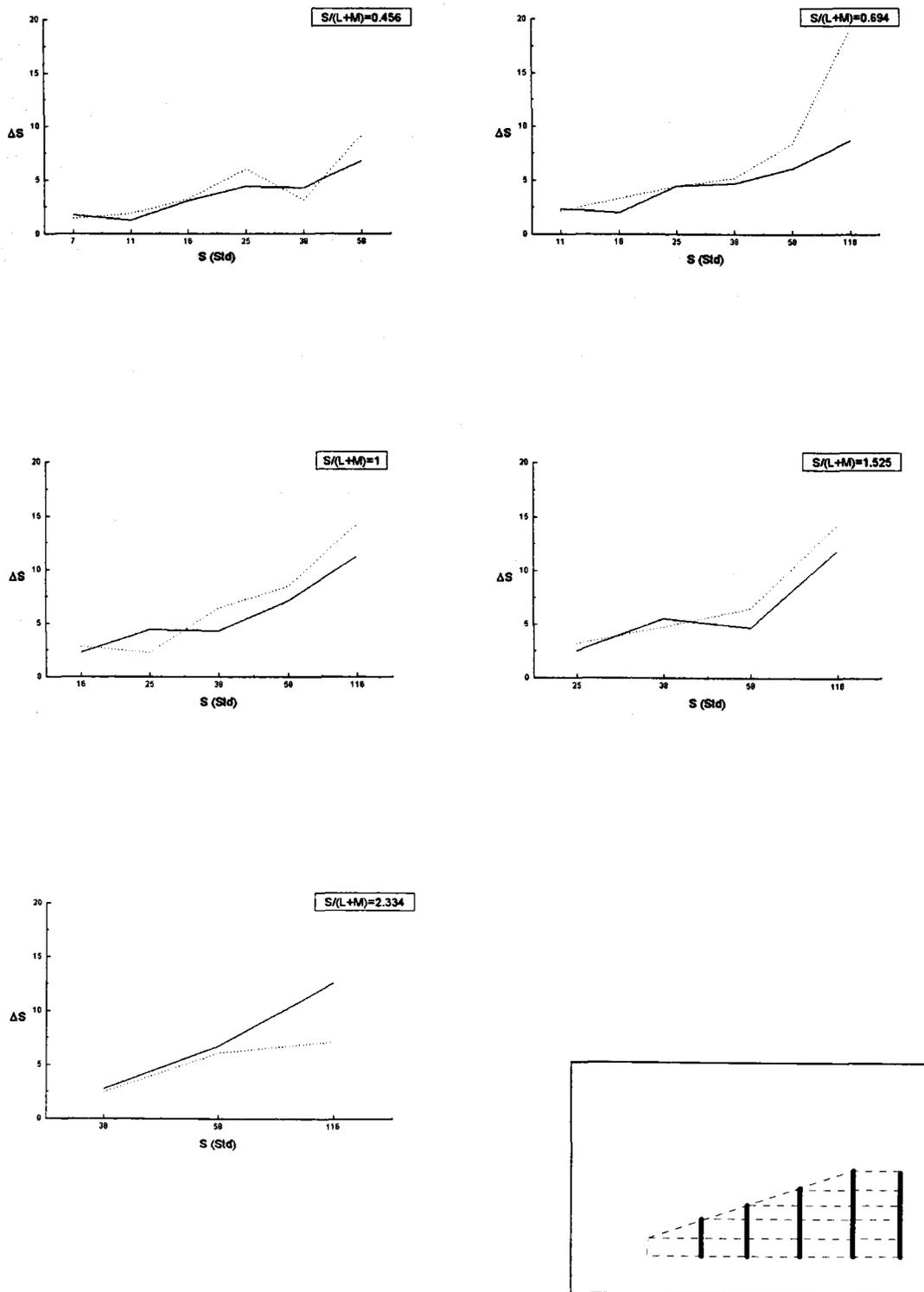


Fig. 6.2.7.- ΔS frente a S para estímulos sobre la línea de confusión tritán 2 con las mismas coordenadas de cromaticidad y diferentes niveles de luminancia.
 — Obs. JA, Obs. AY.

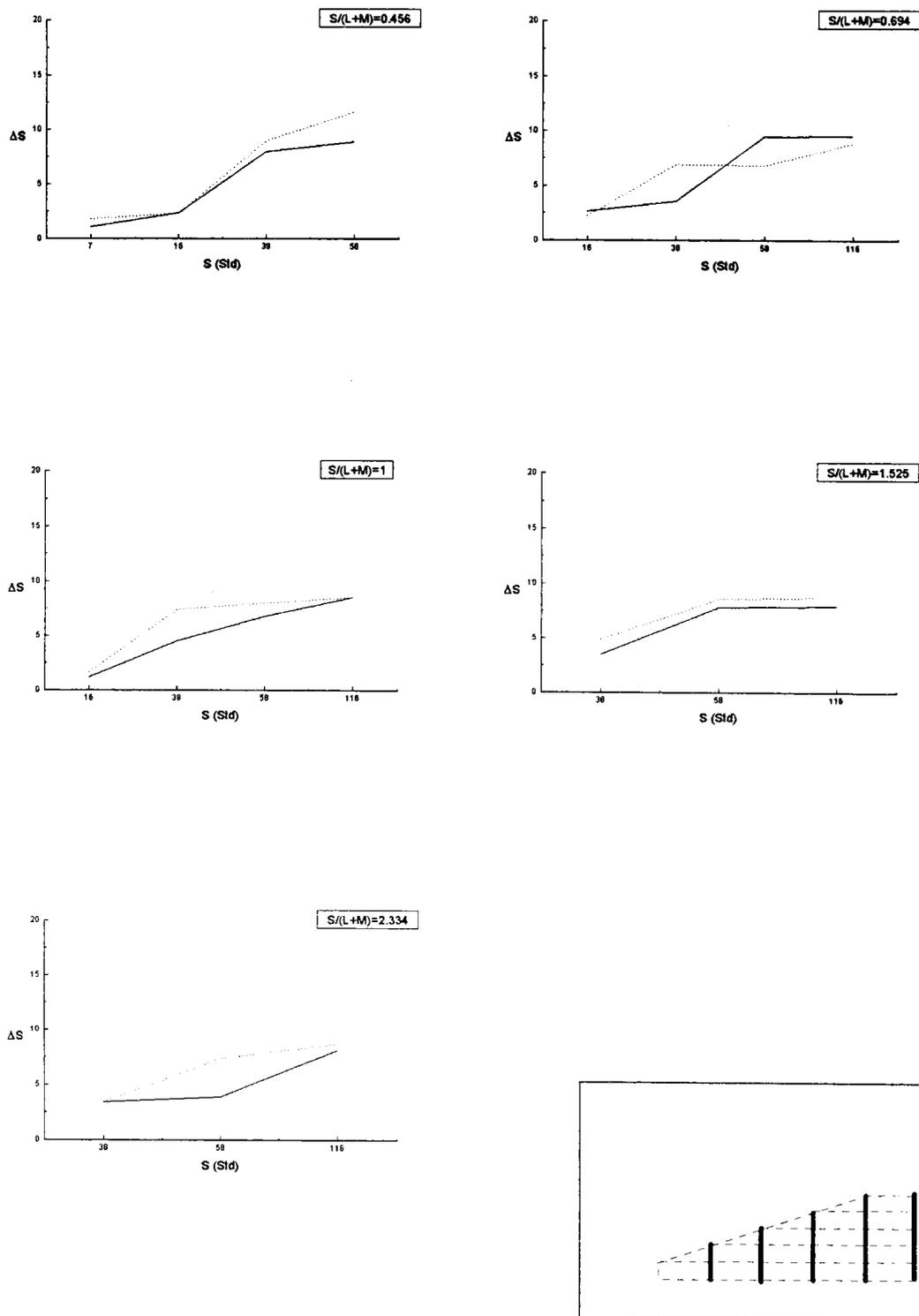


Fig. 6.2.8.- ΔS frente a S para estímulos sobre la línea de confusión tritán 3 con las mismas coordenadas de cromaticidad y diferentes niveles de luminancia.
 — Obs. JA, Obs. AY.

Entre las diferentes figuras, que corresponden a diferentes líneas tritán, se observa una gran similitud. Los valores que toman los umbrales ΔS en las tres figuras son muy parecidos, del mismo modo que también son parecidas las diferentes gráficas al mostrar similar aumento de ΔS con S . Sin embargo, a pesar de esto, hay algunas diferencias entre las figuras. En la figura 6.2.7, correspondiente a la línea tritán 2 en la que $L-2M=0$, el aumento de ΔS con S es mucho más evidente, sobre todo a partir del valor de S que ya comentamos, unos 60 Std, y en la figura 6.2.8, de la línea tritán 3, es precisamente a partir de este valor cuando los umbrales ΔS permanecen constantes, lo que no aparecía en las restantes figuras. Estas diferencias entre las figuras pueden deberse a la variabilidad propia de este tipo de experiencias, por lo que podríamos decir que en estas figuras no se encuentra influencia del balance rojo-verde.

En cuanto a los observadores, en los resultados de ambos se observa claramente el aumento de ΔS con S , aunque es mucho más patente en el observador AY, sobre todo en la figura 6.2.7 correspondiente a la línea tritán 2. Por otra parte, es éste el que obtiene casi siempre los mayores umbrales, aunque cuando S es pequeño los valores de ΔS para ambos observadores son muy parecidos, lo que se observa bien sobre todo en las gráficas de la figura 6.2.6. A pesar de que para AY en la figura 6.2.8 parece que el umbral ΔS se mantiene constante a partir de un cierto valor, el aumento de ΔS con S sigue siendo evidente.

En una misma figura aparecen diferentes gráficas correspondientes a las líneas verticales que se muestran en el esquema recuadrado. El cociente $S/(L+M)$ indica a qué grupo se refiere cada gráfica, de modo que el mayor valor de esta fracción corresponde a los estímulos más azules de cada línea tritán. Es para estos estímulos para los que se ve menos claro el aumento de ΔS con S , con la excepción de la gráfica para JA en la figura 6.2.7. En todas

las demás este aumento está claro, sobre todo cuando $S/(L+M)$ se va haciendo menor, es decir, cuando el grupo de estímulos se va alejando de la zona de los azules del diagrama cromático. De todos modos, el que para los estímulos más azules el aumento de ΔS con S sea menor puede deberse no solamente a las características propias de los estímulos, sino también a que a medida que nos vamos acercando a esta zona se dispone de menos estímulos en el grupo analizado.

Según todos los comentarios hechos, existe un claro aumento del umbral ΔS con S , aun cuando el cambio de S es debido a variaciones en la luminancia y no en las coordenadas de cromaticidad. Además, no parece que el balance rojo-verde tenga influencia sobre el cambio de ΔS con S , aunque, como dijimos en el apartado anterior, este punto lo discutiremos posteriormente.

6.2.3.- ANÁLISIS DEL UMBRAL ΔS FRENTE A L+M MANTENIENDO S CONSTANTE

En las siguientes figuras, numeradas como figuras 6.2.9, 10, 11 y 12, se muestra la variación del umbral ΔS frente a la iluminación retiniana L+M en trolands cuando la excitación de S se mantiene constante, es decir, en *líneas oblicuas* en las que varían tanto la iluminación retiniana como las coordenadas de cromaticidad de los estímulos. En cada figura aparecen tres gráficas, cada una correspondiente a las diferentes líneas de confusión tritán analizadas, y también un esquema en el que se resalta la línea oblicua de excitación de S constante sobre la que se sitúan los estímulos cuyos umbrales se analizan.

La primera característica que encontramos al ver las figuras es que algunas de ellas son muy irregulares en cuanto al comportamiento de ΔS frente a L+M, como es, entre otros, el ejemplo de la figura 6.2.9 para las líneas tritán 1 y 2. Esto puede deberse a la dificultad de encontrar estímulos suficientemente próximos entre sí para calcular los umbrales representados, ya que en estos casos la excitación del cono S era 116 Std y la iluminación retiniana de alguno de los estímulos era cercana a 130 td.

Aparte de estos casos, parece que el umbral ΔS permanece prácticamente constante al variar la iluminación retiniana si la excitación del cono S es también constante, tendencia que aparece en ambos observadores y para cualquier valor de la excitación de S. Nuevamente resulta difícil comparar estos resultados con los de otros autores, ya que los pocos que trabajan con diferentes niveles de luminancia, Yeh et al. (1993), analizan los umbrales ΔS frente a S con la luminancia constante, y no frente a la iluminación retiniana con la excitación de S constante como hemos hecho en este subapartado.

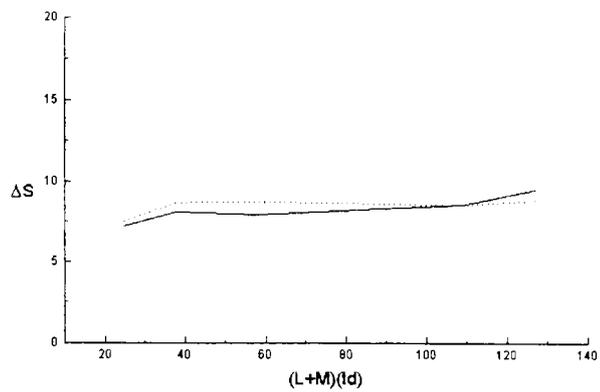
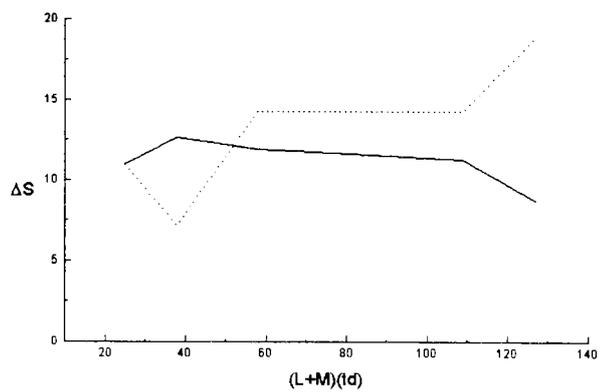
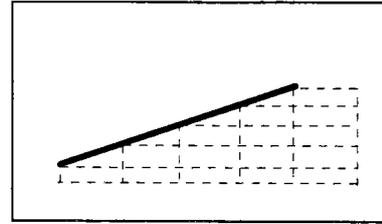
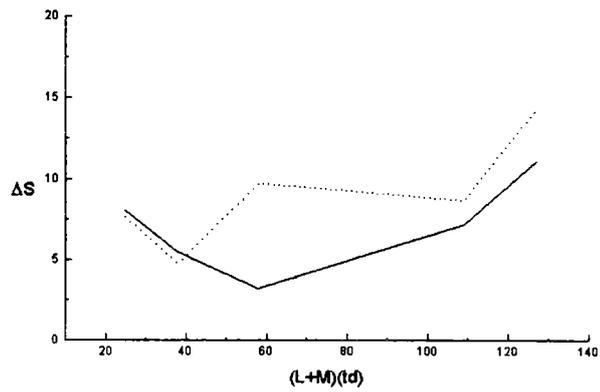


Fig. 6.2.9.a, b y c.- ΔS frente a L+M manteniendo constante el valor $S=116$ Std.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.

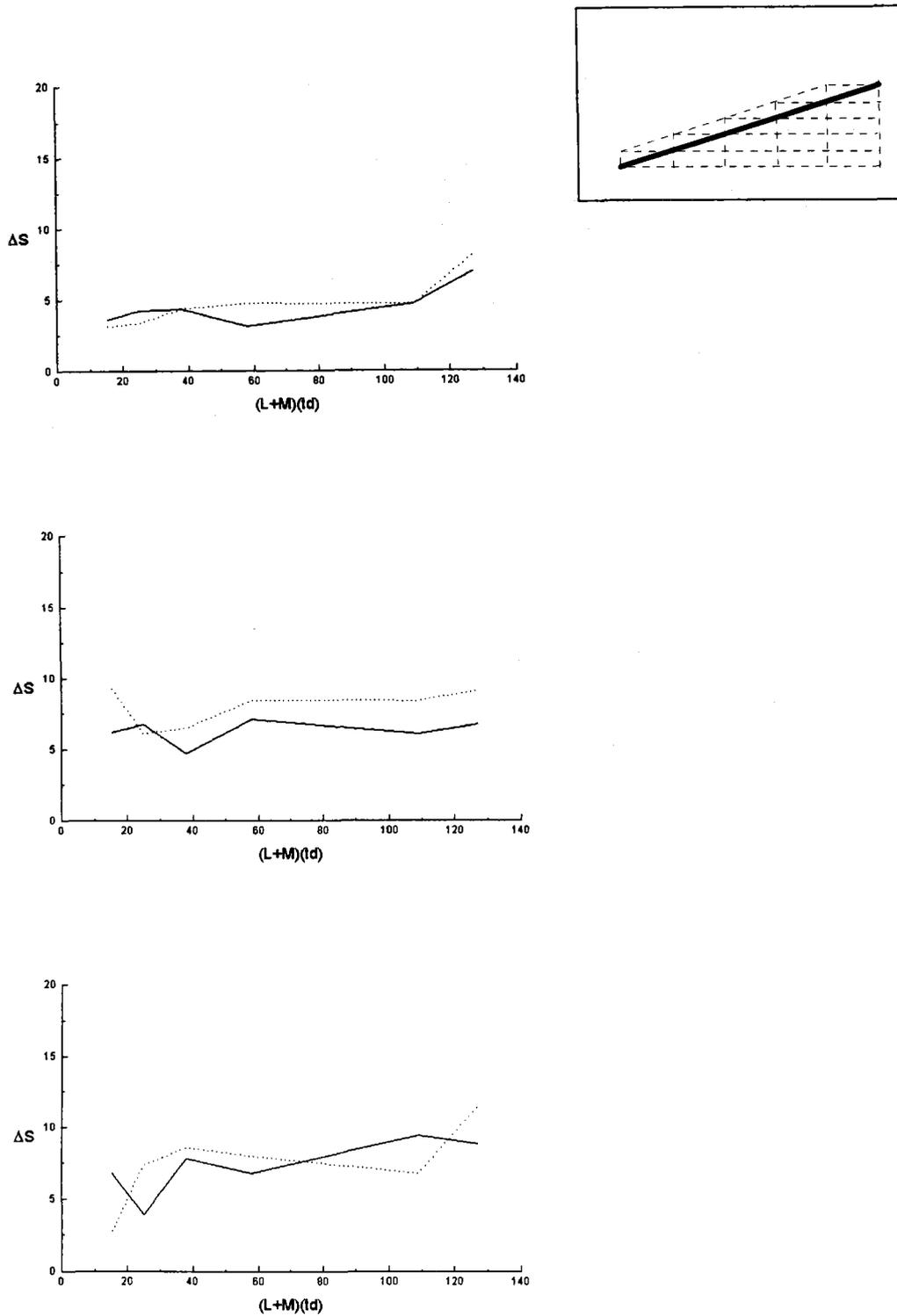


Fig. 6.2.10. a, b y c.- ΔS frente a L+M manteniendo constante el valor $S=58$ Std.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

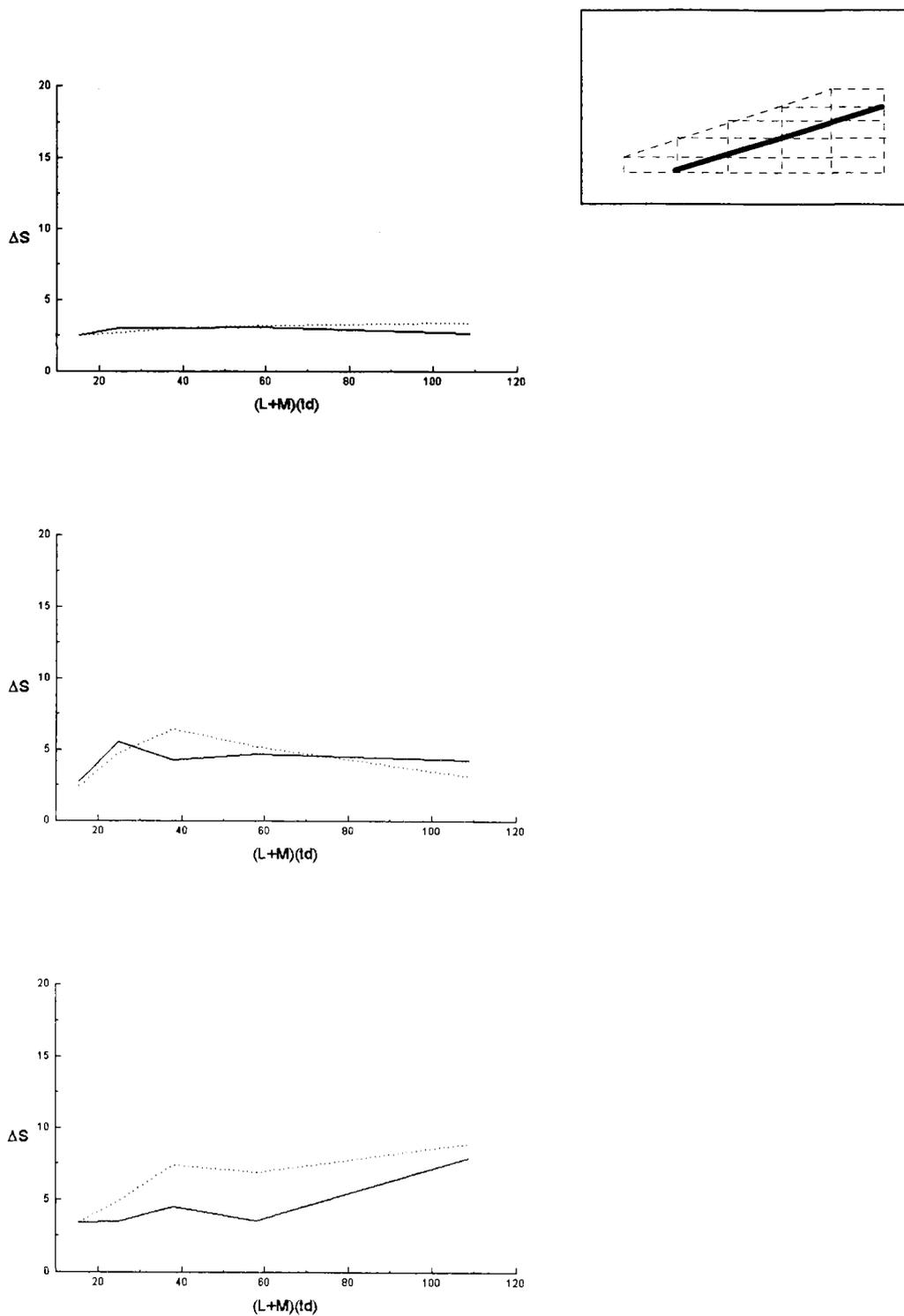


Fig. 6.2.11. a, b y c.- ΔS frente a L+M manteniendo constante el valor $S=38$ Std.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

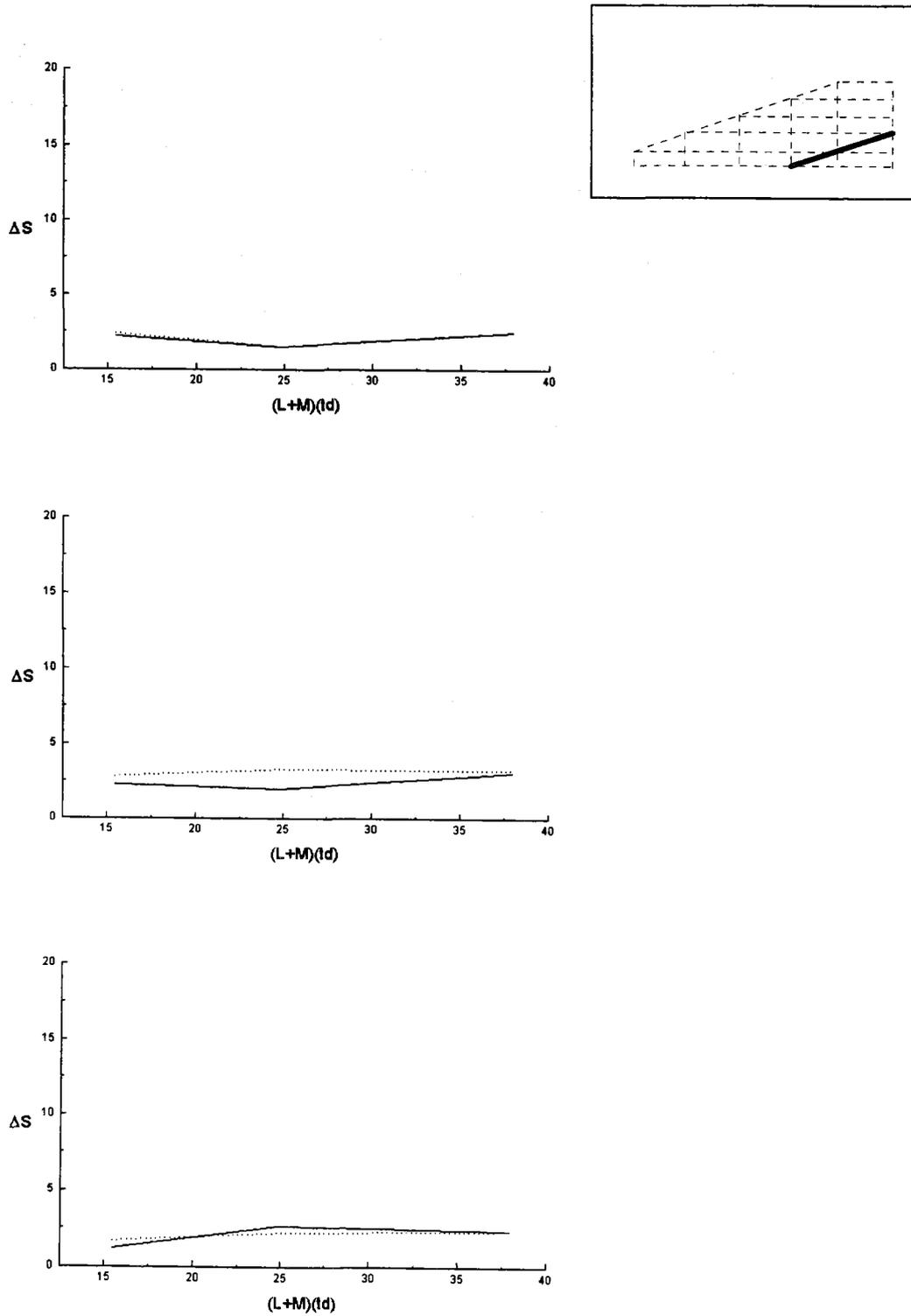


Fig. 6.2.12.a, b y c.- ΔS frente a L+M manteniendo constante el valor $S=16$ Std.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.

En todas las figuras, a pesar de algunas irregularidades ya mencionadas, se puede ver que el umbral ΔS es más elevado en las gráficas en las que la excitación de S es mayor, lo que es consistente con lo ya discutido cuando veíamos que el umbral de discriminación ΔS aumentaba al aumentar también la excitación del cono S. También hay que destacar que para los menores valores de S la constancia de ΔS es mucho más clara y las irregularidades desaparecen, hasta el punto de que cuando $S=16$ Std, figura 6.2.12, las líneas son casi horizontales, aunque también hay que tener en cuenta que cuanto menor es el valor de S, menos estímulos se representan en la gráfica. Esto llevaría a que para los mayores valores de S, al existir más estímulos sobre la línea oblicua, hay más posibilidad de que aparezcan irregularidades.

Los resultados para ambos observadores son similares, existiendo grandes diferencias entre ellos sólo en las gráficas que denominamos irregulares, como por ejemplo sucede en las dos primeras de la figura 6.2.9. En cambio, en el resto de las figuras, especialmente en las de $S=16$ Std, los resultados para ambos observadores son prácticamente iguales. A pesar de ello, no parece que la excitación de S influya en que los resultados de ambos observadores se parezcan más o menos, ya que en todas las figuras existen gráficas en las que las líneas de JA y AY son casi iguales.

Por último, señalaremos que no parece haber diferencias entre las gráficas correspondientes a las diferentes líneas de confusión tritán debidas al balance rojo-verde. Las diferencias entre líneas tritán se observan sólo en las figuras con los mayores valores de S, figuras 6.2.9 y 10, pero mientras que cuando $S=116$ Std la gráfica en la que se ve mejor la constancia es la de la línea 3, en la figura de $S=58$ Std esto ocurre en la de la línea 1, con lo que podríamos decir que no parece que el desequilibrio del mecanismo rojo-verde hacia un lado u otro sea el causante de estas diferencias.

Por tanto, a la vista de las figuras y comentarios de este subapartado, podemos decir que la iluminación retiniana L+M no tiene influencia sobre el valor de ΔS si la excitación del cono S es constante, y que tampoco influye sobre este umbral el balance rojo-verde, aunque este último punto será discutido con gráficas adecuadas en el subapartado siguiente.

6.2.4.- ANÁLISIS DEL UMBRAL ΔS FRENTE A L-2M CON S CONSTANTE

En los apartados anteriores hemos analizado la variación de ΔS frente a la excitación del cono S y frente a la iluminación retiniana L+M, y al observar las figuras correspondientes no parecía existir influencia de la excitación del canal L-2M sobre los umbrales ΔS , ya que no se encontraban entre las gráficas de distintas líneas de confusión tritán diferencias que pudieran achacarse al canal rojo-verde. De todos modos, por la disposición de los estímulos estudiados en el diagrama cromático, los datos de los que disponemos nos permiten analizar esta influencia en mayor profundidad. Para ello, representaremos el umbral de discriminación ΔS frente a la excitación del canal L-2M correspondientes a los tres estímulos (de diferentes líneas tritán) que se encuentran en la misma posición de los esquemas de las figuras 4.3, 4 y 5, con lo que en cada gráfica varía el valor de L-2M al cambiar de línea tritán y se mantiene constante el valor de S y L+M. Además, en cada figura de las mostradas aquí, figuras de la 6.2.13 a la 6.2.17, se han agrupado las gráficas con la misma excitación de S.

En la mayoría de las figuras el estímulo de L-2M=0 es un extremal de la gráfica, generalmente un máximo. Este hecho se ve mejor en las figuras con mayor excitación de S y no en las de un valor bajo, ya que cuando S tiene un valor de sólo 7 ó 16 Std, las rectas son prácticamente planas para los dos observadores. Incluso para una excitación del cono S de 38 Std, bastantes de las rectas, sobre todo para el observador JA, son también planas. Si sólo tenemos en cuenta las excitaciones del cono S menores, podemos casi asegurar la no dependencia de ΔS con L-2M. A esta misma conclusión han llegado algunos autores, entre ellos Boynton y Kambe (1980), en cuyo trabajo se incluía unas figuras en las que se representaba $\text{Log} \Delta S$

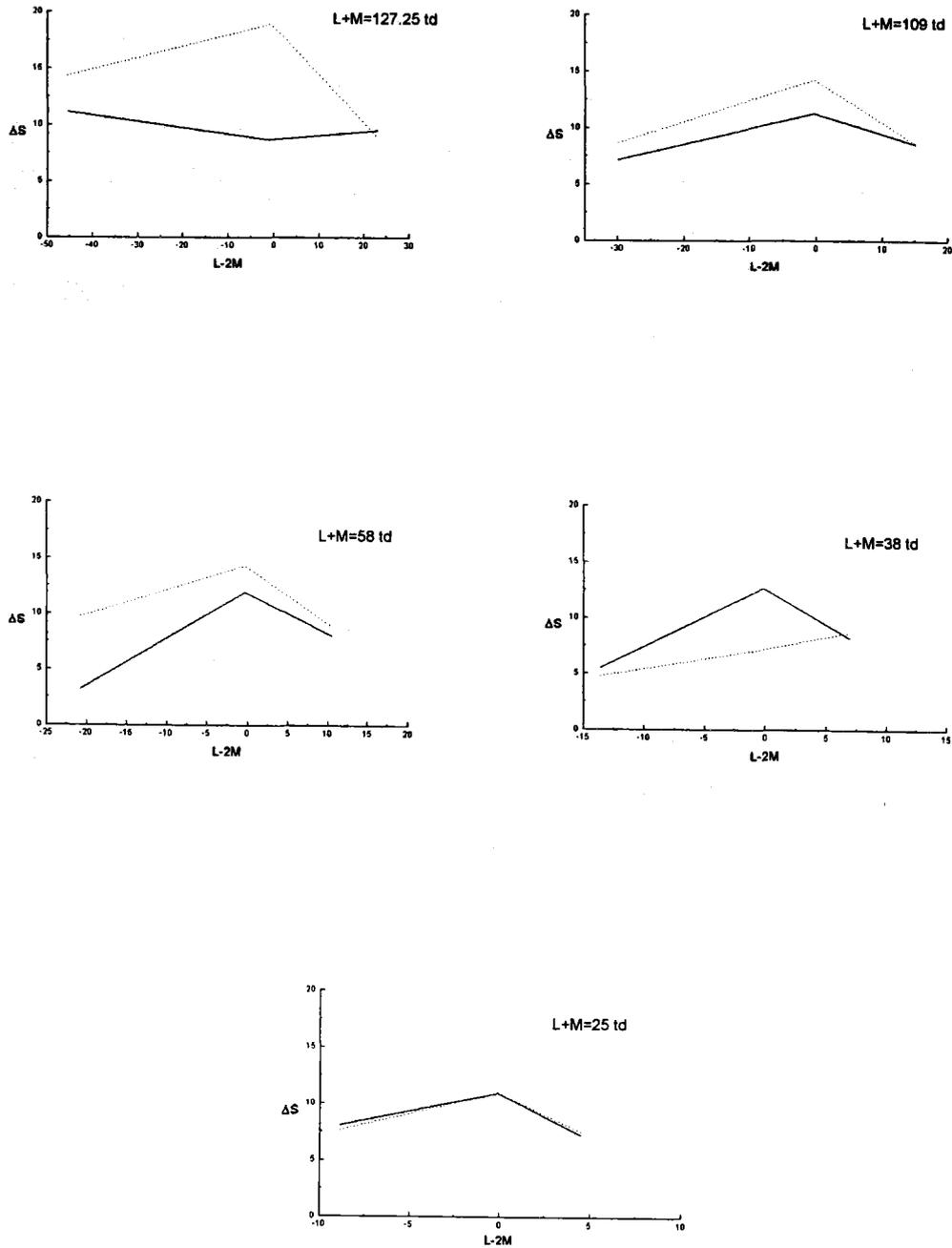


Fig. 6.2.13.- ΔS frente a L-2M a lo largo de líneas con L+M (td) constante y S=116 Std.
 — Obs. JA, Obs. AY.

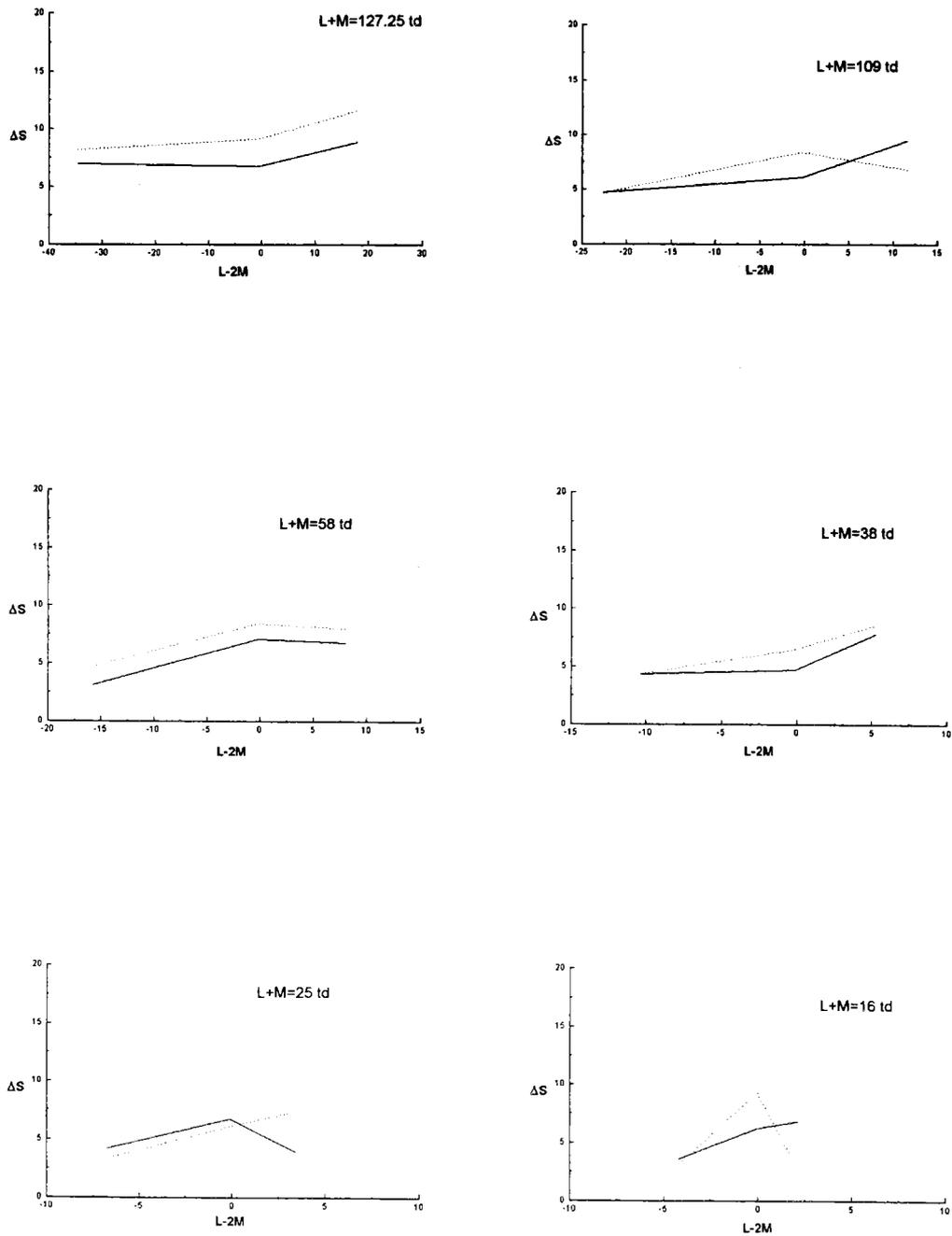


Fig. 6.2.14.- ΔS frente a $L-2M$ a lo largo de líneas con $L+M$ (td) constante y $S=58$ Std. — Obs. JA, Obs. AY.

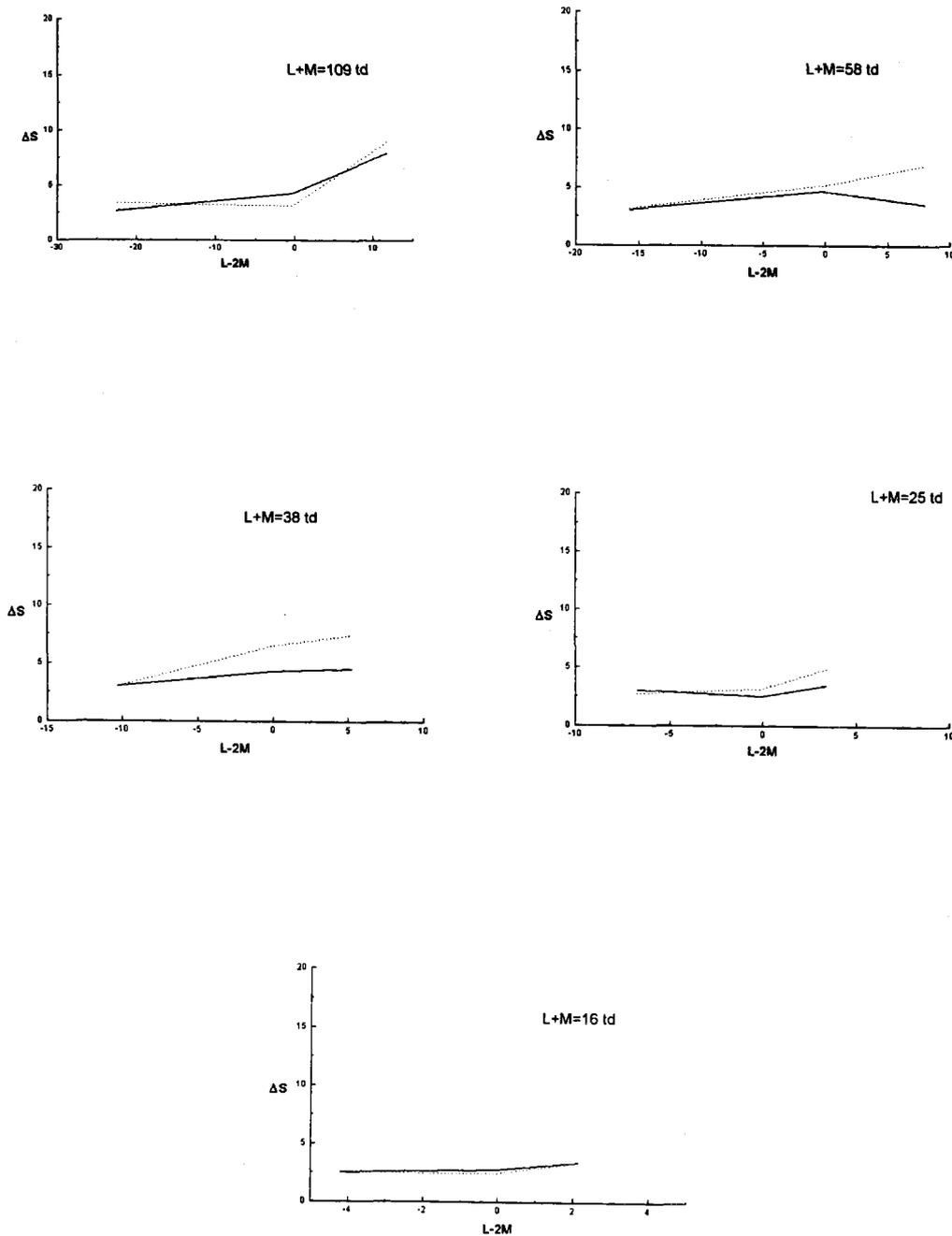


Fig. 6.2.15.- ΔS frente a $L-2M$ a lo largo de líneas con $L+M$ (td) constante y $S=38$ Std.
— Obs. JA, Obs. AY.

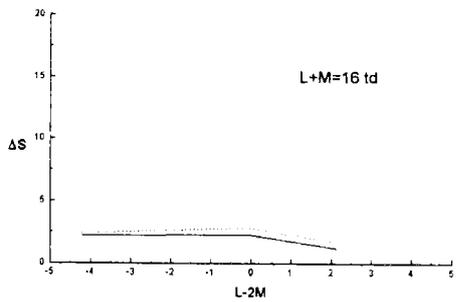
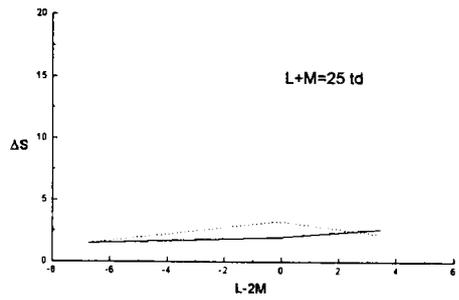
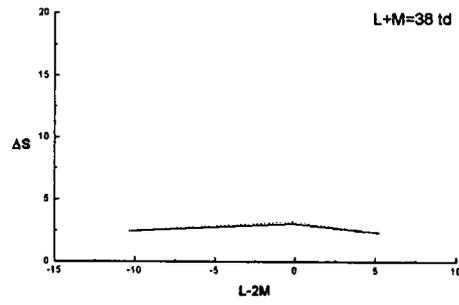


Fig. 6.2.16.- ΔS frente a L-2M a lo largo de líneas con L+M (td) constante y S=16 Std.
— Obs. JA, Obs. AY.

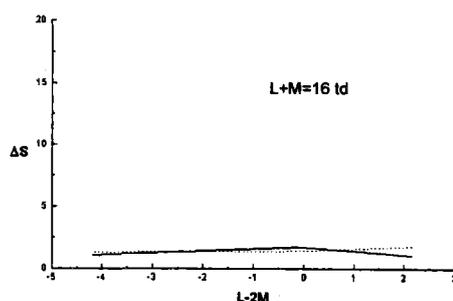


Fig. 6.2.17.- ΔS frente a L-2M a lo largo de una línea con L+M=16 td y S=7 Std.
 — Obs. JA, Obs. AY.

frente a $\text{Log}(L/2M)$, obteniendo unas líneas prácticamente horizontales. También Miyahara et al. (1993), tras un análisis estadístico de sus datos, y Romero et al. (1993), determinaron que los umbrales de discriminación en el mecanismo S no dependían de la excitación del mecanismo L-2M. Sin embargo, a la vista de nuestros resultados para excitaciones de S mayores, esta independencia no está en absoluto clara.

A continuación nos fijaremos en las diferencias existentes entre las figuras correspondientes a distintos valores de S. A medida que la excitación de S se va haciendo menor, también es menor el valor del umbral ΔS , lo que está de acuerdo con lo discutido en apartados anteriores, en los que se comprobó que este umbral crecía con S. Pero lo que más destaca es que cuando S va disminuyendo, el umbral ΔS tiende a permanecer constante, es decir, que este umbral tiende a no variar con L-2M, y esto se observa no sólo cuando S tiene un valor de 16 ó 7 Std, figuras 6.2.16 y 17 respectivamente, sino también cuando S alcanza 58 ó 38 Std con ciertas iluminaciones retinianas, por ejemplo, figura 6.2.14 con L+M=127.25 td o figura 6.2.15 con L+M=16 td.

Si comparamos ahora entre sí las gráficas de cada observador, vemos que éstas se parecen más cuanto menor es el valor de S, ya que para los

valores de S de 16 y 7 Std los umbrales ΔS de JA y AY son prácticamente iguales. Además, dentro de cada figura se observa que a medida que el valor de la iluminación retiniana disminuye, los umbrales de ambos observadores se van pareciendo más, con la excepción de las gráficas correspondientes a L+M=16 td en la figura 6.2.14, en la que los umbrales de JA y AY difieren entre sí más que en cualquier otra gráfica de la misma figura. Hay que destacar también, como una de las pocas diferencias que se encuentran entre observadores, que en la gráfica de L+M=127.25 td de la figura 6.2.13 un observador muestra un máximo mientras que el otro un mínimo, siendo al final los valores de los umbrales muy diferentes entre ellos.

Observando ahora las gráficas de cada figura encontramos que los umbrales ΔS tienen valores parecidos con cualquiera de las iluminaciones retinianas, siempre que la excitación de S sea la misma. No obstante, a pesar de ese parecido encontramos que, manteniendo el valor de S constante, cuando la iluminación retiniana L+M disminuye las gráficas se van haciendo más planas y los umbrales de ambos observadores casi coinciden, con la mencionada excepción de la gráfica con L+M=16 td de la figura 6.2.14.

Tras los anteriores comentarios y a la vista de las figuras expuestas, la conclusión más destacada es que para los valores menores de la excitación de S casi se puede asegurar que el umbral ΔS es independiente de la excitación del canal L-2M, tal y como describen otros autores y se desprende de los análisis de los subapartados anteriores a este; sin embargo, cuando el valor de S es mayor, esta presunta independencia no es tan clara.

6.2.5.- AJUSTE DEL UMBRAL DE DISCRIMINACIÓN ΔS

Para completar los apartados anteriores en los que se ha analizado la dependencia del umbral ΔS con el nivel de excitación de S, el de L-2M y la iluminación retiniana, se podría proponer una ecuación que describiese la discriminación en el mecanismo S, ya que estimamos que al calcular los umbrales de discriminación de 66 estímulos para dos observadores tenemos datos suficientes para ello.

En primer lugar se vio que ΔS crecía con la excitación de S, tanto cuando L+M se mantenía constante como cuando lo que permanecía invariante eran las coordenadas de cromaticidad de los estímulos estudiados. También se analizó ΔS frente a L+M manteniendo S constante, viendo que en este caso el umbral permanecía prácticamente constante, aunque para los mayores valores de S se intuía un cierto aumento de ΔS . Por último, se representó ΔS frente a L-2M. A la vista de estas gráficas se podía casi asegurar que este umbral era independiente de la excitación del canal rojo-verde; sin embargo, esto no quedaba nada claro para las mayores excitaciones del cono S. Por tanto, de todas las dependencias analizadas, la única que es clara es la del umbral de discriminación ΔS con la excitación del cono S, conclusión avalada por Boynton y Kambe (1980), que dan como única influencia sobre el umbral ΔS la excitación del cono S. Otros autores, como Romero et al. (1993) llegan a la misma conclusión, pero dejan abierta la posibilidad de otras influencias, como la de la luminancia, que no pudieron estudiar ya que todos sus umbrales fueron calculados a una luminancia constante e igual a 12 cd/m².

A continuación expondremos los ajustes realizados con nuestros datos según las dependencias encontradas en el análisis anterior. Algunos de ellos se obtuvieron mediante regresiones lineales, con ρ indicando la correlación

con los datos experimentales, mientras que en otros casos el ajuste fue no lineal y el coeficiente que daba la bondad de ajuste era χ^2 . La comparación de estos dos valores ρ y χ^2 es complicada, por lo que para concluir qué ajuste es el más adecuado recurriremos a una representación gráfica en la que se mostrarán datos experimentales y los ajustes que se deseen comparar.

El primero de los ajustes que encontramos es uno propuesto por Boynton y Kambe (1980) que describe la discriminación en el mecanismo tritán como

$$\Delta S = 0.18 \cdot S + K \cdot S_0$$

ecuación en la que K es una constante que depende del observador y S_0 tiene un valor de 44.5 Std, y el umbral ΔS depende exclusivamente de S . Estos autores ajustaron sus datos a esta ecuación, encontrando que se adaptaban a ella bastante bien, aunque en ningún momento dan un índice de correlación o de bondad de ajuste. Además, indicaron que esta ecuación no describía la discriminación del cono S para niveles de luminancia superiores a 120 trolands.

Nosotros también ajustamos nuestros datos a esta ecuación, ya que según nuestros resultados existía una clara influencia de S sobre el umbral ΔS , obteniendo unos valores de $K_{JA} = -0.1075$ y $K_{AY} = -0.0917$ para los dos observadores y unos valores de χ^2 en ambos casos superiores a 1300, con lo que el ajuste no resulta satisfactorio, De Groot (1986). Además, con los valores negativos de K obtenidos tras el ajuste, el umbral ΔS puede resultar negativo teóricamente para algunos valores de S , lo que no tiene sentido en absoluto.

Debido a que el ajuste propuesto por Boynton y Kambe (1980) no se adapta a nuestros resultados experimentales, intentamos posteriormente otro ajuste también lineal y en el que ΔS sólo dependiese de S , obteniendo las siguientes ecuaciones para ambos observadores

$$\Delta S_{JA} = 1.661 + 0.064 \cdot S$$

$$\Delta S_{AY} = 1.695 + 0.076 \cdot S$$

siendo en estos casos los índices de correlación de $\rho_{JA}=0.655$ y $\rho_{AY}=0.572$. Los coeficientes de estas ecuaciones son muy parecidos para los dos observadores, y en principio describen bien el aumento de ΔS con la excitación de S , evitando los umbrales negativos que aparecían con el ajuste de los datos a la ecuación de Boynton y Kambe.

Como se puede ver, según estos índices de correlación, este último ajuste lineal que hemos propuesto es mejor que el primero, pero no excesivamente bueno. Esto podría achacarse al hecho de que estamos realizando experiencias de tipo psicofísico, y además, a que puedan existir otras influencias menores sobre el umbral ΔS , aparte de la influencia de S que es la más importante y clara. Estas pequeñas influencias son las que ocasionarían las irregularidades que se observan en algunas figuras y que hacen dudar, por ejemplo, de la independencia de ΔS frente a $L+M$ cuando S es constante. Esto último lo opinan también Miyahara et al. (1993), cuyos datos no son consistentes con una discriminación en el mecanismo S influenciada exclusivamente por la excitación del mismo. Incluso, Nagy et al. (1987) proponen una ecuación de la forma

$$\Delta S = A\{S + b[S_0 + d(L + M)]\}$$

en la que se indica una influencia de la luminancia $L+M$ sobre ΔS .

Con nuestros datos intentamos también un ajuste lineal añadiendo la dependencia de ΔS con $L+M$, obteniendo las siguientes ecuaciones

$$\Delta S_{JA} = 1.322 + 0.055 \cdot S + 0.016 \cdot (L + M)$$

$$\Delta S_{AY} = 0.896 + 0.051 \cdot S + 0.041 \cdot (L + M)$$

con unos índices de correlación de $\rho_{JA}=0.689$ y $\rho_{AY}=0.709$. Se ve claramente que estos índices son mejores que los que se obtuvieron con el ajuste dependiente sólo de S , con lo que parece natural esperar una influencia de la luminancia. Según los coeficientes de $L+M$, la influencia de este parámetro es algo menor que la de S , lo que queda claro a la vista de las gráficas. Además, en la ecuación se puede ver también que la influencia de la iluminación retiniana se va haciendo más importante a medida que ésta crece, lo que explicaría que el leve aumento de ΔS con $L+M$ se observe sólo en las figuras 6.1.9 y 6.1.10, en las que la iluminación retiniana alcanza los mayores valores. En cuanto a los coeficientes de S , en los dos ajustes son del mismo orden, pero por supuesto es menor cuando se supone también la influencia de $L+M$ sobre ΔS .

Otra pregunta que surgiría en este momento es la dependencia de ΔS con la excitación de $L-2M$, si realmente no existe como concluyen Boynton y Kambe (1980) y Romero et al. (1993), o si existe y es menor que la de S , (como sucede con la luminancia) y solamente tiene importancia para niveles altos de la excitación de este cono, como discutimos en el apartado 6.2.4. Por ello realizamos un nuevo ajuste de nuestros datos en función de S , $L-2M$ y $L+M$, obteniendo

$$\Delta S_{JA} = 0.053 \cdot (L - 2M) + 0.055 \cdot S + 0.019 \cdot (L + M) + 1.298$$

$$\Delta S_{AY} = 0.043 \cdot (L - 2M) + 0.051 \cdot S + 0.043 \cdot (L + M) + 0.885$$

y unos índices de correlación de $\rho_{JA}=0.731$ y $\rho_{AY}=0.726$, mejores que los de los dos ajustes anteriores en los que no aparecía el término (L-2M). En estas últimas ecuaciones vemos que los coeficientes de S son iguales que en el ajuste anterior, lo que indica que tanto si L-2M tiene influencia sobre ΔS como si no, la dependencia de este umbral con la excitación del cono S es del orden que aparece en la ecuación.

Algo más varían los coeficientes de L+M de un ajuste a otro, pero siguen con valores muy parecidos. Según éstos, la influencia de L+M sobre ΔS es mayor para el observador AY, lo que explicaría el aumento de las rectas correspondientes a este observador en las figuras 6.2.9 y 6.2.10.

En cuanto a los coeficientes de L-2M, éstos son mayores que lo que en un principio se hubiese esperado, ya que según las gráficas la influencia debía ser menor que la de S, y sin embargo los coeficientes de ambos parámetros son del mismo orden. Es en las gráficas de la figura 6.2.13 en las que aparece la mayor influencia de L-2M, debido sin duda a que en ellas se representan los mayores valores, en valor absoluto, de la excitación del canal rojo-verde. A medida que los valores de L-2M y L+M son menores, las rectas de ambos observadores van coincidiendo, ya que entonces va quedando como única influencia importante la de S, para la que los coeficientes de AY y JA son muy parecidos; incluso, las rectas se aplanan, debido a que la influencia de L-2M y L+M va desapareciendo.

Que este último ajuste se adapta mejor a los datos experimentales obtenidos se observa no sólo comparando en lo posible los índices de correlación de cada uno de ellos y la concordancia con las figuras presentadas en cada apartado, sino también en los ejemplos siguientes. En la figura 6.2.18 se representa el umbral ΔS obtenido en el laboratorio frente a

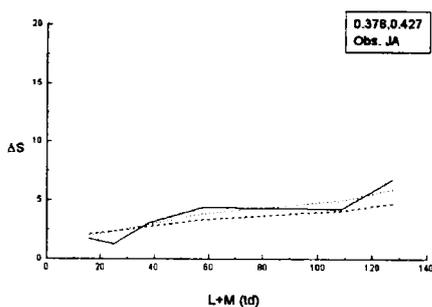
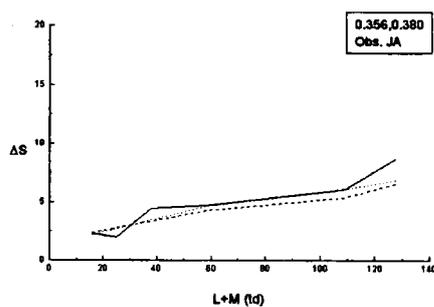


Fig. 6.2.18.- Comparación de diversos ajustes calculados con los umbrales obtenidos en el laboratorio.

— Datos experimentales.

----- Ajuste sólo dependiendo de S.

..... Ajuste dependiendo de S, L+M y L-2M.

la iluminación retiniana para dos estímulos de coordenadas 0.356,0.380 y 0.378,0.427, respectivamente, y en ellas se puede ver que la línea del ajuste final propuesto en este capítulo sigue la línea de los umbrales experimentales mejor que la línea que representa el ajuste con única dependencia de S, aunque los dos podrían considerarse buenos ajustes en estos casos, ya que la diferencia entre los índices de correlación no es muy grande.

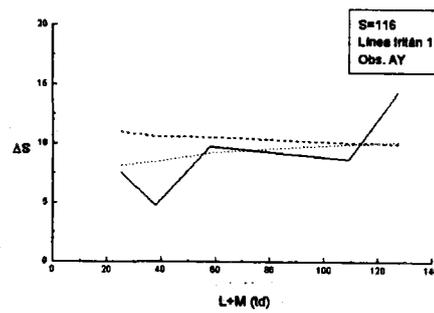


Fig. 6.2.19.- Segunda comparación de diversos ajustes calculados con los umbrales obtenidos en el laboratorio.

- ___ Datos experimentales.
- Ajuste sólo dependiendo de S.
- Ajuste dependiendo de S, L+M y L-2M.

Sin embargo, en la figura 6.2.19 se muestra un ejemplo en el que ninguno de los dos ajustes responde a los umbrales calculados en el laboratorio. No obstante, parece que el último de los calculados, o sea, el dependiente de S, L+M y L-2M, se ajusta mejor a los datos experimentales, aunque en esta última figura los umbrales calculados teóricamente son prácticamente constantes frente a L+M, lo que no es cierto según nuestros resultados.

Entonces, parece interesante buscar un nuevo ajuste de los datos en el que se refleje lo que ya comentamos al principio del apartado, es decir, que ΔS permanece casi constante frente a L+M y L-2M, y que esta constancia no está en absoluto clara cuando la excitación del cono S adquiere valores altos. El ajuste del umbral seguirá teniendo, por tanto, dependencia de L-2M, S y L+M, y además, tendrá ahora un nuevo término dependiente de $S \cdot (L-2M)$ que sólo será realmente importante para los valores altos de S. El nuevo ajuste tendrá la forma general

$$\Delta S = A \cdot (L - 2M) + B \cdot S + C \cdot (L + M) + D \cdot S \cdot (L - 2M) + K$$

que para los dos observadores será

$$\Delta S_{JA} = 0.111 \cdot (L - 2M) + 0.053 \cdot S + 0.019 \cdot (L + M) - 0.0007 \cdot S \cdot (L - 2M) + 1.379$$

$$\Delta S_{AY} = 0.198 \cdot (L - 2M) + 0.048 \cdot S + 0.043 \cdot (L + M) - 0.0018 \cdot S \cdot (L - 2M) + 1.11$$

con coeficientes de bondad de ajuste $\chi^2_{JA}=145.3028$ y $\chi^2_{AY}=211.6307$. En este nuevo ajuste se ve que la influencia de la iluminación retiniana sigue siendo la

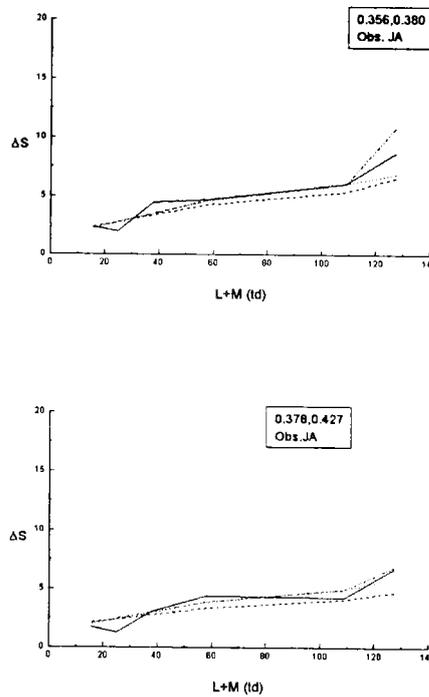


Fig. 6.2.20.- Comparación de diversos ajustes calculados con los umbrales obtenidos en el laboratorio.

- Datos experimentales.
- - - Ajuste sólo dependiendo de S .
- Ajuste dependiendo de S , $L+M$ y $L-2M$.
- . - . Ajuste dependiendo de S , $L+M$, $L-2M$ y $S \cdot (L-2M)$.

misma y que la de S se mantiene en el mismo orden. En cambio, la dependencia con L-2M ha cambiado al aparecer un nuevo término, que como se vio en las figuras anteriores, sólo influye para valores altos de S.

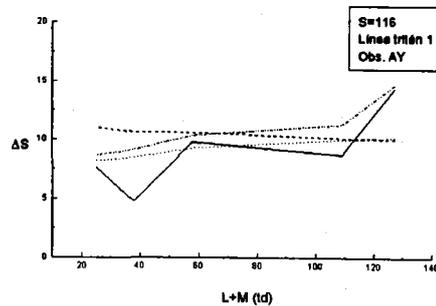


Fig. 6.2.21.- Segunda comparación de diversos ajustes calculados con los umbrales obtenidos en el laboratorio.

- Datos experimentales.
- Ajuste sólo dependiendo de S.
- Ajuste dependiendo de S, L+M y L-2M.
- .-.-. Ajuste dependiendo de S, L+M, L-2M y $S \cdot (L-2M)$.

Para comprobar la bondad de este último ajuste mostraremos los mismos tres ejemplos anteriores. En la figura 6.2.20 la diferencia entre los diferentes ajustes es pequeña, pero se observa que el último de ellos responde mejor que los anteriores al aumento de ΔS que se produce para valores de L+M mayores de 100 td.

El tercero de los ejemplos que se muestra es el de la figura 6.2.21, en la que ninguno de los ajustes calculados anteriormente se adaptaba a los datos experimentales. Como se puede ver, los umbrales teóricos obtenidos con el último ajuste son siempre mayores que los experimentales, pero a pesar de ello, la línea describe bien el aumento que se produce, como habíamos comentado, en los casos en los que S es alto.

Entonces, de acuerdo con los ajustes calculados, podemos decir que la mayor y más clara dependencia de ΔS es con la excitación del cono S, aunque también existan influencias de la iluminación retiniana L+M y de la excitación del otro canal cromático L-2M, siendo esta última mayor de lo que otros autores suponen. En cuanto a la variabilidad interobservador, parece que la mayor diferencia se encuentra en la influencia de L+M, ya que el resto de coeficientes es del mismo orden tanto para JA como para AY, aunque con sólo dos observadores no se pueda extraer conclusiones definitivas al respecto.

6.3.- Análisis y discusión del umbral de discriminación en el eje rojo-verde

Una vez que en el apartado anterior se han analizado los umbrales de discriminación en el mecanismo tritán pasaremos a continuación a analizar de forma similar los datos obtenidos en el otro canal cromático, el rojo-verde, ya que debido a la especial distribución de los estímulos en el diagrama cromático éstos también pueden agruparse teniendo en cuenta las líneas de confusión rojo-verde.

En este apartado los umbrales $\Delta(L-2M)$ se analizarán frente a diferentes parámetros. En primer lugar, se estudiarán frente a la excitación del canal L-2M manteniendo la iluminación retiniana L+M constante, para a continuación analizarlos para estímulos que tienen las mismas coordenadas de cromaticidad en el diagrama CIE1931 y diferentes luminancias, con lo que su razón $(L-2M)/S$ es la misma, y por último veremos si el umbral $\Delta(L-2M)$ varía o no frente a la excitación de S.

Finalmente y al igual que hicimos al analizar los umbrales de discriminación en el mecanismo tritán, intentaremos ajustar nuestros datos experimentales a una ecuación que describa la discriminación en este mecanismo rojo-verde.

6.3.1.- ANÁLISIS DEL UMBRAL $\Delta(L-2M)$ FRENTE A L-2M CON LUMINANCIA CONSTANTE

Para realizar este análisis hemos representado frente a L-2M los umbrales $\Delta(L-2M)$ de ternas de estímulos que se encuentran en la misma posición de las figuras 4.3, 4 y 5, es decir, que se sitúan sobre la misma línea de confusión rojo-verde. En estas líneas, como también se puede ver en esos esquemas, se mantienen constantes los valores de S y L+M. Para exponer los resultados se han agrupado en una misma figura las gráficas en las que la iluminación retiniana L+M tienen el mismo valor, y se han numerado como figuras de la 6.3.1 a la 6.3.6.

Lo primero que destaca en estas figuras es que en algunas de ellas el umbral $\Delta(L-2M)$ no alcanza un mínimo cuando $L-2M=0$ como se indica en trabajos anteriores de nuestro laboratorio, Romero et al. (1993), y también en otros como el de Krauskopf y Gegenfurtner (1992) y el de Miyahara et al (1993), aunque éstos últimos no representan L-2M y su umbral

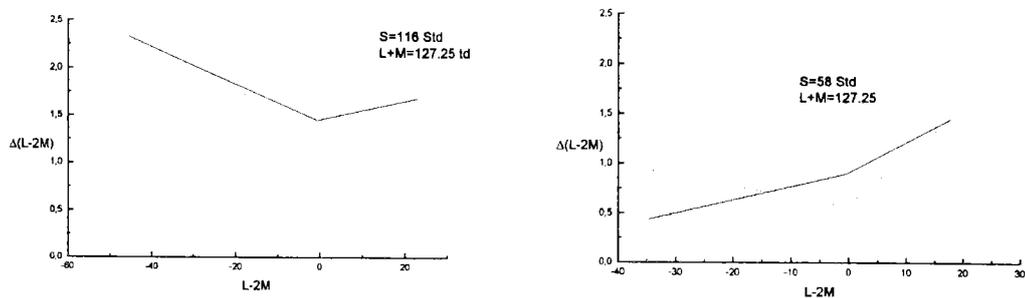


Fig. 6.3.1.- $\Delta(L-2M)$ frente a (L-2M) con luminancia constante igual a 127.25 td y diferentes valores de S (Std).

— Obs. JA, Obs. AY.

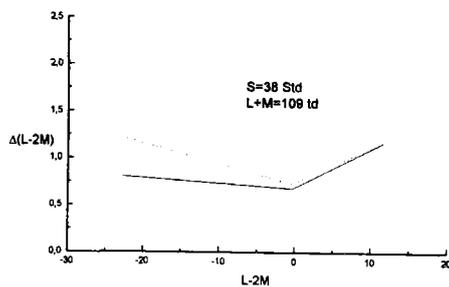
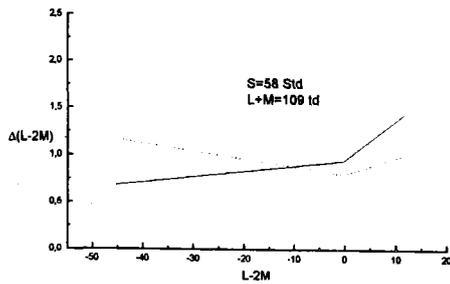
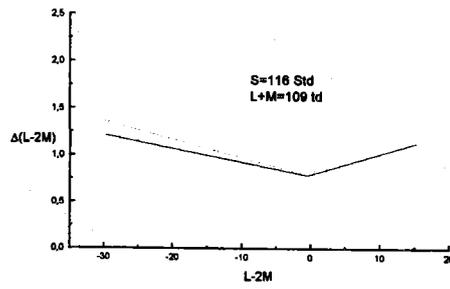


Fig. 6.3.2.- $\Delta(L-2M)$ frente a $(L-2M)$ con luminancia constante igual a 109 td y diferentes valores de S (Std).
— Obs. JA, Obs. AY.

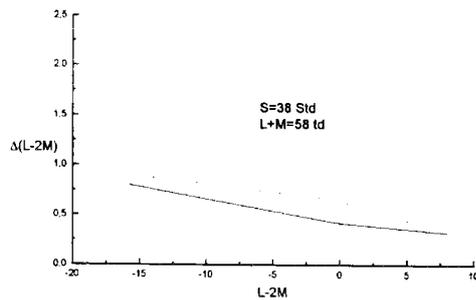
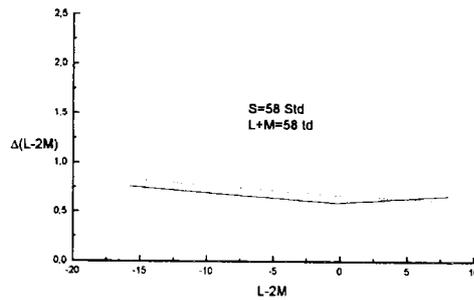
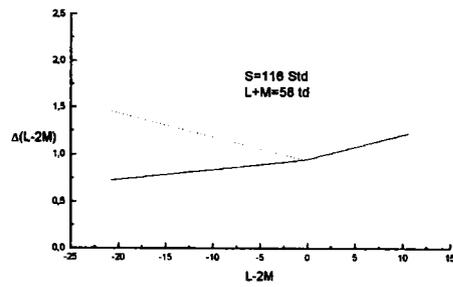


Fig. 6.3.3.- $\Delta(L-2M)$ frente a $(L-2M)$ con luminancia constante igual a 58 td y diferentes valores de S (Std).
— Obs. JA, Obs. AY.

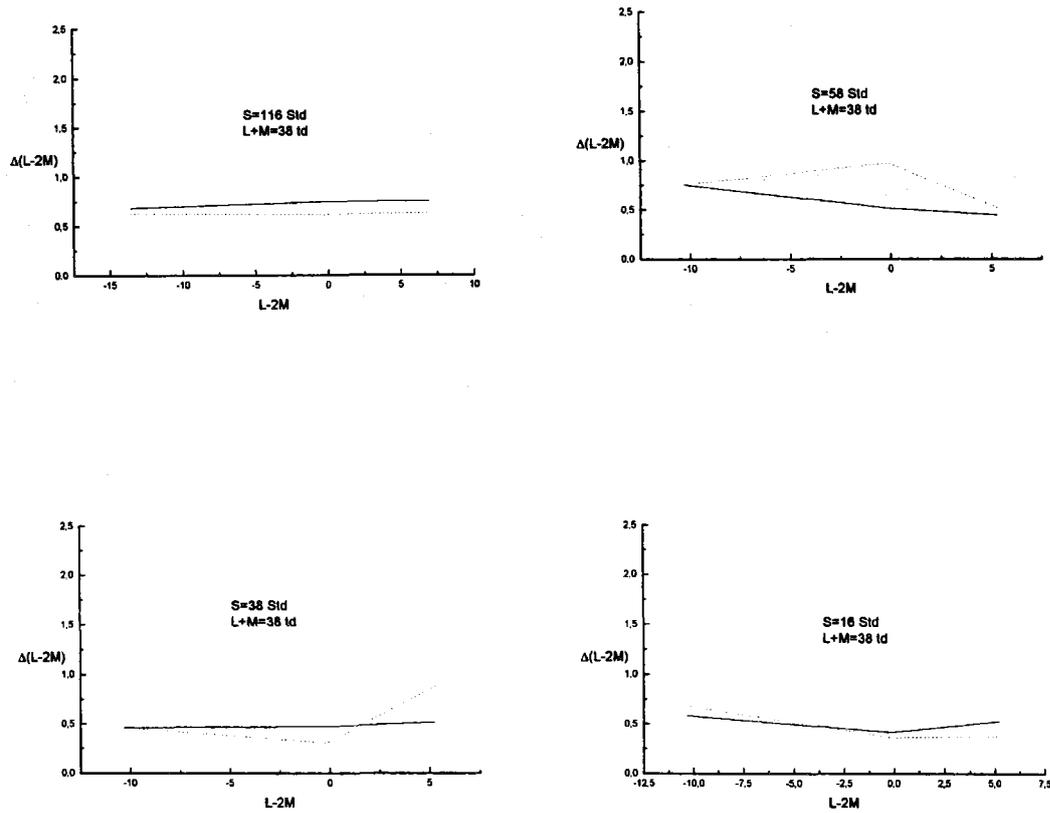


Fig. 6.3.4.- $\Delta(L-2M)$ frente a $(L-2M)$ con luminancia constante igual a 38 td y diferentes valores de S (Std).

— Obs. JA, Obs. AY.

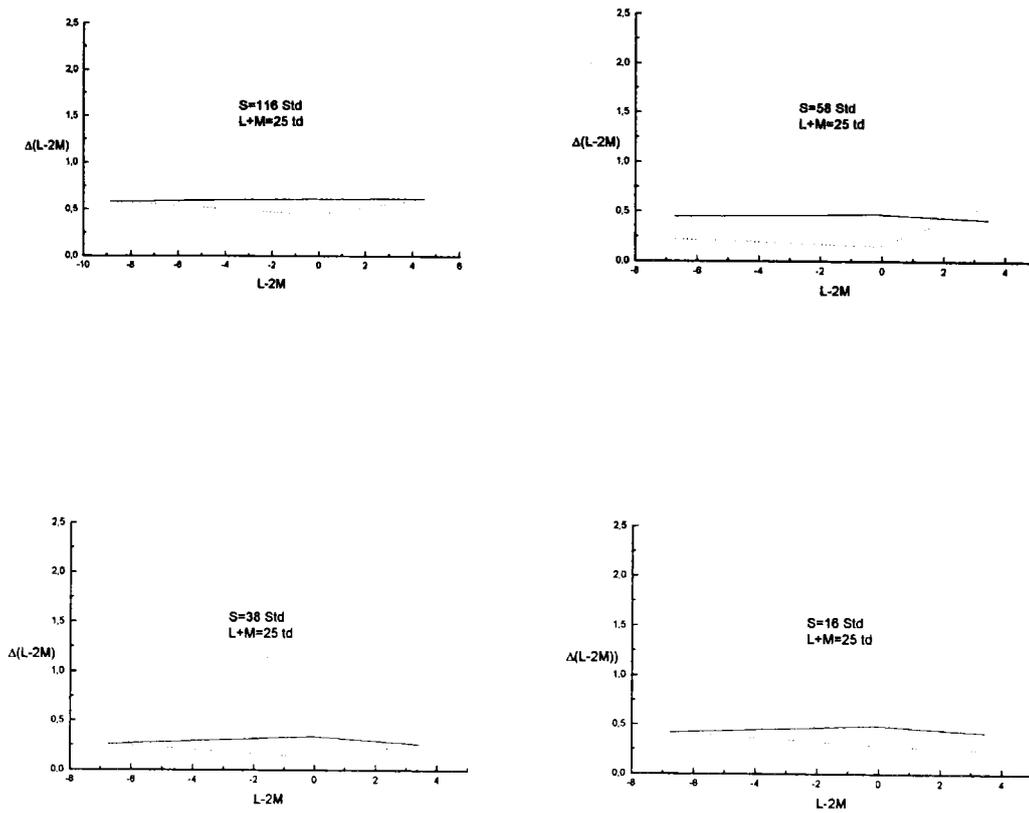


Fig. 6.3.5.- $\Delta(L-2M)$ frente a $(L-2M)$ con luminancia constante igual a 25 td y diferentes valores de S (Std).

— Obs. JA, Obs. AY.

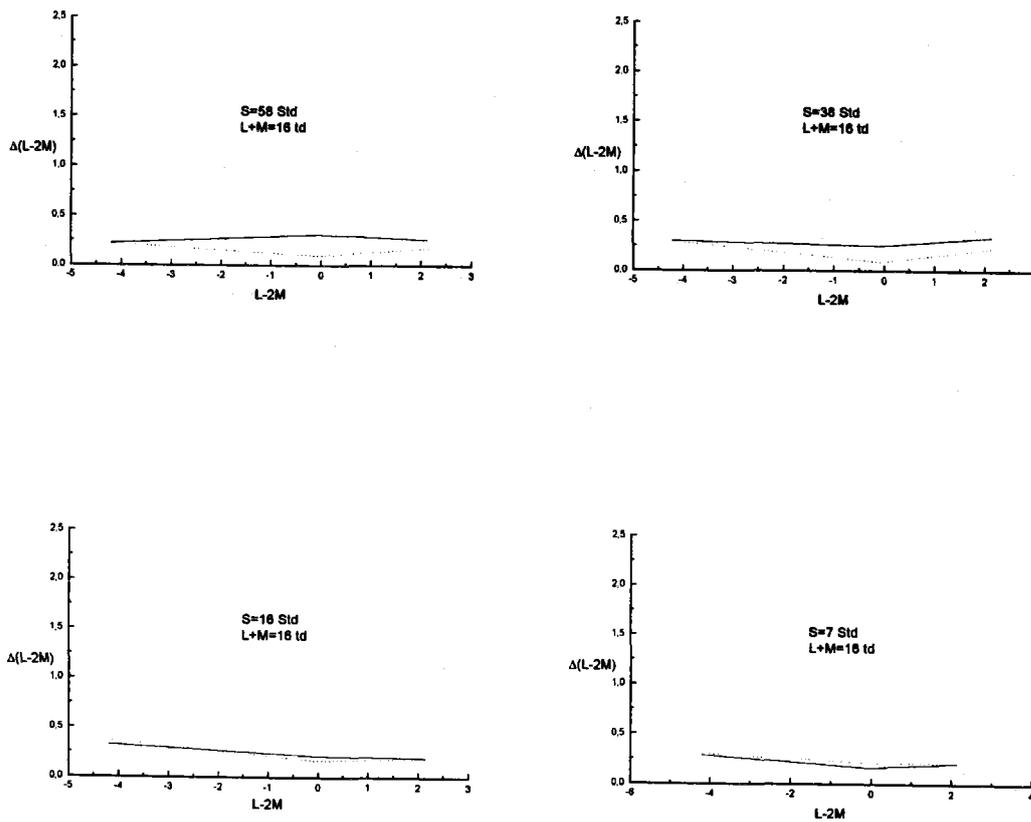


Fig. 6.3.6.- $\Delta(L-2M)$ frente a $(L-2M)$ con luminancia constante igual a 16 td y diferentes valores de S (Std).

— Obs. JA, Obs. AY.

correspondiente, sino $\Delta(L-M)$ frente a $L-M$ en el caso de Krauskopf y Gegenfurtner, y ΔL frente a L en el de Miyahara et al. En cualquier caso, en la mayoría de las gráficas se observa este mínimo, que indica que cuando el balance rojo-verde está equilibrado ($L-2M=0$) $\Delta(L-2M)$ es mínimo, y que al desequilibrarse el mecanismo tanto hacia el rojo como hacia el verde, este umbral crece.

Al comparar las diferentes figuras entre sí, es decir, los diferentes planos de iluminación retiniana constante, observamos que los umbrales $\Delta(L-2M)$ son mayores cuanto mayor es el valor de $L+M$. Pero lo que más destaca es que a medida que $L+M$ disminuye las gráficas se van haciendo más planas, hasta el punto de que en la figura 6.3.6, en la que $L+M=16$, las gráficas son prácticamente constantes y casi no se aprecia el mínimo del estímulo en el que $L-2M=0$.

Por otra parte también hay que destacar que existen algunas diferencias entre ambos observadores, sobre todo cuando $L+M$ tiene el mayor valor de 127.25 td, figura 6.3.1, caso en el que incluso la gráfica correspondiente a $S=116$ Std para el observador AY presenta un máximo en $L-2M=0$, mientras que para JA aparece un mínimo, con lo que finalmente la diferencia entre los umbrales $\Delta(L-2M)$ de ambos es grande. Sin embargo, estas diferencias tienden a desaparecer al disminuir $L+M$; por ejemplo, en la figura 6.3.6 en la que $L+M$ es 16 td, las gráficas de ambos observadores prácticamente coinciden, especialmente cuando la excitación de S es baja, 16 ó 7 Std.

Aunque la posible influencia de S sobre el umbral $\Delta(L-2M)$ la analizaremos posteriormente, comparando entre sí las gráficas de cada figura no parece que la diferencia en la excitación de S que existe entre ellas influya sobre el umbral $\Delta(L-2M)$, ya que en cada página la forma de todas las

gráficas es similar. No obstante, en algunas de las figuras, como la 6.3.3, 4 y 6, parece que al disminuir el valor de S las gráficas se hacen algo más planas y los resultados de ambos observadores tienden a parecerse más.

Por tanto, de las posibles influencias sobre $\Delta(L-2M)$, la que ha quedado más clara es la de la excitación del mecanismo L-2M y la de la iluminación retiniana L+M, que estudiaremos mejor más adelante, no siendo tan evidente la de S, que también será analizada en mayor profundidad posteriormente.

6.3.2.- ANÁLISIS DEL UMBRAL $\Delta(L-2M)$ PARA LAS MISMAS COORDENADAS DE CROMATICIDAD Y DIFERENTES ILUMINACIONES RETINIANAS

En las figuras correspondientes a este subapartado hemos representado el umbral $\Delta(L-2M)$ frente a la iluminación retiniana en trolands para estímulos con las mismas coordenadas de cromaticidad en el diagrama CIE1931 y diferentes niveles de luminancia. En cada figura, numeradas de la 6.3.7 a la 6.3.11, encontramos tres gráficas correspondientes a los tres estímulos que están en la intersección de la misma línea de confusión rojo-verde con las tres líneas tritán analizadas, de modo que la fracción $(L-2M)/S$ indica a cuál de ellas se refiere (el valor negativo corresponde a la línea 1, el cero a la línea 2 y el positivo a la 3). En valor absoluto, esa fracción también nos indica a qué grupo de estímulos corresponde la gráfica, pues el que su valor disminuya significa que nos acercamos a la zona de los azules.

En la gran mayoría de las figuras se observa un aumento de $\Delta(L-2M)$ con la iluminación retiniana L+M, salvo en la primera gráfica de la figura 6.3.7 para los dos observadores y también en la primera de la 6.3.8 para AY. En el resto, este incremento es evidente, con lo que queda clara la influencia de la iluminación retiniana sobre el umbral $\Delta(L-2M)$, tal y como se desprendía del análisis del subapartado anterior.

Comparando entre sí las diferentes figuras, vemos que el umbral $\Delta(L-2M)$ adquiere valores similares en todas ellas, aunque en las figuras de los estímulos más azules parece que estos valores son menores. Esto se debe tal vez a que cuanto más cerca de los azules está el conjunto de estímulos, menor es el valor máximo de L+M, con lo que no será tan claro el aumento de $\Delta(L-2M)$ con L+M, y parecerá que los umbrales son menores.

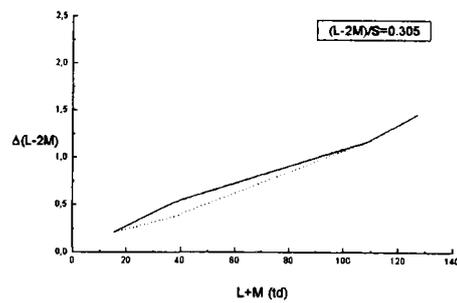
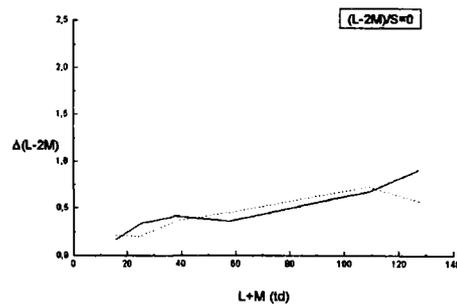
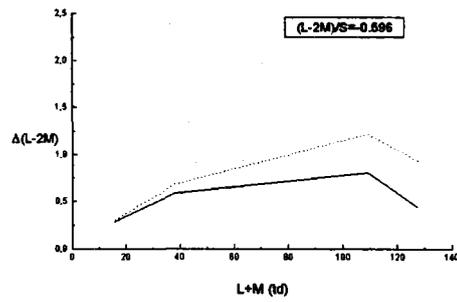


Fig. 6.3.7. a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a la iluminación retiniana (td) manteniendo constantes las coordenadas de cromaticidad.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

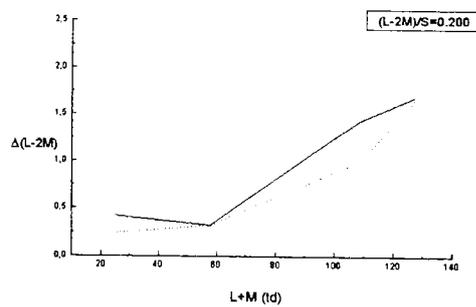
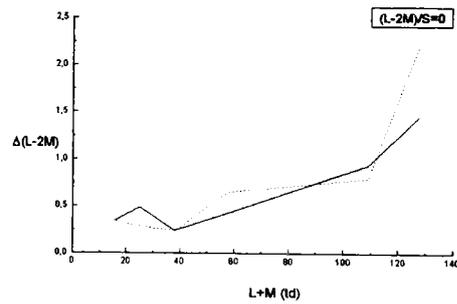
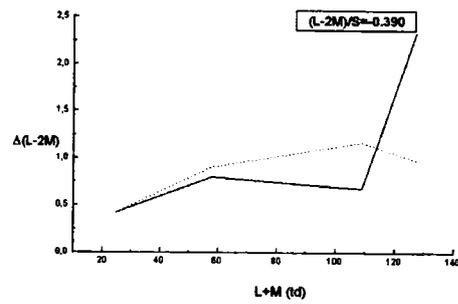


Fig. 6.3.8.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a la iluminación retiniana (td) manteniendo constantes las coordenadas de cromaticidad.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.

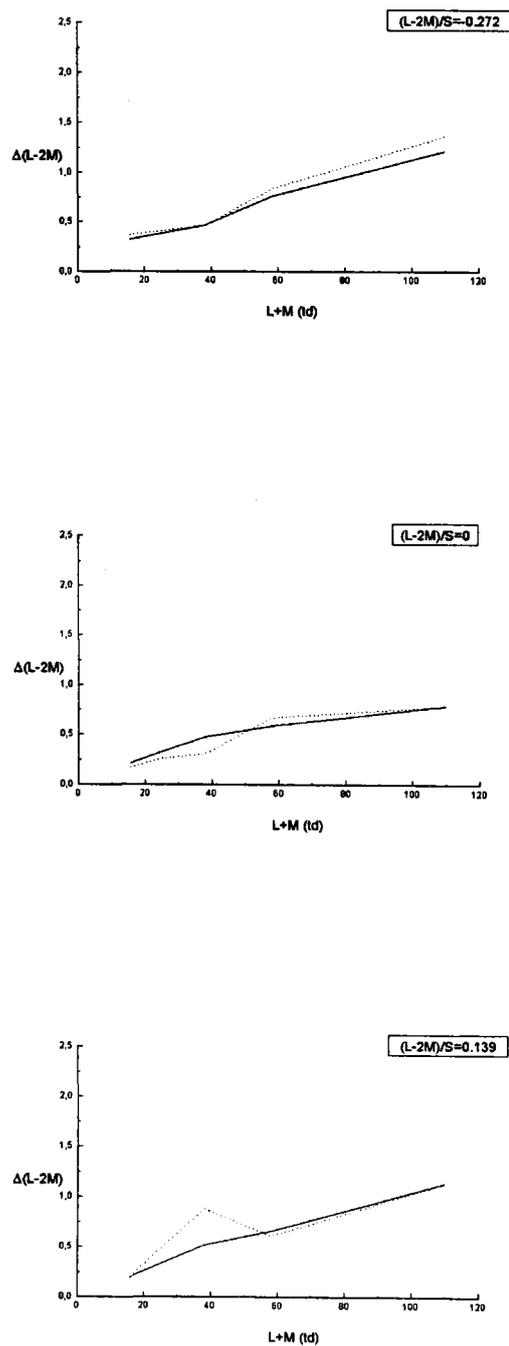


Fig. 6.3.9.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a la iluminación retiniana (td) manteniendo constantes las coordenadas de cromaticidad.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

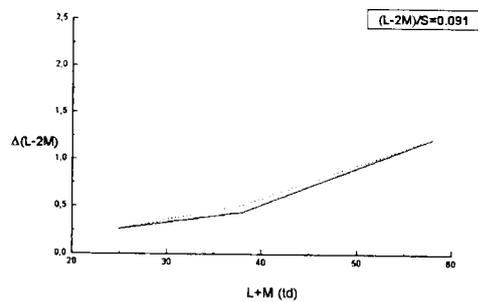
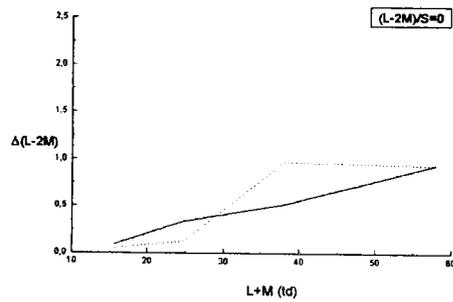
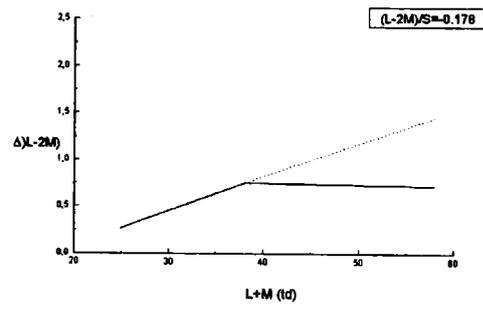


Fig. 6.3.10.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a la iluminación retiniana (td) manteniendo constantes las coordenadas de cromaticidad.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

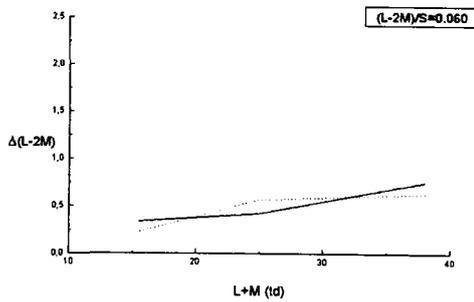
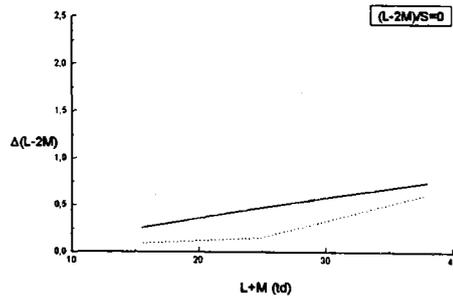
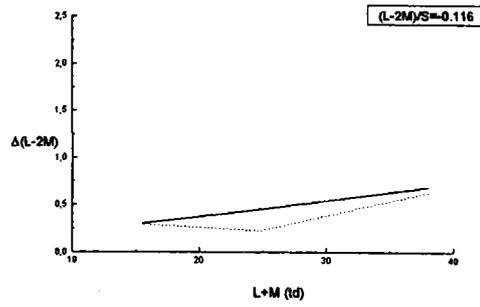


Fig. 6.3.11.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a la iluminación retiniana (td) manteniendo constantes las coordenadas de cromaticidad.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
 - b.- Línea de confusión tritán 2.
 - c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

En cuanto a los observadores, los resultados de ambos son muy parecidos, incluso en la gráfica de la figura 6.3.7 en la que no se observa el esperado aumento de $\Delta(L-2M)$ con $L+M$. Pero no sólo son resultados parecidos porque las gráficas muestren las mismas tendencias, sino también porque en muchas de ellas ambas líneas coinciden, sobre todo cuando el valor absoluto de la fracción $(L-2M)/S$ disminuye, es decir, nos acercamos a la zona de los azules. No obstante, para otros grupos de estímulos también se muestran gráficas muy parecidas, prácticamente iguales, como las de las líneas tritán 2 y 3 de la figura 6.3.7.

Si observamos ahora las tres gráficas de cada figura, entre las que la diferencia consiste en que los estímulos pertenecen a líneas tritán diferentes, no parece que el que el balance rojo-verde esté equilibrado o no influya de alguna manera sobre el umbral $\Delta(L-2M)$, ya que en cada figura las gráficas son similares en cuanto a forma y valor de los umbrales.

Al igual que ocurría cuando analizamos el umbral ΔS , esta influencia de la luminancia resulta difícil de comparar con los resultados de otros autores, ya que la mayoría de ellos realizaron sus experiencias a luminancia constante, Romero et al. (1993), Miyahara et al. (1993). También en este caso, al igual que con el umbral en el mecanismo tritán, resulta difícil saber si el aumento de $\Delta(L-2M)$ con la luminancia se debe exclusivamente a ésta última o también a $L-2M$ y a S , ya que estas dos coordenadas cambian para cada nivel de luminancia. Por eso, una vez que ya hemos visto la dependencia del umbral $\Delta(L-2M)$ con $L-2M$, el siguiente paso será ver la influencia del nivel de excitación de S sobre el umbral del mecanismo rojo-verde.

6.3.3.- ANÁLISIS DEL UMBRAL $\Delta(L-2M)$ FRENTE A S CON LUMINANCIA CONSTANTE

Después de los apartados anteriores en los que estudiamos la influencia de diferentes parámetros sobre $\Delta(L-2M)$, cabe preguntarse si además este umbral depende de alguna forma de la excitación del otro canal cromático, el S. Para ello, se exponen a continuación las figuras de la 6.3.12 a la 6.3.16, en las que se muestra $\Delta(L-2M)$ frente a S manteniendo la iluminación retiniana constante, es decir, en las líneas horizontales de las figuras 4.3, 4 y 5. En cada figura aparecen tres gráficas correspondientes a las tres líneas tritán analizadas, que están indicadas por la relación $(L-2M)/(L+M)$, que cuando es -0.272 se refiere a la línea tritán 1, si es cero a la 2, y si es 0.139 a la 3.

Lo primero que destacamos en las figuras expuestas en este subapartado es que el umbral $\Delta(L-2M)$ permanece prácticamente constante en todas ellas, sin que se observen irregularidades en las gráficas como cuando se analizó ΔS frente a L-2M en el apartado 6.2.3. Según las figuras, parece que no existe una dependencia, al menos clara, de $\Delta(L-2M)$ con S, aunque en algunos casos puede parecer que existe un ligero aumento de este umbral, como se puede ver en las figuras 6.3.13 y 6.3.14, sobre todo a partir del valor de 60 Std para la excitación del cono S. Además, no hay que olvidar que en la figura en la que la supuesta constancia de $\Delta(L-2M)$ frente a S es más clara es la 6.2.16, en la que S no supera ese valor crítico de 60 Std.

Según los diferentes autores, existen también diferentes opiniones en cuanto a la influencia de la excitación de S sobre el umbral de discriminación rojo-verde. Boynton y Kambe (1980) muestran que ΔL aumenta cuando aumenta la excitación de S, aunque el efecto sólo se ve claramente por

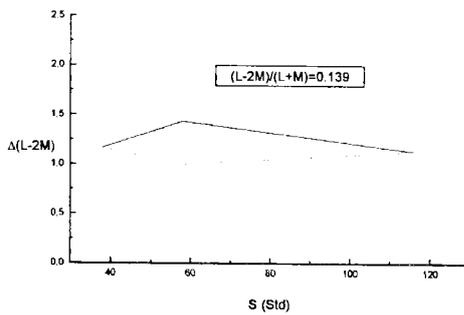
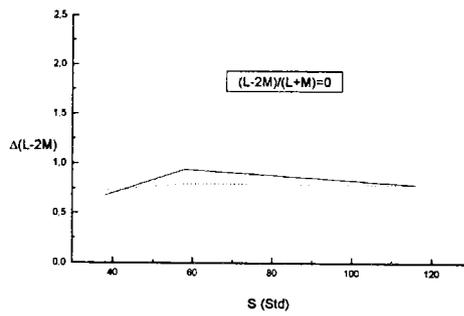
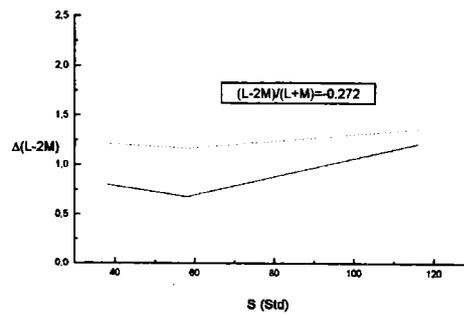


Fig. 6.3.12.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a S (Std) en planos de $L+M=109$ td.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.

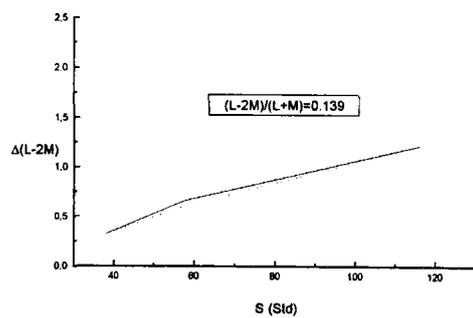
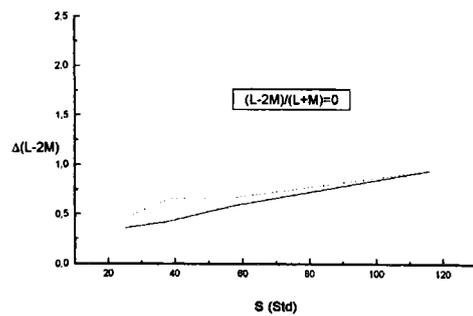
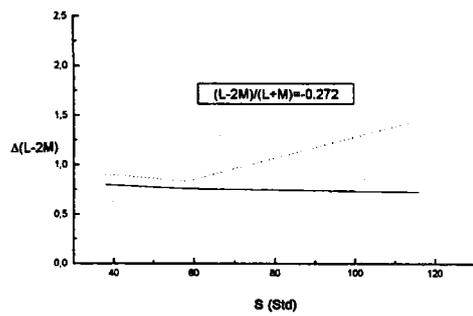


Fig. 6.3.13.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a S (Std) en planos de $L+M=58$ td.
 a.- Línea de confusión tritán 1.
 b.- Línea de confusión tritán 2.
 c.- Línea de confusión tritán 3.
 — Obs. JA, Obs. AY.

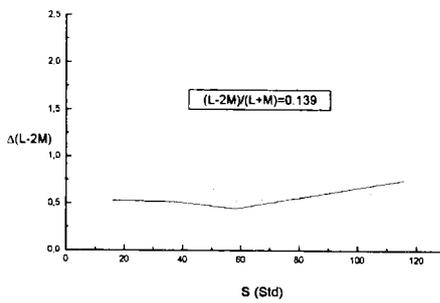
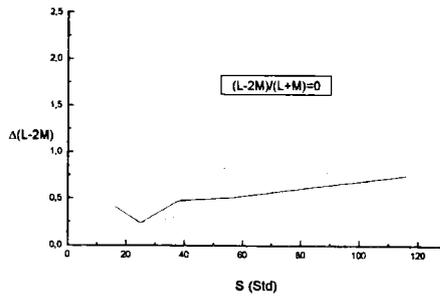
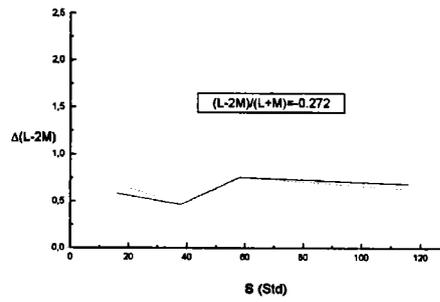


Fig. 6.3.14. a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a S (Std) en planos de $L+M=38$ td.
a.- Línea de confusión tritán 1.
b.- Línea de confusión tritán 2.
c.- Línea de confusión tritán 3.
— Obs. JA, Obs. AY.

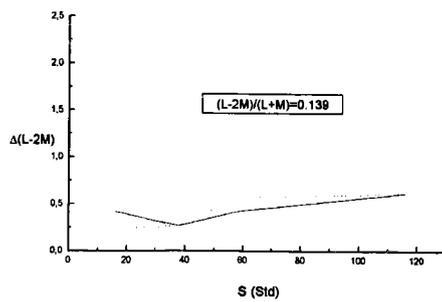
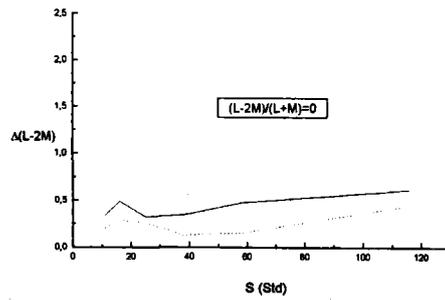
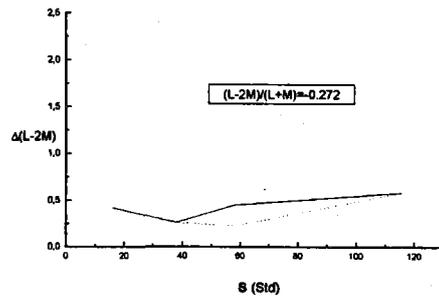


Fig. 6.3.15.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a S (Std) en planos de $L+M=25$ td.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

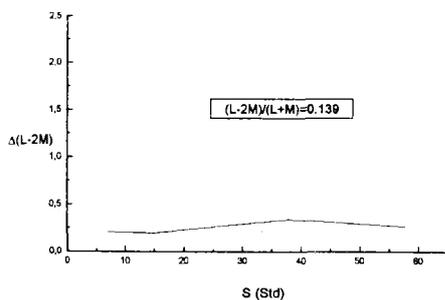
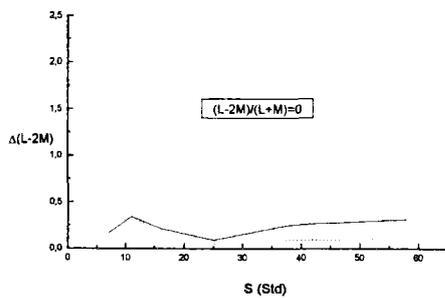
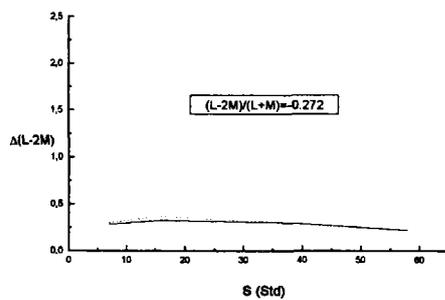


Fig. 6.3.16.a,b y c.- $\Delta(L-2M)$ frente a S (Std) en planos de $L+M=16$ td.

- a.- Línea de confusión tritán 1.
- b.- Línea de confusión tritán 2.
- c.- Línea de confusión tritán 3.
- Obs. JA, Obs. AY.

encima de 300 Std, valor que no alcanza ninguno de los estímulos analizados en nuestras experiencias. Nagy et al. (1987) y también Miyahara et al. (1993) indican, por el contrario que el nivel de excitación de S tiene un pequeño efecto o ninguno sobre la discriminación dependiente de los conos L y M. Esto último también se desprende de las experiencias de Romero et al. (1993), en las que $\Delta(L-2M)$ permanecía prácticamente constante al variar S, aunque en algunos casos concretos podía dar la impresión de que decrecía o crecía.

Comparemos ahora las diversas figuras, en las que la diferencia está en la iluminación retiniana. En primer lugar se puede observar que los umbrales $\Delta(L-2M)$ son menores con los menores valores de L+M, algo que ya se ha visto en el subapartado 6.3.2. Además, cuando la iluminación retiniana disminuye, parece que el umbral $\Delta(L-2M)$ muestra más constancia que cuando L+M es mayor.

Es también en las figuras con los menores valores de L+M en las que hay menos diferencias entre los resultados de ambos observadores. De cualquier modo, en todas las figuras los umbrales de JA y AY son muy parecidos, con la excepción de la primera gráfica de la figura 6.3.13, en la que el umbral de AY crece ostensiblemente a partir de unos 60 Std, mientras que el de JA permanece casi constante.

Lo que no parece influir sobre el umbral $\Delta(L-2M)$ es el que los estímulos estudiados estén en una línea tritán u otra, ya que si en la figura 6.3.12 parece verse que para JA el umbral $\Delta(L-2M)$ crece con S sólo cuando nos encontramos sobre la línea tritán 1, es precisamente sólo sobre esta línea en la figura 6.3.13 donde se puede apreciar constancia en el valor del umbral. Por tanto, no podemos extraer ninguna conclusión sobre la influencia del balance rojo-verde en este caso.

Por tanto, de estos resultados parece desprenderse que la excitación del cono S no tiene ninguna influencia sobre el umbral $\Delta(L-2M)$. Sin embargo, no creemos que esto se pueda afirmar con total rotundidad, ya que en algunas de las figuras mostradas, esa constancia no queda tan clara, y además, algunos autores advierten que esta influencia se empieza a detectar para valores más elevados de S, valores que en nuestras experiencias no se han alcanzado.

6.3.4.- AJUSTE DEL UMBRAL DE DISCRIMINACIÓN $\Delta(L-2M)$

Como último paso tras haber analizado las posibles influencias que puedan existir sobre el umbral $\Delta(L-2M)$, intentaremos, como hicimos con el umbral ΔS , ajustar a nuestros datos experimentales una ecuación que tenga en cuenta estas influencias y describa bien las figuras que hemos presentado en este apartado.

También aquí, tal como ocurría en la parte dedicada al umbral ΔS , expondremos diversos ajustes, algunos de los cuales se obtuvieron tras regresiones lineales y otros no lineales. Así, ante la dificultad que presenta la comparación de diferentes coeficientes de bondad de ajuste, volveremos a recurrir a gráficas con la comparación de varios ajustes y de los datos experimentales para decidir cuál de ellos se adapta mejor a nuestros resultados.

De los análisis realizados, las únicas dependencias que parecen claras a la vista de las figuras son la de $\Delta(L-2M)$ con la excitación del canal L-2M y con la iluminación retiniana L+M, mientras que parece que $\Delta(L-2M)$ se mantiene constante frente a S, aunque según algunas figuras esto no se pueda afirmar con rotundidad, sobre todo cuando L+M toma los mayores valores. Boynton y Kambe (1980) proponen en su trabajo una ecuación para describir la discriminación del cono L dependiente de los valores de L-2M y L+M, y no de S, ya que su influencia la suponen muy pequeña, como

$$\Delta L = W[(L + M) + a(L - 2M)]$$

Según estos autores, esta ecuación se ajusta bien a sus resultados, pero no dan ningún coeficiente de bondad de ajuste.

Para comprobar si esta ecuación también describía nuestros datos, los ajustamos a ella. A pesar de haber representado en todo momento $\Delta(L-2M)$, a la hora de realizar ajustes y dar ejemplos de su bondad utilizamos ΔL , ya que este cambio nos permitía comparar los resultados que se iban obteniendo con los de Boynton y Kambe. Entonces, las ecuaciones que se obtienen según la propuesta de estos autores, con las únicas dependencias de ΔL con $L+M$ y $L-2M$, son, para ambos observadores

$$\Delta L_{JA} = 0.0033[(L + M) - 0.3101(L - 2M)] = 0.0033(L + M) - 0.0010(L - 2M)$$

$$\Delta L_{AY} = 0.0036[(L + M) + 0.0951(L - 2M)] = 0.0036(L + M) + 0.0003(L - 2M)$$

con unos coeficientes de bondad de ajuste de $\chi_{JA}^2=0.546$ y $\chi_{AY}^2=0.466$. En las ecuaciones destaca sobre todo el que los coeficientes de $L-2M$ sean de signo contrario para cada observador, pero esto carece de cierta importancia al ser valores muy pequeños. El que los coeficientes de $L+M$ sean bastante mayores que los de $L-2M$ refleja que la iluminación retiniana influye mucho más sobre el umbral ΔL , lo que se ve comparando el grupo de figuras de la 6.3.1 a la 6.3.6 con el grupo de la 6.3.7 a la 6.3.11.

El siguiente ajuste que nos planteamos es parecido al anterior, con la diferencia de que además de la influencia de $L+M$ y $L-2M$ aparece un término independiente característico de cada observador. Las ecuaciones que se obtuvieron fueron

$$\Delta L_{JA} = 0.0692 + 0.0024(L + M) - 0.0011(L - 2M)$$

$$\Delta L_{AY} = 0.0442 + 0.0030(L + M) + 0.0003(L - 2M)$$

con índices de correlación $\rho_{JA}=0.593$ y $\rho_{AY}=0.695$. En este nuevo ajuste los coeficientes de $L-2M$ se mantienen iguales, y sólo los de $L+M$ varían algo, pero no mucho, con la aparición del término independiente.

Los índices de correlación obtenidos para el anterior ajuste no son excesivamente buenos, por lo que según esto y las figuras analizadas podríamos plantearnos si además de las claras dependencias de ΔL con $L+M$ y $L-2M$ existe alguna otra más no tan importante como las anteriores. Ya Boynton y Kambe (1980) indicaron que la influencia de S sobre ΔL , si existía, era muy pequeña, por lo que en la ecuación propuesta en principio este término no aparecía. Ellos mismos añadieron a su ecuación un nuevo término de la forma $+jS$, con j de valor muy pequeño. Entonces, la ecuación de Boynton y Kambe quedaría como

$$\Delta L = W[(L + M) + a(L - 2M) + jS]$$

En nuestros datos no se puede encontrar una influencia clara de S sobre $\Delta(L-2M)$, pero ya indicamos en su momento que en algunas figuras parecía intuirse un pequeño aumento del umbral al aumentar la excitación del cono S , sobre todo cuando $L+M$ tenía un valor de 60 td. Por ello, volvimos a ajustar nuestros datos experimentales a la ecuación propuesta por Boynton y Kambe en la que suponen una influencia muy pequeña de S , obteniendo las expresiones

$$\Delta L_{JA} = 0.0023(L + M) - 0.0011(L - 2M) + 0.0012S$$

$$\Delta L_{AY} = 0.0028(L + M) + 0.0003(L - 2M) + 0.0009S$$

esta vez con coeficientes de bondad de ajuste de $\chi_{JA}^2=0.440$ y $\chi_{AY}^2=0.400$, que al ser menores que los obtenidos en el primero de los ajustes, indican que el nuevo es mejor que el primero que se hizo sin tener en cuenta la influencia de S . En estas nuevas ecuaciones se ve que la dependencia de ΔL con $L+M$ no ha variado, al igual que ocurre con la referente a $L-2M$. La mejora en cuanto a los coeficientes de bondad de ajuste nos lleva a pensar que

efectivamente existe esa influencia de S sobre ΔL , aunque no es tan pequeña como en un principio pensaron Boynton y Kambe, ya que los coeficientes correspondientes son del orden del que acompaña a L-2M en el caso de JA, e incluso mayor en el de AY. De cualquier modo, la ecuación explicaría que el leve aumento de $\Delta(L-2M)$ con S se note cuando la excitación de este cono alcanza ciertos valores, en nuestro caso unos 60 Std.

Como hicimos también al principio del apartado, intentamos ahora efectuar un nuevo ajuste añadiendo un término independiente diferente para cada observador y conservando la dependencia del umbral con L-2M, L+M y S. El resultado con nuestros datos experimentales fue

$$\Delta L_{JA} = 0.0476 + 0.0020(L + M) - 0.0011(L - 2M) + 0.0008S$$

$$\Delta L_{AY} = 0.0244 + 0.0027(L + M) + 0.0003(L - 2M) + 0.0007S$$

con índices de correlación de $\rho_{JA}=0.627$ y $\rho_{AY}=0.717$, claramente mejor que los anteriores. Las influencias de los diferentes parámetros son similares a las de todos los ajustes realizados, con la diferencia de que en este caso los coeficientes para ambos observadores son muy parecidos, salvo en el caso de la dependencia con L-2M. Todavía se puede ver que la influencia de S no es realmente tan pequeña como en un principio era de esperar.

De los ajustes realizados parece desprenderse una cierta dependencia del umbral ΔL con la excitación del cono S, aunque muy pequeña ya que no aparece de modo claro en las figuras. Por tanto, intentaremos un nuevo ajuste en el que la dependencia de ΔL con S sea de tipo logarítmico, con lo que esta influencia se vería disminuida. La forma general de este nuevo ajuste es

$$\Delta L = A \log S + B(L - 2M) + C(L + M) + K$$

a la que ajustamos nuestros datos, obteniendo

$$\Delta L_{JA} = 0.0763 \log S - 0.0011(L - 2M) + 0.0021(L + M) - 0.0357$$

$$\Delta L_{AY} = 0.0635 \log S + 0.0003(L - 2M) + 0.0027(L + M) - 0.0439$$

con coeficientes de bondad de ajuste de $\chi_{JA}^2=0.407$ y $\chi_{AY}^2=0.398$, los mejores de todos los ajustes ensayados. En estas últimas ecuaciones se sigue observando que las mayores diferencias entre ambos observadores está en la influencia de L-2M y aparecen para altos valores de la excitación de este canal, como se puede ver, por ejemplo, en la primera de las gráficas de la figura 6.3.1. Con la dependencia logarítmica para S, la influencia de este canal queda disminuida, lo que hace que este ajuste sea el que más se adapta a los datos experimentales.

Ya comentamos anteriormente que resulta difícil comparar los diferentes ajustes debido a que en algunos casos tenemos como coeficiente de bondad de ajuste el índice χ^2 y en otros el índice de correlación ρ . Por otra parte, comparando en lo posible los índices obtenidos, podemos decir si uno es mejor que otro, pero es difícil decir si el mejor de ellos se ajusta aceptablemente a los resultados experimentales. Por ello, para comprobar la bondad del último de los ajustes presentamos las gráficas de la figura 6.3.17, en las que se han representado los umbrales ΔL obtenidos experimentalmente, los previstos por la ecuación de Boynton y Kambe y los previstos por nuestro último ajuste frente a la iluminación retiniana L+M. En la primera de las gráficas se mantienen constantes las coordenadas de cromaticidad de los estímulos, y en las otras dos lo que permanece invariante es la excitación de S. En los tres ejemplos se puede comprobar que los valores obtenidos mediante ambos ajustes son similares a los experimentales y que los correspondientes al ajuste de Boynton y Kambe proporcionan

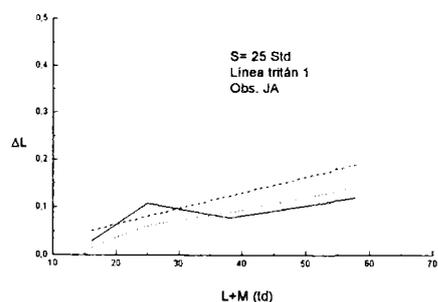
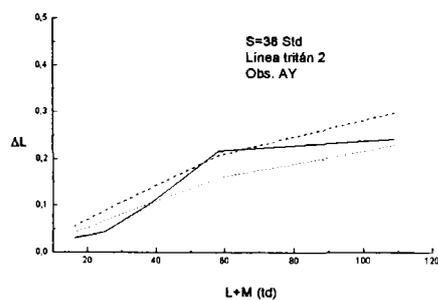
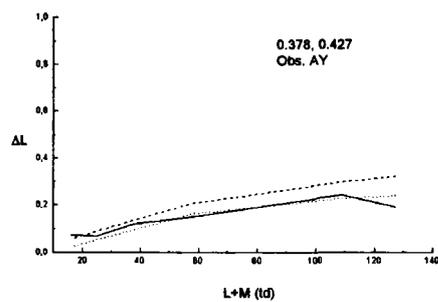


Fig. 6.3.17.- Comparación de diversos ajustes calculados con los umbrales obtenidos en el laboratorio.

- Datos experimentales.
- Ajuste propuesto por Boynton y Kambe (1980).
- Ajuste logarítmico dependiente de L-2M, S y L+M.

valores mayores que el ajuste con dependencia logarítmica. A pesar de esta similitud entre valores, parece que es el último ajuste de los propuestos el que mejor se adapta a los resultados experimentales, como también se desprende de la comparación de coeficientes de bondad de ajuste.

Por tanto, según los ajustes realizados y las figuras analizadas a lo largo de este apartado, podemos concluir que el umbral ΔL depende en su mayor parte de la iluminación retiniana L+M y de la excitación del canal L-2M. Sin embargo, no es tan importante la influencia de la excitación del cono S sobre este umbral. Esta influencia es muy pequeña, como se desprende de la casi constancia de las rectas correspondientes a este análisis y de los pequeños coeficientes que acompañaban a S en los ajustes, pero algo más importante de lo que diversos autores han supuesto.



Capítulo 7: Conclusiones y Aportaciones

7.- CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Las principales conclusiones y aportaciones que se derivan de esta memoria pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

1.- Se ha realizado una extensa revisión de la bibliografía referente a modelos de visión del color y discriminación cromática, especialmente de aquellos trabajos cuyos resultados han sido interpretados en espacios de excitación de conos y han colaborado a un mejor conocimiento del sistema visual humano en cuanto a la visión del color.

2.- Se han efectuado diversos cambios en un dispositivo experimental, que había sido utilizado anteriormente en nuestro laboratorio, para adecuarlo a nuestros objetivos. Algunos de los cambios más importantes son eliminar una de las cavidades integradoras y reducir el tamaño de la restante para conseguir niveles de luminancia más elevados que los de trabajos previos, y la introducción de una pupila artificial que permite tener controlada en todo momento la iluminación retiniana de los estímulos y de un campo circundante para el control de la adaptación.

3.- Se han comparado cuatro métodos experimentales diferentes obteniendo con ellos el umbral de un estímulo acromático para cinco observadores. Se encuentra que el método basado en la presentación aleatoria de estímulos situados en el diagrama cromático sobre una misma línea aporta mayor fiabilidad y reproducibilidad de las medidas. En consecuencia se eligió este método para el resto de las experiencias llevadas a cabo en este trabajo de doctorado.

4.- Para calcular los umbrales de discriminación cromática se han elegido 66 estímulos situados sobre tres líneas de confusión tritán, una de ellas con el canal rojo-verde equilibrado y las otras dos con este mecanismo desequilibrado hacia el rojo y hacia el verde, respectivamente. Las coordenadas de los estímulos son tales que éstos se pueden agrupar en conjuntos con las mismas coordenadas de cromaticidad y diferentes luminancias, la misma luminancia y diferente coordenadas de cromaticidad, y diferentes coordenadas y luminancia pero la misma excitación del cono S, lo que permite abordar un estudio exhaustivo de la discriminación cromática en los distintos mecanismos de la visión del color.

5.- Cuando analizamos planos de luminancia constante en el diagrama CIE1931, las elipses obtenidas tienden a orientar su semieje mayor sobre la línea de confusión tritán correspondiente, lo que indica una peor discriminación en el eje amarillo-azul que en el rojo-verde. Las elipses que más se apartan de la línea tritán son las correspondientes a estímulos sobre las líneas 1 y 3, en las que el balance rojo-verde está desequilibrado.

6.- Las elipses más elongadas son las situadas en la zona de los azules. Se puede deducir de ello que un alto contenido en azul de los estímulos implica una acusada disminución en la capacidad de discriminación

del mecanismo tritán. También son estas elipses las de menor tamaño, lo que se debe fundamentalmente a las propias características de definición del diagrama CIE1931.

7.- Los resultados obtenidos en planos de luminancia constante del espacio CIE1931 coinciden en sus características generales con los de otros autores a pesar de emplear diferentes métodos experimentales y niveles de luminancia.

8.- Al comparar las elipses de estímulos con las mismas coordenadas de cromaticidad y distintos niveles de luminancia, observamos que las elipses toman una orientación próxima a la línea de confusión tritán, aunque no parece existir una relación entre la orientación y el valor de la luminancia. La relación de semiejes de estas elipses toma valores muy diferentes, pero generalmente por debajo de 0.50, lo que significa elipses más elongadas que las de otros autores. Tampoco parece haber una relación clara entre la relación de semiejes y la luminancia, aunque se puede observar que generalmente las elipses se hacen algo más elongadas a medida que la luminancia baja.

9.- El único parámetro sobre el que parece influir claramente la luminancia es el área de las elipses, ya que ésta disminuye, lo que significa que la capacidad de discriminación mejora, al aumentar el nivel de luminancia. Este efecto se observa para luminancias menores de 6 cd/m^2 , mientras que para niveles mayores el área de las elipses de discriminación es prácticamente constante.

10.- El método experimental elegido nos ha permitido calcular el umbral de discriminación en un determinado mecanismo en los dos sentidos, excitación y desexcitación, ante la posibilidad de que éstos fuesen distintos.

Sin embargo, tras analizarlos detenidamente llegamos a la conclusión de que no se puede asegurar que para un determinado estímulo el umbral sea mayor en un sentido que en otro, por lo que consideramos adecuado tomar como umbral de discriminación el valor medio de los dos obtenidos.

11.- Al analizar los umbrales de discriminación obtenidos en el mecanismo tritán observamos que estos umbrales, ΔS , dependen claramente del valor de S de los estímulos, mientras que se mantienen casi constantes frente a la iluminación retiniana L+M. Cuando se analizó ΔS frente a la excitación del canal L-2M se observó que ésta no tenía prácticamente ninguna influencia sobre el umbral, lo que está de acuerdo con lo indicado por otros autores. Sin embargo, según nuestros resultados no está tan clara esta independencia de ΔS frente a L-2M cuando los valores de S son más elevados.

12.- Se realizó un ajuste de los datos experimentales obtenidos para ΔS teniendo en cuenta las influencias que se habían observado anteriormente. El mejor de los ajustes conseguido, para los dos observadores, es

$$\Delta S_{JA} = 0.111 \cdot (L - 2M) + 0.053 \cdot S + 0.019 \cdot (L + M) - 0.0007 \cdot S \cdot (L - 2M) + 1.379$$

$$\Delta S_{AY} = 0.198 \cdot (L - 2M) + 0.048 \cdot S + 0.043 \cdot (L + M) - 0.0018 \cdot S \cdot (L - 2M) + 1.11$$

en los que el umbral ΔS depende de S y L+M, y la dependencia con L-2M existe pero sólo es importante cuando el valor de S aumenta.

13.- Al analizar las influencias sobre el umbral del mecanismo rojo-verde se observó que sobre este umbral, $\Delta(L-2M)$, influía claramente la excitación del canal L-2M y el nivel de iluminación retiniana L+M. Sin embargo, $\Delta(L-2M)$ permanece casi constante frente a S, aunque en algunos

casos se observa un ligero aumento del umbral al aumentar S, lo que estaría de acuerdo con algunos autores que opinan que esta influencia existe pero sólo para valores elevados de S. Por tanto, no se puede afirmar con rotundidad que $\Delta(L-2M)$ no dependa de S como defienden otros autores.

14.- Se ajustaron los valores obtenidos experimentalmente de los umbrales ΔL según las influencias analizadas, y el que mejor resultado ofrecía, para ambos observadores, era

$$\Delta L_{JA} = 0.0763 \log S - 0.0011 \cdot (L - 2M) + 0.0021 \cdot (L + M) - 0.0357$$

$$\Delta L_{AY} = 0.0635 \log S + 0.0003 \cdot (L - 2M) + 0.0027 \cdot (L + M) - 0.0439$$

un ajuste suficientemente bueno dependiente del logaritmo de la excitación de S, de la excitación del canal L-2M y de la iluminación retiniana.

Los resultados obtenidos en este trabajo y las conclusiones que de ellos se extraen nos animan a continuar en esta línea de investigación, profundizando en el análisis de los datos ya obtenidos, por ejemplo estudiándolos cuando la excitación de los dos canales cromáticos cambia simultáneamente, o bien obteniendo nuevas medidas (diferentes campos circundantes, mayores valores de excitación de S, etc.) que permitan mejorar los conocimientos que hasta ahora se tienen sobre los mecanismos de visión del color.



Capítulo 8: Bibliografía

8.- BIBLIOGRAFÍA

- BOYNTON, R.M.: "Spatial and temporal approaches for studying color vision", *Colour Vision Deficiencies VI Doc. Ophthalmol., Proc. Ser. 33*, The Hague: Junk (1982).
- BOYNTON, R.M.: "A system of photometry and colorimetry based on cone excitations", *Color Res. & Appl.*, **11**, 244-252 (1986).
- BOYNTON, R.M.: "History and current status of a physiologically based system of photometry and colorimetry", *J. Opt. Soc. Am. A*, **13**, 1609-1621 (1996).
- BOYNTON, R.M., SCHAFFER, W., NEUN, M.E.: "Hue-wave-length relation measured by color-naming method for three retinal locations", *Science*, **146**, 666-668 (1964).

-
- BOYNTON, R.M., KAMBE, N.: "Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes", *Color Res. & Appl.*, **5**, 13-23 (1980).
- BOYNTON, R.M., NAGY, A.L., OLSON, C.X.: "A flaw in equations for predicting chromatic differences", *Color Res. & Appl.*, **8**, 69-74 (1983).
- BOYNTON, R.M., NAGY, A.L., ESKEW, R.T. Jr.: "Similarity of normalized discrimination ellipses in the constant-luminance chromaticity plane", *Perception*, **15**, 755-763 (1986).
- BRAINARD, D.H.: "Calibration of a computer controlled color monitor", *Color Res. & Appl.*, **14**, 23-34 (1989).
- BROWN, W.R.J.: "The influence of luminance level on visual sensitivities to color differences", *J. Opt. Soc. Am.*, **41**, 684-688 (1951).
- BROWN, W.R.J.: "The effect of field size and chromatic surroundings on color discrimination", *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 837-844 (1952).
- BROWN, W.R.J.: "Color discrimination of twelve observers", *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 137-143 (1957).
- BROWN, W.R.J., MACADAM, D.L.: "Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences", *J. Opt. Soc. Am.*, **39**, 808-834 (1949).
- BURNS, S.A., ELSNER, A.E.: "Color matching at high luminances: the color-match-area effect and photopigment bleaching", *J. Opt. Soc. Am. A*, **2**, 698-704 (1985).

- COWAN, W.B., ROWELL, N.: "On the gun independence and phosphor constancy of colour video monitors", *Color Res. & Appl.*, **11**, 533-538 (1986).
- CRAWFORD, B.H.: "The dependence of pupil size upon external light stimuli under static and variable conditions", *Proc. Roy. Soc. London*, **B121** (823), 376-395 (1936).
- DE GROOT, M.H.: **Probability and Statistics**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1986).
- DERRINGTON, A.M., KRAUSKOPF, J., LENNIE, P.: "Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque", *J. Physiol. (London)*, **357**, 241-265 (1984).
- DÍAZ, J.A., JIMÉNEZ, J.R., HITA, E., JIMÉNEZ DEL BARCO, L.: "Optimizing the constant-channel chromaticity and color gamut of CRT color displays by control of brightness and contrast level", *Appl. Optics*, **35**, 1711-1718 (1996).
- DUPONT-HENIUS, G.: "Differential color perception thresholds", *Proc. AIC Color 77*, New York, 492-494 (1977).
- EISNER, A., MacLEOD, D.I.A.: "Blue-sensitive cones do not contribute to luminance", *J. Opt. Soc. Am.*, **70**, 121-123 (1980).
- FINKELSTEIN, M.A.: "Spatial sensitization and adaptation in a long-wavelength cone pathway", *Color Res. & Appl.*, **18**, 89-97 (1993).

FLAMANT, F.: "Variation du diamètre de la pupille de l'oeil en fonction de la brillance", *Rev. Opt.*, **27**, 751-758 (1948).

FRY, G.A.: "A photo-receptor mechanism for the modulation theory of color vision", *J. Opt. Soc. Am.*, **25**, 361-367 (1935).

GARCÍA, J.A., ROMERO, J., GARCÍA-BELTRÁN, A., JIMÉNEZ, J.R.: "Interobserver variability of chromaticity discrimination and color representation spaces", *Journal of Optics*, **24**, 65-69 (1993-a).

GARCÍA, J.A., ROMERO, J., YEBRA, A., HITA, E.: "Influencia del tamaño del campo en el umbral de discriminación de color", *Opt. Pur. Apl.*, **26**, 507-516 (1993-b).

GEISLER, W.S.: "Visual adaptation and inhibition", *Ph. D. dissertation, University Microfilm, n° 76-2816, 137*, Indiana University, Bloomington, Ind. (1975).

GEISLER, W.S.: "Effects of bleaching and backgrounds on the flash response of the cone system", *J. Physiol. (London)*, **312**, 413-434 (1981).

GUTH, S.L.: "Model for color vision and light adaptation", *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, 976-993 (1991).

GUTH, S.L., DONLEY, N.J., MARROCCO, R.T.: "On luminance additivity and related topics", *Vis. Res.*, **9**, 537-575 (1969).

GUTH, S.L., MASSOF, R.W., BENZSCHAWEL, T.: "Vector model for normal and dichromatic color vision", *J. Opt. Soc. Am.*, **70**, 197-212 (1980).

-
- HAYHOE, M.M., BENIMOFF, N.I., HOOD, D.C.: "The time-course of multiplicative and subtractive adaptation process", *Vis. Res.*, **27**, 1981-1996 (1987).
- HELMHOLTZ, H. von: **Handbuch der physiologischen Optik**, 1ª Ed., Leipzig: Voss (1866).
- HITA, E., JIMÉNEZ, E., ÁLVAREZ-CLARO, M.: "Color discrimination from isomeric matching and different types of primaries fusion", *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **34**, 718-727 (1979).
- HITA, E., JIMÉNEZ DEL BARCO, L., MARTÍNEZ, R., JIMÉNEZ, E.: "Variación de los umbrales diferenciales de luminancia con el tiempo de exposición", *Opt. Pur. Apl.*, **13**, 91-96 (1980-a).
- HITA, E., JIMÉNEZ, E.: "Differential thresholds of color from isomeric matching", *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **35**, 511-526 (1980-b).
- HITA, E., ROMERO, J.: "Análisis de la influencia de las condiciones de observación en los procesos de discriminación en color", *Opt. Pur. Apl.*, **14**, 11-17 (1981).
- HITA, E., ROMERO, J., JIMÉNEZ DEL BARCO, L., MARTÍNEZ, R.: "Temporal aspects of color discrimination", *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 578-582 (1982-a).
- HITA, E., GONZÁLEZ-CABALLERO, F., CERVANTES, A.: "On the geometric structure of color discrimination thresholds", *Die Farbe*, **30**, 55-64 (1982-b).

HITA, E., JIMÉNEZ DEL BARCO, L., ROMERO, J.: "Differential color thresholds from metameric matches: experimental results concerning failures of colorimetric additivity", *J. Opt. Soc. Am. A*, **3**, 1203-1209 (1986).

HURVICH, L.M., JAMESON, D.: "An opponent-process theory of color vision", *Psych. Rev.*, **64**, 384-404 (1957).

JAMESON, D., 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).

JIMÉNEZ DEL BARCO, L., HITA, E., ROMERO, J., VIDA, J.: "Color prediction discrepancies and differential chromaticity thresholds with photopigment bleaching", *J. Opt. Soc. Am. A*, **5**, 432-437 (1988).

JIMÉNEZ DEL BARCO, L., HITA, E., JIMÉNEZ, J.R., ROMERO, J.: "Differential color thresholds and new results on failures of chromaticity and luminance prediction", *J. Optics*, **25**, 81-92 (1994).

JIMÉNEZ DEL BARCO, L., DÍAZ, J.A., JIMÉNEZ, J.R., RUBIÑO, M.: "Considerations on the calibration of crt color displays assuming constant channel chromaticity", *Color Res. & Appl.*, **20**, 377-387 (1995).

JUAN, J.: "Variación de la transmitancia espectral y del color de vidrios al cambiar la temperatura", *Ópt. Pur. Apl.*, **7**, 55-59 (1974).

-
- JUDD, D.B.: Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight, *CIE Proceedings, 12 Session, Stockholm*. París: Bureau Central de la CIE, París: 1, Sec. 7, 11 (1951).
- KNOBLAUCH, K., MALONEY, L.T.: "Testing the indeterminacy of linear color mechanisms from color discrimination data", *Vis. Res.*, **36**, 295-306 (1996).
- KÖNIG, A: **Gesammelte Abhandlungen**, Leipzig: Barth Verlag (1903).
- KÖNIG, A., DIETERICI, C.: "Die Grundempfindungen und ihre Intensitätsverteilung im Spectrum", *J. Sitz. Akad. Wiss. (Berlin)*, **2**, 805-829 (1886).
- KÖNIG, A., DIETERICI, C.: "Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spectrum", *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg.*, **4**, 241-347 (1893).
- KRAUSKOPF, J., GEGENFURTNER, K.: "Color discrimination and adaptation", *Vis. Res.*, **32**, 2165-2175 (1992).
- KRAUSKOPF, J., WILLIAMS, D.R., HEELEY, D.W.: "Cardinal directions of color space", *Vis. Res.*, **22**, 1123-1131 (1982).
- LE GRAND, Y.: **Optique Physiologique**. París: Masson et Cie. (1972).
- LENNIE, P., POKORNY, J., SMITH, V.C.: "Luminance", *J. Opt. Soc. Am. A*, **10**, 1283-1293 (1993).
- LOZANO, R.D.: **El color y su medición**. Buenos Aires: America Lee (1978).

LUCASSEN, M.P., WALRAVEN, J.: "Evaluation of a simple method of color monitor recalibration", *Color Res. & Appl.*, **15**, 321-326 (1990).

LUTHER, R.: "Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik", *Z. Tech. Phys.*, **8**, 540-558 (1927).

MACADAM, D.L.: "Visual sensitivities to color differences in daylight", *J. Opt. Soc. Am.*, **32**, 247-274 (1942).

MacLEOD, D.I.A., BOYNTON, R.M.: "Chromaticity diagram showing cone excitations by stimuli of equal luminance", *J. Opt. Soc. Am.*, **69**, 1183-1185 (1979).

MARTIN, L.C., WARBURTON, F.L., MORGAN, W.J.: "Determination of the sensitiveness of the eye to differences in the saturation of colours", *Med. Res. Council, Rep.* 188, London (1933).

MAXWELL, J.C.: "Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness", *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, **21**, 275-298 (1855).

McCREE, K.J.: "Small-field tritanopia and the effects of voluntary fixation", *Optica Acta*, **7**, 317-323 (1960).

McFADDEN, S.: "Discrimination of colours presented against different coloured backgrounds", *Color Res. & Appl.*, **17**, 339-351 (1992).

MELGOSA, M., PÉREZ, M.M., HITA, E.: "Chromaticity-discrimination thresholds with aperture and object colors: experimental results an

-
- predictions of some recent color-difference formulas", *Appl. Optics*, **35**, 176-187 (1996).
- MIYAHARA, E., SMITH, V.C., POKORNY, J.: "How surrounds affect chromaticity discrimination", *J. Opt. Soc. Am. A*, **10**, 545-553 (1993).
- NAGY, A.L.: "Red/green color discrimination and stimulus size", *Color Res. & Appl.*, **19**, 99-104 (1994).
- NAGY, A.L., ESKEW, R.T. Jr., BOYNTON, R.M.: "Analysis of color-matching ellipses in a cone-excitation space", *J. Opt. Soc. Am. A*, **4**, 756-768 (1987).
- NAGY, A.L., KAMHOLZ, D.W.: "Luminance discrimination, color contrast and multiple mechanisms", *Vis. Res.*, **35**, 2147-2155 (1995).
- NIMEROFF, I: "Propagation of error in tristimulus colorimetry", *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 697-702 (1957).
- PARRA, F: "Seuils différentiels de couleur", *Proc. Intern. Color Congr. Color 69*, Stockholm. Göttingen: Musterschmidt, 727-733 (1970).
- PITT, F.H.G.: "The nature of normal trichromatic and dichromatic vision", *Proc. Roy. Soc.*, **132B**, 101-117 (1944).
- POLDEN, P.G., MOLLON, J.D.: "Reversed effect of adapting stimuli on visual sensitivity", *Proceedings of the Royal Society of London*, **210**, 235-272 (1980).

-
- PRIEST, I.G., BRICKWEDDE, F.: "Minimum perceptible colorimetric purity as function of dominant wavelength", *J. Opt. Soc. Am.*, **28**, 133-139 (1938).
- PUGH, E.N., MOLLON, J.D.: "A theory of the π_1 and π_3 color mechanisms of Stiles", *Vis. Res.*, **19**, 293-312 (1979).
- REEVES, P.: "The response of the average pupil to various intensities of light", *J. Opt. Soc. Am.*, **4**, 35-43 (1920).
- ROBERTSON, A.R.: "CIE guidelines for coordinated research on colour-differences evaluation", *Color Res. & Appl.*, **3**, 149-151 (1978).
- RODIECK, R.W.: **The vertebrate retina**. San Francisco: Freeman (1973).
- ROMERO, J., GARCÍA, J.A., JIMÉNEZ DEL BARCO, L., HITA, E.: "Evaluation of color discrimination ellipsoids in two color spaces", *J. Opt. Soc. Am. A*, **10**, 827-837 (1993).
- ROMERO, J., HITA, E., JIMÉNEZ DEL BARCO, L.: "A comparative study of successive and simultaneous methods in color discrimination", *Vis. Res.*, **26**, 471-476 (1986).
- RONCHI, L., FERRARA MORI, G.: "On the characteristics of observers employed in visual research", *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **18**, 203-219 (1963).
- SCHRÖDINGER, E: "Über das Verhältnis der Vierfarben- zur Dreifarben-theorie", *Sitzungber., Kaiseerl, Wien, Akad. Wiss., Math.-natur-wiss. Kl.*, **134**, 471-490 (1925).

- SIEGEL, M.H.: "Color discrimination as a function of exposure time", *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 566-568 (1965).
- SMITH, V.C., POKORNY, J.: "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm", *Vis. Res.*, **15**, 161-171 (1975).
- SMITH, V.C., POKORNY, J.: "The design and use of a cone chromaticity space: a tutorial", *Color Res. & Appl.*, **21**, 375-383 (1996).
- STILES, W.S.: "The directional sensitivity of the retina and the spectral sensitivities of the rods and cones", *Proc. Roy. Soc. London*, **B127**, 64 (1939).
- THORNTON, J.E., PUGH, E.N. Jr.: "Relationship of opponent-colour cancellations measures to cone-antagonistic signals deduced from increment threshold data", J.D. Mollon y L.T. Sharpe, Eds., *Colour Vision*. New York: Academic Press (1983).
- UCHIKAWA, K.: "Purity discrimination: successive vs simultaneous comparison method", *Vis. Res.*, **23**, 53-58 (1983).
- UCHIKAWA, K., IKEDA, M.: "Temporal deterioration of wavelength discrimination with successive comparison method", *Vis. Res.*, **21**, 591-595 (1981).
- VALOIS, L. DE, VALOIS, K.K. DE: "A multi-stage color model", *Vis. Res.*, **33**, 1053-1065 (1993).

-
- VOS, J.J., WALRAVEN, P.L.: "On the derivation of the foveal receptor primaries", *Vis. Res.*, **11**, 799-818 (1971).
- WARE, C.: "Evidence for an independent luminance channel", *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 1379-1382 (1983).
- WEI, J., SHEVELL, S.K.: "Color appearance under chromatic adaptation varied along theoretically significant axes in color space", *J. Opt. Soc. Am. A*, **12**, 36-46 (1995).
- WRIGHT, W.D.: "The sensitivity of the eye to small colour differences", *Proc. Phys. Soc. (London)*, **53**, 93-112 (1941).
- WRIGHT, W.D.: "Researches on normal and defective colour vision", London: Henry Kimpton (1946).
- WRIGHT, W.D.: "The characteristics of tritanopia", *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 509-520 (1952).
- WYSZECKI, G.: "Propagation of errors in colorimetric transformations", *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 389-393 (1959).
- WYSZECKI, G.: "Color matching and color-difference matching", *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 117-128 (1972).
- WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.: "New color matching ellipses", *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 1135-1152 (1971).
- YEBRA, A., GARCÍA, J.A., ROMERO, J.: "Color discrimination data for 2 and 8° and normalized ellipses", *J. Optics*, **25**, 231-242 (1994).

YEH, T., POKORNY, J., SMITH, V.C.: "Chromatic discrimination with variation in chromaticity and luminance: data and theory", *Vis. Res.*, **33**, 1835-1845 (1993).