

UNIVERSIDAD DE GRANADA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE OPTICA

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA	
GRANADA	
N.º Documento	615037098
N.º Copia	116763131

DISCRIMINACION CROMATICA DIFERENCIAL POR
COMPARACION SUCESIVA DE ESTIMULOS

Por F. Javier Romero Mora

Tesis doctoral dirigida por el Prof. Dr. D. Enrique Hita Villaverde, Profesor Titular de Optica de la Universidad de Granada. Fue leida el 30 de Junio de 1984, ante el tribunal formado por :

Presidente : Prof. Dr. D^a M^a Josefa Yzuel Giménez.
Catedrático de Optica de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Vocales : Prof. Dr. D. Antonio de la Cruz Castillo. Profesor de Investigación del Instituto de Optica " Daza de Valdés "
Prof. Dr. D. Fernando González Caballero. Catedrático de Física General de la Universidad de Granada.
Prof. Dr. D. Enrique Hita Villaverde. Profesor Titular de Optica de la Universidad de Granada.

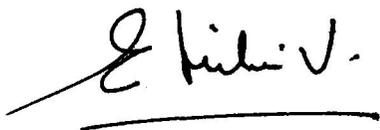
Secretario : Prof. Dr. D. Manuel Alvarez-Claro Iriarri. Profesor Titular de Optica de la Universidad de Salamanca.

Obtuvo la calificación de " Sobresaliente Cum Laude " por unanimidad.

DISCRIMINACION CROMATICA DIFERENCIAL POR
COMPARACION SUCESIVA DE ESTIMULOS

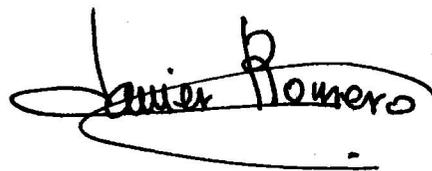
Visado en Granada, a 28
de Mayo de 1984.

EL DIRECTOR DE LA MEMORIA



Enrique F. Hita Villaverde
Profesor Titular de Optica
de la Universidad de Granada.

Memoria presentada para
aspirar al grado de DOC
TOR EN CIENCIAS.



F. Javier Romero Mora
Licenciado en Ciencias
(Sección Físicas).

Deseo antes de comenzar la exposición de la presente memoria, expresar mi agradecimiento a las personas que han colaborado desinteresadamente en la misma, haciendola posible.

Al Profesor Hita Villaverde, maestro y eficaz - director de la investigación.

A los Profesores Jiménez del Barco y Martínez - García, estrechos colaboradores en el conjunto del - trabajo.

A los Profesores Carrión Pérez y Cabrerizo Vilchez, y a los Licenciados Carrillo Espartero y Salvador Sánchez, por su ayuda y asesoramiento en aspectos específicos de la tarea investigadora.

A los Sres. Cabrerizo Muñoz y Lao Pérez, por su colaboración en los aspectos técnicos del dispositivo experimental.

A la Sta. Montero Illescas, por su paciente labor mecanográfica.

A mi familia

INDICE

CAPITULO I.- INTRODUCCION.

1.1.- Introducción.

1.2.- Fundamentos Teóricos.

CAPITULO II.- PLANTEAMIENTO GENERAL.

2.1.- Revisión Bibliográfica.

2.2.- Planteamiento.

CAPITULO III.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

3.1.- Características Generales.

3.2.- Sistema de Producción de Estímulos.

3.3.- Sistema de Observación.

3.4.- Sistema de Obturación.

3.5.- Sistema de Calibrado de Estímulos.

3.6.- Modificaciones al Dispositivo para la Determinación de Umbrales Diferenciales de Color por Comparación Simultánea.

3.7.- Puesta a Punto del Dispositivo.

CAPITULO IV.- METODO GENERAL Y DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS.

4.1.- Descripción y Justificación del Método Experimental.

4.2.- Descripción y Justificación de los Parámetros Experimentales.

4.3.- Desarrollo de las Experiencias.

4.4.- Evaluación de Datos Experimentales.

CAPITULO V.- RESULTADOS Y DISCUSION.

- 5.1.- Variación de los Umbrales Diferenciales Sucesivos de Luminancia con el Tiempo Intermedio entre Presentaciones.
- 5.2.- Variación del Umbral Diferencial de Cromaticidad en Función del Tiempo Intermedio.
- 5.3.- Estudio de los Umbrales Diferenciales de Color por Comparación Sucesiva de Estímulos.
- 5.4.- Estudio Comparativo de Umbrales Diferenciales por Comparación Sucesiva con y sin Campo Adaptante.
- 5.5.- Estudio Comparativo de Umbrales Diferenciales de Color por Comparación Simultánea y Sucesiva.

CAPITULO VI.- CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I

I.- INTRODUCCION

1.1.- Introducción

El trabajo que se ha llevado a cabo durante la realización de la presente memoria, es parte de la línea de investigación que sobre discriminación cromática, se desarrolla durante los últimos años en el Departamento de Optica de la Universidad de Granada.

Objetivos inmediatos de esta línea de investigación son el estudio de las posibles influencias que sobre la capacidad de discriminación cromática, pueden tener distintos parámetros experimentales, así como el estudio general de la discriminación cromática desde el punto de vista de los métodos experimentales de comparación utilizados.

Objetivos posteriores son todos aquellos posibles aspectos que, derivados de los datos obtenidos, en concreto en el estudio de umbrales diferenciales de color, están relacionados con, tal vez, los dos problemas más importantes que se plantean relacionados con el estudio del color: la métrica del espacio de color y el conocimiento general de los procesos visuales que rigen la visión del mismo, es decir, la teoría general de la visión del color y, desde luego, el establecimiento de un modelo visual completo.

Dentro de este trabajo general se incluye esta memoria, centrada en el estudio de umbrales diferenciales de color mediante el método de comparación sucesiva de estímulos, en contraposición con los anteriormente realizados en nuestro Departamento y en los que la comparación entre estímulos se ha realizado de forma simultánea.

Situamos esta investigación dentro del campo del conocimiento - denominado como "Ciencia del Color", término aceptado extensamente en la literatura contemporánea, Wyszecki y Stiles (1967), y que tiene -- sus primeros fundamentos en las medidas de Wright(1928-29) y Guild -- (1931), para la definición de un observador patrón que permita la especificación colorimétrica de los estímulos responsables de la sensación visual.

El trabajo aquí planteado pretende compaginar las dos partes - fundamentales en las que se puede dividir la mencionada ciencia: la visión del color y la colorimetría. Estas áreas, íntimamente ligadas, buscan una mejor comprensión del mecanismo visual del color y la especificación numérica correcta del mismo. Uno de los nexos de unión de estos apartados es, sin duda, los estudios sobre discriminación cromática y en particular el de los umbrales diferenciales de color.

No sólo es importante saber asignar unos valores numéricos, bajo el punto de vista colorimétrico, a una determinada radiación energética, sino también conocer el entorno de ellos que contiene puntos representativos de determinados estímulos de los que el observador no percibe diferencias, en sensación de color, con relación al primero. Del conocimiento de estas características pueden deducirse consecuencias de indudable aplicación a problemas técnicos, como el de las tolerancias de color, y científicos, como la estructura métrica del espacio de color y los posibles modelos teóricos de la visión cromática.

En el aspecto particular, el interés del tema que en la presente memoria se desarrolla está basado, a nuestro juicio, en dos hechos principales. Por una parte, lo frecuente del tipo de comparación aquí estudiada en los procesos de discriminación cromática que en la vida corriente se llevan a cabo. Cabe suponer que la mayoría de las comparaciones que tienen lugar en las más diversas actividades que una persona realiza, se dan con la intervención, en mayor o menor grado, de la memoria. Además, pensamos incluso que las comparaciones de tipo simultáneo que se realizan corrientemente no se hacen de forma completa, en el sentido que en colorimetría tienen, sino mezcladas con comparaciones de tipo sucesivo.

De otro lado, se constata la carencia de un estudio sistemático de los umbrales diferenciales de color por comparación sucesiva. En efecto, los trabajos que se han llevado a cabo hasta el momento actual en este área del conocimiento son escasos, habiéndose abordado solo aspectos muy específicos del mismo y bajo condiciones experimentales muy diversas.

Si bien, en un tipo de investigación primaria como la que se realiza normalmente en este campo, la adecuación y reproducción de las características que se dan en las experiencias de la vida real, no pueden ser ajustadas exactamente, hemos optado por el desarrollo del estudio sistemático de algunos aspectos que nos han parecido más inmediatos de análisis, en los procesos de discriminación cromática por comparación sucesiva de estímulos. En esta línea, se han estudiado las posibles consecuencias que de los resultados se puedan obtener, así como, se ha realizado un análisis comparativo de los mismos, dentro del campo de la colorimetría diferencial.

1.2.- Fundamentos Teóricos

A.- Coordenadas de Cromaticidad. Sistemas de Representación.

El objetivo fundamental de la colorimetría es la especificación del color. Para ello, establece diferentes sistemas de representación del mismo en función de los distintos aspectos posibles de estudio, o en base a la resolución de problemas específicos. Entre los muchos -- sistemas de representación propuestos hasta la fecha por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), hemos elegido para la realización de esta memoria los sistemas CIE 1931 y CIELAB.

El sistema CIE 1931 para la especificación del color es, sin du da, el más utilizado hasta la fecha, y en el que se han evaluado prácticamente todos los trabajos que dentro del campo de la colorimetría han sido realizados. El hecho de trabajar en nuestro caso con presentación de estímulos en modo de apertura, es decir, con luces que el - ojo observa en forma dirigida y no como provenientes de objetos difusos, es una de las razones por la que consideramos a este sistema - idóneo frente a otros posibles, tales como el sistema Munsell, etc., propios para la especificación colorimétrica de superficies difusoras.

En el sistema CIE 1931, un color queda especificado por tres parámetros, denominados respectivamente x, y, Y, dando los dos primeros información acerca de la cromaticidad del estímulo de color (coorde - nadas de cromaticidad) y el tercero evalúa la magnitud fotométrica -- del estímulo.

Estos parámetros se definen a partir de los llamados valores -- triestímulos, definidos como:

$$X = k \int \bar{x}_\lambda L_\lambda d\lambda ; \quad Y = k \int \bar{y}_\lambda L_\lambda d\lambda ; \quad Z = k \int \bar{z}_\lambda L_\lambda d\lambda$$

donde L_λ es la radiancia energética espectral del estímulo, k una -- constante y \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ , tres funciones espectrales denominadas funcio - nes de mezcla, referidas a un observador patrón. Estas suministran in

formación, si bien promediada, de las responsividades de los mecanismos de visión del color frente a la radiación luminosa, a fin de obtener la sensación de color y que de hecho están relacionadas con las coordenadas de cromaticidad de los estímulos espectrales.

Las coordenadas de cromaticidad se definen entonces como:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad ; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

En la práctica, el cálculo que se hace de los valores triestímulos se lleva a cabo sustituyendo la integral de las expresiones por sumatoria, cuyo intervalo queda determinado por las necesidades del problema y la resolución espectral del espectrorradiómetro utilizado.

De otro lado, la constante K se toma como 683 lm/w cuando se quieren obtener magnitudes fotométricas absolutas. En nuestro caso y en todos aquellos casos en los que esto no es preciso, esta constante toma distintos valores, según a lo que queramos referir el valor medido. Como se puede deducir, las coordenadas de cromaticidad no quedan afectadas por el valor que tome la constante.

Con respecto al segundo sistema utilizado, CIELAB, se definen -- sus parámetros característicos a partir de los valores triestímulos X, Y, Z, como:

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16,$$

$$a^* = 500((X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}),$$

$$b^* = 200((Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}),$$

siempre que $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n > 0.008856$

donde X_n, Y_n, Z_n, son los valores triestímulos del estímulo acromático específico al que se refieren las medidas. En el caso de medir el co-

lor de objetos difusores, se fijan estos en base al iluminante que se utiliza. Para el caso de luces directas, queda pues indeterminado qué iluminante utilizar, si bien las últimas recomendaciones de la CIE sugieren el uso de los valores triestímulos correspondientes al iluminante E (equienergético). De cualquier forma, al evaluar una luz directa en este sistema de representación, siempre queda a juicio del experimentador que valores absolutos dar a X_n , Y_n , Z_n . En el presente trabajo hemos optado por valores intermedios, de manera que L esté comprendida siempre entre 50 y 80, Pointer (1981)

A pesar de que este sistema, como se apunta, no parece del todo adecuado a un problema como el nuestro, ha sido nuestra intención hacer uso de él, debido a ser el último de los recomendados por la CIE, de aceptación más general, y así poder evaluar si da buenos resultados en el caso estudiado con referencia al problema de la uniformidad del espacio de color, problema éste que se describirá posteriormente.

B.- Comparación Simultánea y Sucesiva.

A la hora de realizar estudios en discriminación cromática se ha de fijar, en principio, qué tipo de comparación entre estímulos ha de establecerse a fin de sistematizar la realización de las experiencias.

De un modo general, dos son los tipos posibles de comparación que pueden llevarse a cabo: simultánea y sucesiva, aunque algunos -- autores han utilizado mezcla de ambas en sus trabajos.

Sin duda, la comparación de tipo simultáneo es la más utilizada en colorimetría. Su realización experimental habitual consiste en la observación de un campo de visión en el que aparecen los dos estímulos a comparar en distintas partes de éste, claramente diferenciadas. En la figura 1.1 se muestran distintos aspectos de los tipos de campos utilizados en esta forma de comparación. El más común es el de campo partido, ocupando las mitades de éste, los estímulos a comparar. Característica fundamental de la comparación simultánea es por

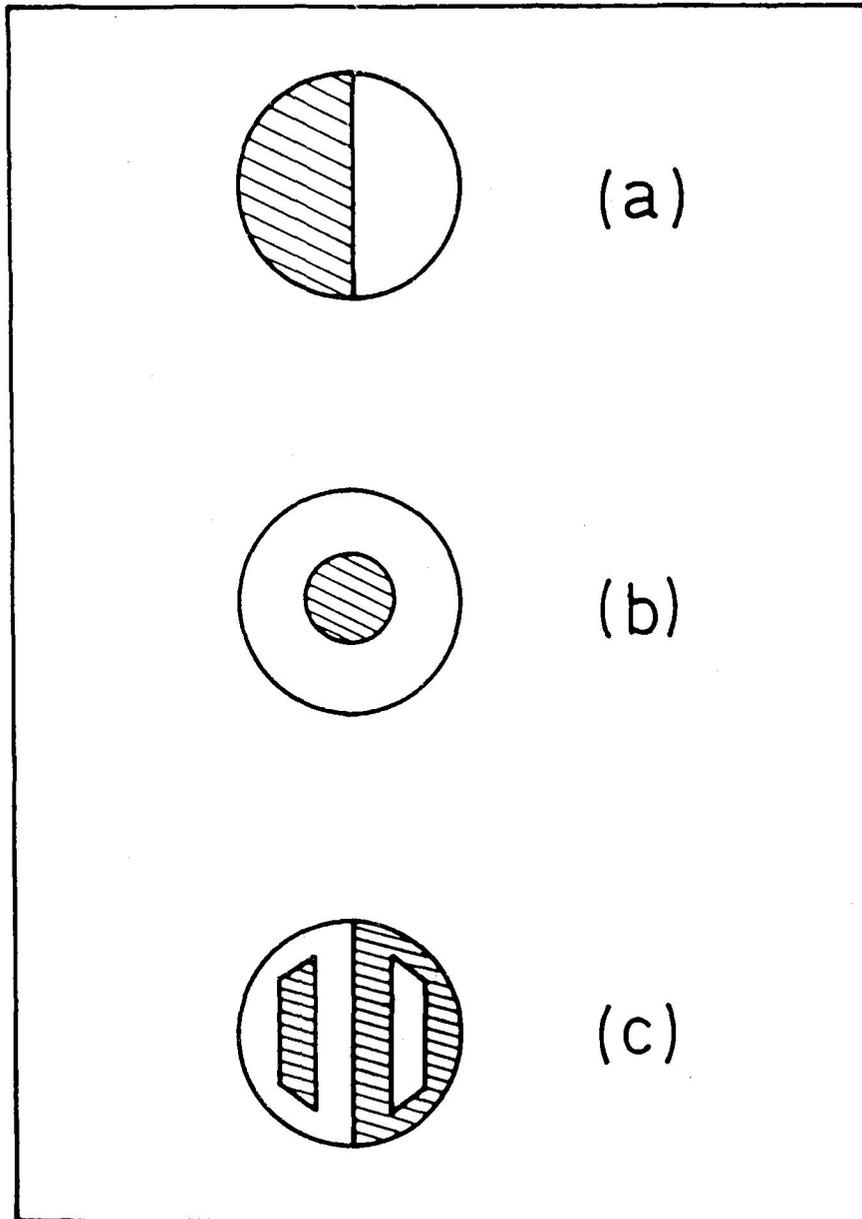


Figura 1.1: Diferentes tipos de campos utilizados para la comparación simultánea de estímulos. (a) Bipartito; (b) Concéntrico; (c) Mediate cabezal de Lummer-Brodhun.

tanto, el que los estímulos a comparar excitan distintas áreas de la retina en el mismo tiempo.

En este sentido, la característica principal de la comparación sucesiva consiste en que la estimulación retiniana se hace por parte de cada estímulo, en momentos distintos, pudiéndose excitar áreas de la retina iguales o distintas. Se incluye por tanto en ella un nuevo factor en el mecanismo visual, frente a la comparación simultánea: la memoria al color. En concreto, la forma de presentación analizada en este trabajo comprende la comparación en parejas de estímulos que se presentan alternativamente, como se detallará con posterioridad.

Los trabajos hechos mediante este modo de comparación son escasos, principalmente debido a su mayor complejidad. Los estímulos utilizados en este tipo de experiencia han sido, bien un solo campo extenso de color uniforme o bien campos partidos como los de la figura 1.1.

En nuestro estudio, y como se verá más adelante, el tipo de visión ha sido monocular siendo el campo de observación circular y el tipo de visión maxwelliana.

C.- Tipos de Igualación. Umbrales de Discriminación.

Se dice en colorimetría que dos colores son isómeros cuando -- presentan igual distribución espectral de energía y por tanto, valores triestímulos iguales. En la misma línea, se denominan colores metámeros a aquellos que se caracterizan por poseer valores triestímulos iguales a pesar de tener distinta radiancia espectral. En consecuencia, se habla de igualaciones isómeras o metámeras según se correspondan con cada uno de los casos citados.

Por definición, el umbral de discriminación de un observador determinado, para un estímulo de referencia dado, vendrá especificado por el lugar geométrico, en el sistema de representación elegido, de los puntos representativos de estímulos próximos a él y que el observador no los aprecia como distintos al estímulo de referencia. Se dice entonces, que las sensaciones de color de los puntos incluidos en el umbral y la del de referencia son iguales, si bien los estímulos que las producen están representados colorimetricamente por pun-

tos distintos del espacio de color.

Este umbral es consecuencia lógica de las limitaciones del sistema visual en lo referente a su capacidad de discriminación, y entre otros parámetros, podría depender del carácter isómero o metámero de las igualaciones de partida, Hita y Romero (1981).

En la realización del presente trabajo se ha partido de igualaciones isómeras a la hora de determinar el umbral diferencial de color. Las razones para ello estriban en ser estas las más utilizadas, y por ello útiles para la posible comparación de los resultados con los de otros autores, así como por poderse evitar, en esta forma, problemas derivados del carácter metámero de partida, en base a la utilización de las funciones de mezcla del observador patrón, Hita et al. (1977).

D.- Colorimetría Diferencial.

Tanto desde el punto de vista científico como técnico, se hace más importante que saber medir un color, el evaluar las diferencias entre colores o de éstos respecto de un estímulo patrón dado. Se plantea pues, una doble necesidad: conocer el "tamaño" de estas diferencias y el hacerlas predecibles en un sistema de representación del color, lo que es tanto como conocer la métrica asociada al espacio de color o su elemento de línea.

Tradicionalmente se han abordado estos problemas a través del estudio de diferencias de color, entendidas como "mínimas diferencias perceptibles" o, en general, de los umbrales diferenciales de color, y de aquí generalizar a un posible elemento de línea, "ds". En este sentido y, si bien a veces ha surgido la polémica aún no resuelta, Wyszecki (1972b), sobre si hay diferencias entre los criterios de perceptibilidad y aceptabilidad de diferencias de color, la mayoría de los estudios sobre los que se basa la colorimetría diferencial hasta la fecha, optan por criterios de evaluación de diferencias perceptibles a la hora de evaluar el elemento de línea del espacio. Es de notar, que si el estudio de diferencias de color es usualmente un problema cien-

tífico, establecer tolerancias es casi siempre eminentemente técnico.

Las primeras medidas en este campo fueron realizadas para la de terminación de umbrales de pureza y de longitud de onda para luces mo nocromáticas, tales como los trabajos de Judd (1933) y Priest y Bric k wedde (1938) para los primeros, o el de Wright y Pitt (1934) para - los segundos. Pero no es hasta el trabajo de Wright (1941) cuando se aborda el estudio de diferencias de color en el espacio cromático en su conjunto.

Este autor determina, por comparación simultánea de estímulos, umbrales diferenciales para distintas líneas del espacio cromático, - obteniendo resultados como los que se muestran en la figura 1.2. Es- tos umbrales como se puede observar a simple vista, ya indican una ca racterística importante del espacio de color CIE 1931: la falta de uni formidad en el mismo, pues aparecen notables diferencias de tamaño en las mínimas direrencias perceptibles para las diferentes tonalidades - estudiadas.

Tras este interesante trabajo se planteó la necesidad de no res tringirse al estudio de "umbrales de línea", y abordar qué ocurre -- cuando alrededor de un punto del espacio nos movemos en todas las di recciones posibles. En base a esta idea surge el trabajo de MacAdam - (1942), que realiza este estudio para un solo observador y adoptando un método experimental en el que él mismo realiza igualaciones de co- lor en un campo bipartito, mediante la regulación de los mandos de un colorímetro visual. Lo original en el trabajo de MacAdam reside prin- cipalmente en la adopción de la elipse como representativa del umbral diferencial de cromaticidad, si bien tales elipses son una aproxima-- ción teórica a los resultados experimentales. Los umbrales de MacAdam se muestran en la figura 1.3.

El trabajo de MacAdam y su posterior ampliación a umbrales dife renciales de color, introduciendo como nueva variable la luminancia, Brown y MacAdam (1949), se puede considerar básico con referencia al posterior desarrollo que la colorimetría diferencial ha sufrido. Esto sin duda llama la atención, ya que independientemente de las críticas

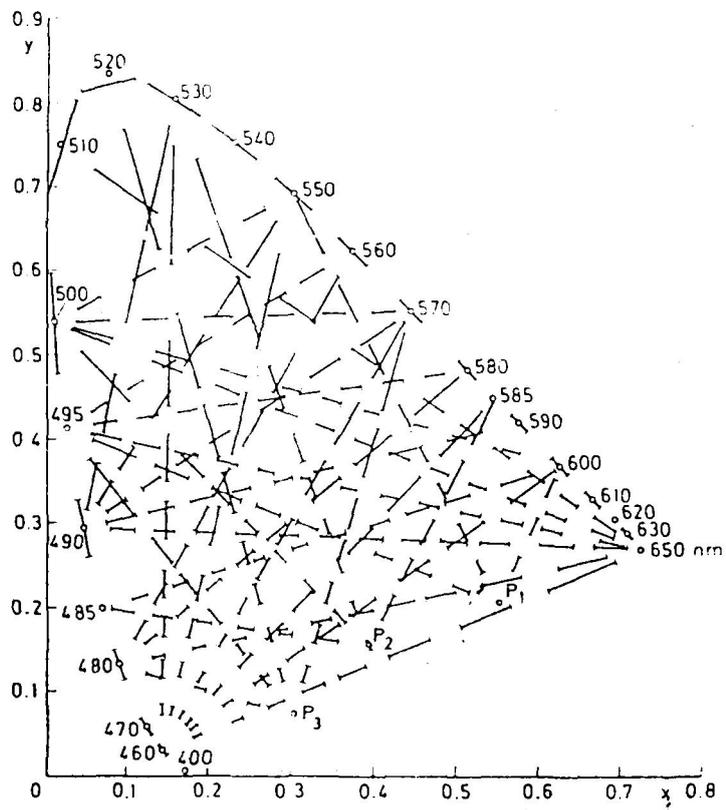


Figura 1.2: Resultados de Wrigth (1941)

Figura 1.3: Resultados de MacAdam (1942), diez veces ampliados.

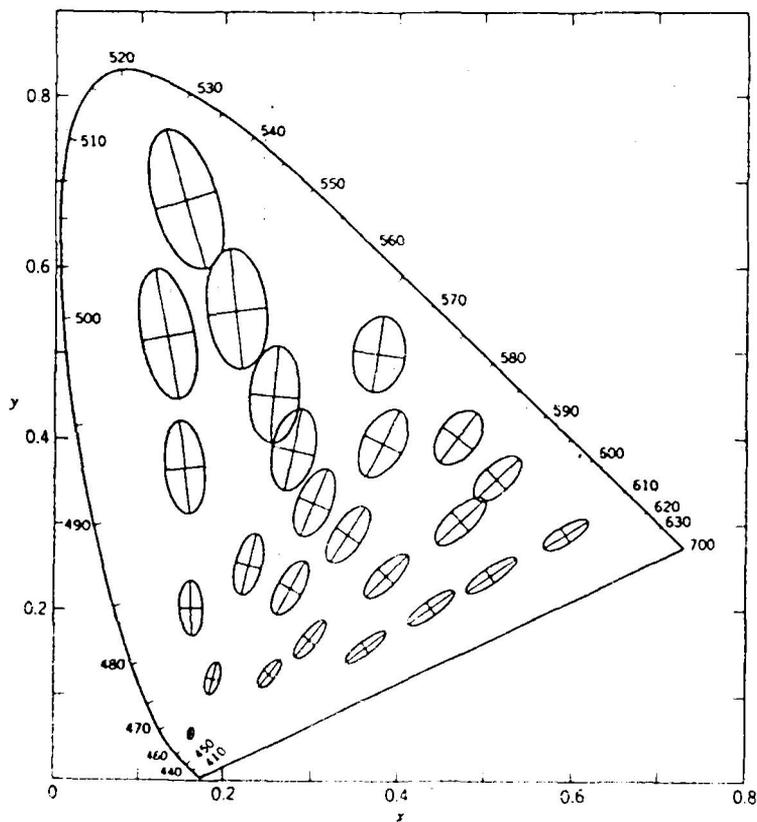
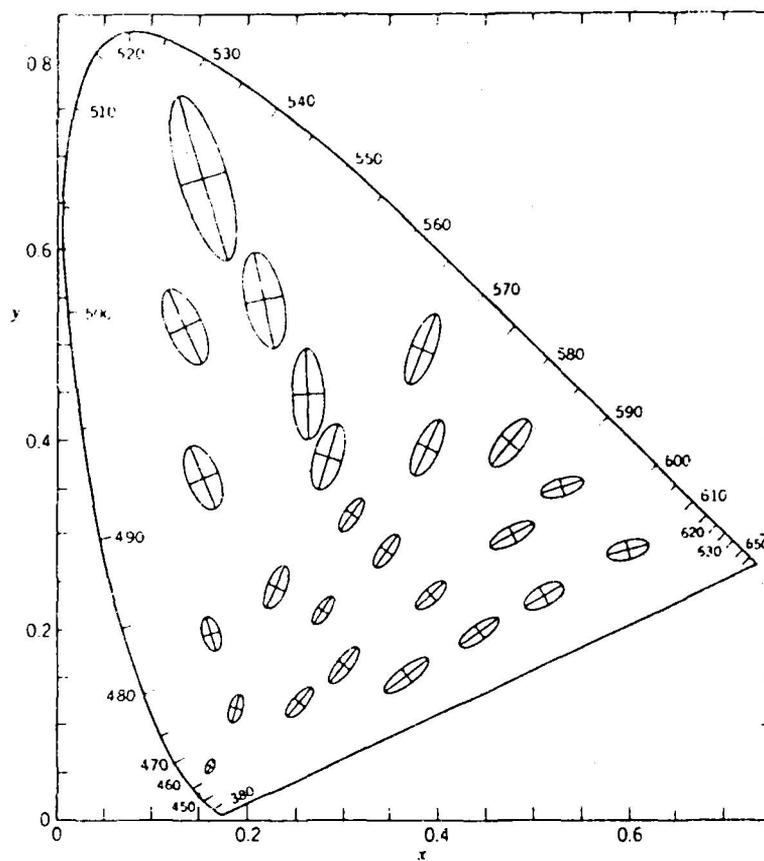


Figura 1.4: Resultados de Stiles (1946), tres veces ampliados.

a las que puede estar sujeto el método experimental utilizado, los resultados obtenidos lo son para un solo observador, lo que ha sido ampliamente discutido, incluso por ellos mismos en el segundo de los trabajos mencionados. En efecto, la variabilidad que se encuentra entre los resultados correspondientes a distintos observadores en los datos de umbrales diferenciales de color, hace difícil cualquier intento de generalización, Wyszecki (1972).

Pero no es sólo éste el único problema existente en el campo de la colorimetría diferencial. Asociado a la misma estructura geométrica del umbral, se cuestiona la elipse, en sí, como representativa o no del umbral y aún si el espacio de color es un espacio de Riemann, idea que subyace en los planteamientos de MacAdam. Son varios los autores que han mostrado su discrepancia con la aceptación, sin más, de esta métrica para el espacio de color. Así Le Grand (1970), Crawford (1970), Parra (1970), Wyszecki y Fielder (1971), Hita et al. (1982 b) aportan datos en este sentido, ampliándolos a otros sistemas de representación distintos del CIE 1931, Hita et al. (1984).

A pesar de estas objeciones y de haberse apuntado incluso la necesidad de nuevas teorías matemáticas que se adapten a las peculiaridades que el espacio de color presenta, es común el uso del elipsoide como representativo del umbral diferencial de color, y presenta gran utilidad cuando, como en nuestro caso, se pretenden realizar estudios comparativos de distintos aspectos de la visión cromática. En cualquier caso, siempre se ha de tener presente las limitaciones que esta representación posee, a fin de no aceptar como definitivas algunas conclusiones relacionadas con la métrica del espacio de color.

Asociado al problema de la métrica se tiene el de la uniformidad del mismo espacio. El objetivo de la colorimetría diferencial es tanto el evaluar las diferencias cromáticas, como el obtener un espacio de representación en el que las distancias entre estímulos se correspondan con diferencias reales de las sensaciones que estos producen. Al fin y al cabo, esto equivale a obtener un espacio donde los umbrales sean iguales en tamaño y forma para cualquier punto del mismo.

Estos dos objetivos, que convergen en uno, han sido abordados en el transcurso de los años desde dos puntos de vista: uno inductivo y otro puramente empírico. En el primero englobamos todos aquellos trabajos en los que se ha propuesto un elemento de línea teórico como representativo del elemento de línea del espacio de color.

Varios son los intentos que muestran interés en este sentido, - si bien algunos más por motivos históricos que por su actualidad. Así, el primer elemento de línea fue propuesto por Helmholtz (1896) a partir de la teoría de los tres fotopigmentos de Young y las leyes conocidas hasta la fecha, en especial la ley de Weber. La expresión de este elemento de línea vendría dada en función de los valores triestímulos por:

$$(ds)^2 = \left(\frac{dR}{R}\right)^2 + \left(\frac{dG}{G}\right)^2 + \left(\frac{dB}{B}\right)^2$$

Posteriormente, Schrödinger (1920) propone un elemento de línea en base a sus cálculos teóricos, si bien no verificados experimentalmente. Su expresión es la siguiente:

$$(ds)^2 = \frac{1}{R+G+B} \left(\frac{(dR)^2}{R} + \frac{(dG)^2}{G} + \frac{(dB)^2}{B} \right)$$

Hasta la fecha el elemento de línea que ha obtenido un mejor - ajuste con los resultados experimentales, es el propuesto por Stiles (1946). Este consiste en una modificación del de Helmholtz, introduciendo diferentes pesos para los primarios. Queda el elemento de línea en la forma:

$$(ds)^2 = \frac{(dR)^2}{(0.78 R)^2} + \frac{(dG)^2}{(1.00 G)^2} + \frac{(dB)^2}{(4.46 B)^2}$$

La adecuación de los resultados predichos por Stiles a los datos experimentales puede visualizarse comparando los umbrales diferenciales obtenidos a partir del elemento de línea, representados en la figura 1.4, con los de MacAdam de la figura 1.3. Como se observa apa-

rece un buen ajuste entre ambos, eliminándose, en el caso de la predicción de Stiles las irregularidades, en especial en la orientación, que aparecen en los resultados de MacAdam.

Otros elementos de línea han sido propuestos más recientemente a la luz de modelos teóricos de la visión del color. Tal sería el caso del propuesto por Vos y Walraven (1970), cuya expresión es la siguiente:

$$(ds)^2 = \frac{(dR)^2}{R} + \frac{(dG)^2}{G} + \frac{(dB)^2}{B}$$

Con respecto a los intentos de tipo empírico, son muchos los trabajos que hay hechos a partir del de MacAdam (1942), que tratan de determinar para distintos puntos del diagrama cromático, bajo condiciones experimentales diversas, el valor de las diferencias cromáticas. Un estudio sistemático y muy considerado en la industria y comercio es el de MacAdam (1943), en el que se dan los valores de los coeficientes g_{ik} del elemento de línea del espacio de Riemann:

$$(ds)^2 = \sum_{i,k} g_{ik} dx_i dx_k$$

para cada punto del diagrama CIE 1931 (x-y).

Por otra parte, tal como se ha indicado, muchos han sido los intentos de obtención de un sistema de representación del color uniforme. Podemos distinguir en este campo dos aspectos diferentes del problema. Uno que hace referencia a la obtención de atlas de color, en los que la clasificación de los colores atienda a un orden de escalones de igual diferencia de sensación. El ejemplo más interesante sería, por su utilidad y extendido uso, el atlas Munsell, si bien otros como el Ostwald y el DIN son también conocidos. Estos atlas son, en definitiva, sistemas de ordenación de colores que atienden para ello a los atributos del color: claridad, tono y saturación, asignando valores cuantitativos a cada uno de ellos en escalas definidas.

El otro aspecto al que nos hemos referido, comprende todas las

fórmulas propuestas para la transformación del sistema CIE 1931 que intentan conseguir un espacio de color euclídeo y como consecuencia evaluar las diferencias de color asociadas a los nuevos espacios.

Equivale, por tanto, lo dicho, a la obtención de una representación del color que, en términos de umbrales, de como consecuencia la aparición de un espacio de color donde éstos puedan representarse -- por esferas de igual radio para cualquier punto del mismo.

El problema que se plantea, en resumen, es la transformación de un espacio supuesto de Riemann en otro de tipo euclídeo. En el caso de que no se pudiera encontrar las funciones que transformen las coordenadas de un espacio en el otro, siempre se puede proyectar el espacio de Riemann en uno euclídeo de más dimensiones. En concreto, si n es la dimensión del primero, el euclídeo tendrá de dimensión: $m = n(n+1) / 2$, lo que significa que en el caso del plano de cromaticidad ($n = 2$) pasaríamos a obtener un espacio de tres dimensiones, y para $n = 3$, tendríamos $m = 6$. Los intentos en este sentido han sido muchos, siendo el más significativo el de MacAdam (1944).

Otros autores como Krystek y Erb (1980), han propuesto algoritmos para la transformación a espacios euclídeos sin más que conocer las expresiones de los g_{ik} en función de x, y . La aplicación de estos estudios está pues sujeta a las limitaciones descritas de la métrica.

En el campo de las transformaciones del sistema CIE 1931 hacia espacios pretendidamente más uniformes, han sido hechas muchas propuestas, y nosotros solo señalaremos las tres que por su vigencia y actualidad nos parecen más interesantes. Son estas las correspondientes a los espacios de color: CIE1964 (U^*, V^*, W^*), CIELUV y CIELAB, siendo sus expresiones las que se muestran en la tabla I.I.

Las dos últimas mencionadas fueron propuestas por la CIE en -- 1976 y en la actualidad son objeto de estudio a fin de verificar su adecuación a los problemas científicos y técnicos. En este sentido, se pueden mencionar trabajos como los de Pointer (1981) y Kuehni -- (1982), donde se analizan gran parte de los resultados experimenta-

TABLA I.I. Sistemas de especificación del color, CIE 1964, CIE 1976

CIE 1964 (U*, V*, W*)

$$U^* = 13 W^* (u - u_0)$$

$$V^* = 13 W^* (v - v_0)$$

$$W^* = 25 Y^{1/3} - 17$$

donde $u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}$$

u_0, v_0 del estímulo acromático

CIELUV

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_0)$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_0)$$

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad \text{para } (Y/Y_0) > 0.008856$$

$$L^* = 903.29 (Y/Y_0) \quad \text{para } (Y/Y_0) \leq 0.008856$$

donde $u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

u'_0, v'_0, Y_0 del estímulo acromático

CIELAB

$$a^* = 500 (f(X/X_0) - f(Y/Y_0))$$

$$b^* = 200 (f(Y/Y_0) - f(Z/Z_0))$$

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad \text{para } (Y/Y_0) > 0.008856$$

$$L^* = 903.29 (Y/Y_0) \quad \text{para } (Y/Y_0) \leq 0.008856$$

donde $f(\) = (\)^{1/3}$ para $(\) > 0.008856$

$$f(\) = 7.787 (\) + 16/116$$

para $(\) \leq 0.008856$

X_0, Y_0, Z_0 del estímulo acromático

les clásicos de la colorimetría en los nuevos sistemas CIE 1976 . Las conclusiones que se desprenden de los mismos parecen apuntar a que no se puedan establecer ventajas claras de un sistema sobre otro y -- aún en comparación con el mismo CIE 1931. A pesar de que de los trabajos mencionados y de otras referencias de la literatura, Lozano(1978), parecen desprenderse ventajas particulares del sistema CIELAB, se hace precisa una mayor investigación en este campo que nos permita obtener conclusiones más firmes en este controvertido problema, objetivo fundamental de la colorimetría diferencial.

E.- Adaptación Cromática.

En general, el término adaptación se aplica a todos aquellos procesos que comprenden la acción de sistemas receptores específicos como consecuencia de variaciones en la estimulación externa, así como para denominar también el estado final de un proceso. Ciñendonos al caso que nos ocupa, hablaremos de adaptación cromática cuando el ojo modifica sus propiedades al serle presentados estímulos de color.

Se hace distinción entonces según que la adaptación al estímulo sea de tipo espacial o temporal. Se entiende por la primera aquella en la que el estímulo adaptante y el que hace de test, se presentan simultáneamente. Se habla en este caso de contraste simultáneo y de colores inducidos. Un ejemplo de esto sería las variaciones en la sensación de color que se obtiene, en muchos casos, cuando un estímulo cromático circular se rodea de campos circundantes de distinta cromaticidad.

En el caso de la adaptación temporal, el observador se adapta a un determinado estímulo de forma continua hasta conseguir una situación estable. Se habla de contraste sucesivo, cuando el test que evalúa el estado de adaptación se presenta de forma alternativa al adaptante. Un ejemplo de esta evaluación sería los colores inducidos que se generan cuando, tras observar durante un periodo largo de tiempo un estímulo cromático, por ejemplo rojo, se pasa a observar un estímulo acromático, apareciendo este normalmente verde azulado, Judd (1959).

Asociados a este tipo de adaptación aparece el fenómeno conocido como constancia del color. Se entiende por tal, la falta de diferencia en el color percibido procedente de los mismos objetos iluminados por distintos iluminantes, a los que el observador se encuentra adaptado. Tal sería el caso que se presenta en la vida ordinaria, de no apreciar diferencias cromáticas, si bien radiométricamente las hay, entre los objetos que nos rodean cuando se iluminan ya sea con luz natural o con una lámpara de incandescencia.

Los estudios en adaptación cromática han perseguido, normalmente, dos objetivos hasta la fecha: uno aportar datos sobre los mecanismos responsables de la visión cromática, y otro deducir relaciones entre los colores percibidos cuando la iluminación se hace con luces de composición espectral diferente. Probablemente, la hipótesis de mayor trascendencia en adaptación cromática es la conocida ley de Von Kries, que enunciada según sus propias palabras dice: "estímulos de composición espectral diferente, que aparecen iguales a un ojo no fatigado, aparecerán también iguales para el ojo algo fatigado", Von Kries (1911).

En este sentido, se entiende que las igualaciones metámeras de color han de ser independientes del estado de adaptación cromática. Esta ley implica que las sensibilidades del mecanismo visual adaptado han de ser linealmente proporcionales a las del mismo mecanismo bajo condiciones de adaptación diferentes.

Se enuncia la ley de los coeficientes de Von Kries, en base a la trivarianza cromática, como:

$$s_1 = k_1 s'_1$$

$$s_2 = k_2 s'_2$$

$$s_3 = k_3 s'_3$$

siendo s_i y s'_i las sensibilidades para los distintos estados de adaptación, y los coeficientes k_i inversamente proporcionales al efecto de la adaptación según su composición espectral.

Sin embargo, esta ley dista de ser aceptada con generalidad, --
siendo muchos los autores que han detectado fallos en su cumplimiento
y propuesto modelos alternativos para la transformación, Bartleson --
(1977).

No obstante, los trabajos de Cruz y Alvarez-Claro (1973) refe--
rentes a la conservación del metamerismo cuando la adaptación cromáti--
ca cambia, ley de Von Kries, realizados a partir del estudio de umbra--
les diferenciales de color por comparación simultánea, ponen de manifiesto
que al pasar de un estado de adaptación a otro, no se observan va--
riaciones sensibles en la posición, tamaño y orientación de los elip--
soides de discriminación representativos del umbral.

CAPITULO II

II.- PLANTEAMIENTO GENERAL

2.1.- Revisión Bibliográfica

Las primeras referencias de trabajos realizados en el campo de la colorimetría diferencial por comparación sucesiva de estímulos, aparecen en la literatura durante las primeras décadas del presente siglo. Un resumen muy completo de ellas es el dado por Durup y Fessard (1938). Estos autores hacen una revisión de los trabajos realizados hasta entonces, en lo que ellos denominan como métodos de presentación sucesiva para la determinación de umbrales diferenciales de luminancia. Tal como se pone de manifiesto en este resumen, el interés principal de estos autores estriba en obtener el método de comparación entre estímulos que haga mínimo el umbral de luminancia.

Se plantea en este trabajo la polémica entre la presentación de tipo simultánea y sucesiva, con referencia a cual de estas da resultados cuantitativamente menores para el umbral. Los trabajos, que resumen estos autores bajo la denominación común de "métodos sucesivos", muestran una variedad bastante apreciable respecto de las formas concretas de presentación. Así, desde autores que realizan sus medidas a partir de la exposición alternativa de estímulos de distinta luminancia, a autores que presentan un estímulo de referencia, variándose la luminancia de éste de manera progresiva. La tabla II.I muestra una síntesis de las distintas formas de presentación de nominadas como "sucesivas", que analizan Durup y Fessard en su artículo. Como se puede observar, se incluyen algunas en las que se mezclan la comparación simultánea y la sucesiva.

De los trabajos mencionados por Durup y Fessard, dos son los que en principio atraen nuestro interés, al utilizar como método de comparación uno similar al utilizado por nosotros. Son éstos los de McDougall (1904) y el de Flügel y McDougall (1909). Ambos trabajos dentro de la tabla II.I se sitúan en el apartado calificado como presentación sucesiva discontinua. En el primero de ellos, el autor, en realidad, lo que hace es utilizar este tipo de presentación para

TABLA II.I. Tipos de presentación sucesiva según Durup y Fessard (1938)

<u>Presentación</u>	<u>Características</u>		
unilocal sucesiva	instantánea	progresiva	discontinua
	$I I + \Delta I$	$I \rightarrow I + \Delta I$	$I 0 I + \Delta I$
unilocal bi-sucesiva	bi-instantánea		
	$I I + \Delta I I$		
bi-local (sucesiva + simultánea)	instantánea	bi-instantánea	
	$I \rightarrow I$	$I \rightarrow I$	
	$I I + \Delta I$	$I I + \Delta I I$	

el estudio de lo que él denomina como "action-time", y que en la actualidad es más conocido como tiempo de integración, es decir, el tiempo necesario para que un individuo tenga la percepción completa de un estímulo, en el sentido de estabilidad en la sensación. Este tiempo se acepta en promedio alrededor de 0.1 s, dependiendo este valor de las condiciones experimentales y la cromaticidad del estímulo, Kinney (1965).

El segundo de los trabajos mencionados sigue las pautas anteriormente descritas sobre las características de estas experiencias, utilizando tiempos de exposición de los estímulos del orden, precisamente, del tiempo de integración, lo que supone unas condiciones experimentales muy distintas de las nuestras. Los autores de este trabajo concluyen que es más "fácil" psicológicamente y se obtiene mayor precisión al comparar dos impresiones sucesivas que dos simultáneas, lo que no discutiremos aquí. A pesar de ello, la tendencia general en la actualidad, es a pensar lo contrario, e incluso en la mayoría de los trabajos que posteriormente se mencionarán, realizados con tiempos de exposición más próximos a los nuestros, se constata como aumenta la indeterminación cuando interviene la memoria en los procesos de discriminación.

Otros trabajos que, con ser pioneros, siguen siendo interesantes en este campo, son los de Drew (1937), enmarcado dentro de los realizados por comparación sucesiva progresiva y que encuentra que el umbral se triplica cuando la fase de transición pasa de ser de 0.1 s a 2 s, así como los de Heinz y Lippay (1928) y el de Ivanoff (1946) referidos a visión lateral.

Con posterioridad a este primer grupo de trabajos, nos encontramos un espacio de tiempo en el que no se encuentran nuevas aportaciones en este tipo de estudio hasta la publicación del artículo de Newhall et al. (1957), sobre la comparación de igualaciones simultáneas y sucesivas. Este trabajo es considerado como clásico dentro de los estudios de lo que se conoce en la literatura internacional como "short-term memory", es decir, los aspectos de la Óptica Fisiológica relacionados con el uso de la memoria durante pequeños inter-

valos de tiempo.

Los autores en este trabajo hacen un detenido análisis de las características que presentan las igualaciones sucesivas de color -- frente a las realizadas simultáneamente. El método general utilizado por los autores en las primeras consiste, básicamente, en la realización por parte del observador de igualaciones de color, mediante el manejo de los mandos de un colorímetro, de un estímulo previamente expuesto durante 5 s y tras pasar otros 5 s desde la desaparición del estímulo hasta el comienzo de la realización de la igualación. En concreto, los autores estudian como variables el umbral diferencial obtenido a partir de las igualaciones, el tiempo medio requerido para la igualación y la claridad, tono y saturación del promedio de las igualaciones realizadas para un mismo estímulo.

El estudio llevado a cabo por estos autores se extienden a 25 estímulos a lo largo del espacio de color, realizando un desarrollo de las experiencias tal que compaginaban al mismo tiempo igualaciones simultáneas y sucesivas de los mismos estímulos. Los resultados de la comparación entre un tipo de igualación y otra, una vez obtenidos los umbrales diferenciales de cromaticidad como elipses en el diagrama de cromaticidad CIE 1931, indican un tamaño en promedio 6 veces mayor de los umbrales sucesivos frente a los obtenidos por comparación simultánea.

Con respecto al tiempo invertido para la realización de las igualaciones, encuentran que este es aproximadamente el doble en las comparaciones simultáneas que en las sucesivas, lo que los autores apuntan puede deberse a la mayor premura en la realización de las igualaciones sucesivas debido a su mayor incomodidad y a la sensación de -- rápida pérdida de información. Por último, referente al estímulo "recordado", entendido este como el promedio de los estímulos resultantes de las igualaciones realizadas, los autores expresan que, tanto la claridad como la saturación, más claramente esta última, aumentan para el estímulo " recordado" respecto del expuesto previamente para su igualación.

Se incluyen en este trabajo, unas expresiones deducidas a partir de los resultados obtenidos, para la predicción de la claridad, tono y saturación en términos Munsell (value, hue y chroma) de los estímulos "recordados" en función de los obtenidos mediante igualaciones simultáneas. Estas expresiones son las siguientes:

$$H_M = (1/3.6) \text{arc tan } A/B$$

$$V_M = 1.77 V_p - 0.695$$

$$C_M = (A^2 + B^2)^{1/2} \quad ; \quad A = 1.286 C_p \text{ sen } (3.6 H_p) + 0.304$$

$$B = 1.324 C_p \text{ cos } (3.6 H_p) + 0.042$$

M = sucesiva

P = simultánea

H, V, C valores Munsell

La tendencia a cambios en la claridad y saturación mostrada, ya se mencionaba en trabajos como el de Durup y Fessard, los que basados en un trabajo anterior de Fondor y Happish (1923), apuntan que para intensidades iguales, la intensidad del segundo estímulo en comparación sucesiva se encuentra mayor que la del primero, aumentando esta diferencia en función del tiempo entre presentaciones.

Autores, como Hanes y Rhoades (1959), encuentran que respecto a la claridad, ésta parece aumentar para colores "claros" y disminuir para los "oscuros". En el mismo sentido, Bartleson (1961), -- aporta unos resultados muy similares a los de Newhall et al., en un interesante artículo en el que compara las igualaciones de color -- realizadas en forma similar a la de éstos, con las realizadas cuando se trata de estímulos correspondientes a objetos usuales en la vida común (la piel humana, el azul del cielo, ...). A partir de este trabajo, se suelen dividir los estudios en este campo según -- la familiaridad, o no, de los objetos cromáticos, denominándose en -- la bibliografía, estudios en "memory colors" los primeros y en "color memory" los segundos.

Bartleson, a partir de sus resultados, expresa su opinión de que la memoria al color es "una resultante selectiva de la impre--

sión relativa, durante la percepción, de los distintos aspectos de la estimulación".

Es de notar, que ninguno de estos autores, así como otros que han realizado trabajos en este campo, Helmig (1958), encuentran cambios significativos en el tono de los estímulos. En el mismo sentido, las ecuaciones propuestas por Newhall et al. necesitan una mayor verificación experimental, y en cualquier caso, su aplicación parece ceñirse a experiencias del tipo para las que fueron deducidas.

Aunque más lejano a nuestra área de investigación, es interesante reseñar algunas de las características mostradas en los trabajos realizados bajo la denominación de "memory colors". Los más significativos en este campo son los de Bartleson (1960, 1961) y una parte del de Newhall et al. (1957). En estos trabajos las conclusiones apuntan a cambios importantes en el tono del color "recordado" respecto del color de los objetos familiares. Es de notar, que Bartleson (1961) -- considera, con vistas a la industria fotográfica, que la reproducción ha de orientarse según lo que indican los resultados en el campo de la investigación de los colores familiares, más que los realizados con colores abstractos. Sin embargo, no se ha llegado a una optimización completa de estos procesos debido a que existen parámetros espacio--temporales asociados a la escena que se pretende reproducir fotográficamente, que influyen poderosamente en la idea que el observador -- forma de lo que ha visto.

En cualquier caso, la importancia que la comparación sucesiva -- entre estímulos pueda tener, como aspecto de la colorimetría que se -- acerca más a las situaciones de comparación de la vida ordinaria, queda reflejada en palabras de Newhall et al. cuando indican que, "con la sola excepción de estímulos cercanamente yuxtapuestos en campos pequeños, toda comparación de color parece implicar sucesión y memoria". --

Es por esto, que dichos autores invitan al desarrollo de una métrica aceptable basada en datos de igualación de color sucesiva. En -- el sentido que señala esta sugerencia, puede encuadrarse un trabajo de Ikeda y Shimozono (1979), en el que los autores calculan la curva de eficiencia luminosa para distintos observadores mediante un método

basado en la comparación sucesiva de estímulos considerado como límite de la fotometría del parpadeo para frecuencias bajas. Consecuencia importante de este estudio es la similitud de la curva obtenida mediante este método con las de otros autores cuando se trabaja con fotometría heterócroma directa, lo que sin duda es un resultado muy interesante. Los autores explican, en su caso, las diferencias encontradas entre la eficiencia luminosa mediante comparación sucesiva y las obtenidas en el mismo trabajo mediante fotometría del parpadeo, en base a la actuación, o no, de un canal cromático en la visión cuando la frecuencia de presentación es baja o alta, respectivamente, encontrando, para determinadas longitudes de onda, la zona de transición en frecuencias de la intervención, según su teoría, de un canal acromático o la suma de éste y el mencionado cromático.

Este tipo de teoría sobre la visión cromática, se encuadra dentro de los estudios que, sobre modelos teóricos de visión del color, se han hecho y continua haciéndose, con el fin de encontrar áquel que explique satisfactoriamente todos los datos experimentales que se poseen del comportamiento del ojo, desde el punto de vista cromático.

A la vista de lo que hasta la fecha la bibliografía apunta, puede deducirse que son muchos los aspectos de interés que sobre los procesos visuales, cuando se incluyen en ellos la memoria, se desconocen y que, sin duda, presentan bastante significación sobre todo desde el punto de vista práctico. No existen desde la perspectiva de la Física demasiados trabajos en esta área, si bien algunos como los de Averbach (1961), Indow (1974), Ikeda (1978), han abordado temas relacionados con el almacenamiento de información visual y su reproducción. En cualquier caso, los aspectos cromáticos de la percepción no son prácticamente tratados en los mismos.

En otro grupo de trabajo, podemos englobar los que han utilizado la memoria con el fin de estudiar algún aspecto de la visión cromática, como la adaptación. En concreto, encontramos los de Judd (1940), Kruihof (1955), Helson et al. (1952) y Bartleson (1965). Como característica común a todos ellos, podemos apuntar el estudio que hacen sobre la influencia en la visión cromática de distintos tipos de iluminante,

tales como lámparas de incandescencia, iluminación a la luz del día, iluminación fluorescente, ..., incluyéndose el estudio del rendimiento de color de los mencionados iluminantes. Cabe destacar, que en estos trabajos la memoria al color es un medio y no un fin, en sí misma, de estudio. Así por ejemplo, el trabajo más completo de ellos es el de Helson et al. (1952) en el que utiliza el aprendizaje que el observador obtiene cuando se le somete a comparaciones sobre escalas de color del tipo Munsell, para que luego asigne valores de claridad, tono y saturación a objetos iluminados bajo las distintas condiciones experimentales que se analizan.

En este sentido pues, hay autores que han relacionado con este campo de trabajo, los que se hacen bajo la denominación inglesa de "color naming", es decir, aquellos cuya técnica principal de trabajo consiste en la asignación de nombres, según convenios, a los estímulos de color vistos bajo, por lo general, difíciles condiciones de observación. Esta técnica al parecer da buenos resultados en estudios de discriminación cromática, Bouman y Walraven (1972).

Es por tanto notorio, que son muchos los puntos de vista y las formas de intervención distintas que pueden tenerse en cuenta en todo lo que se refiere a la memoria y sucesión, desde la perspectiva de la Óptica Fisiológica. De hecho, centrándonos en la forma de comparación que nosotros hemos adoptado en nuestras experiencias, la bibliografía reciente se centra principalmente en los trabajos de Uchikawa e Ikeda (1981) y Uchikawa (1983), en los que los autores estudian la discriminación en longitud de onda y pureza colorimétrica a luminancia constante, por un método prácticamente análogo al utilizado en este trabajo.

El primero de los citados, así como una de las partes de esta memoria, está centrado en el estudio de la variación del umbral en longitud de onda cuando el tiempo entre la presentación de estímulos aumenta. Los autores parten del estudio del umbral para presentaciones simultáneas en un campo partido y tratan de analizar qué ocurre cuando el intervalo de asincronía en la presentación de los dos estímulos aumenta hasta 5450 ms. El tiempo de exposición de cada estímulo es de

110 ms, lo que lleva a que los umbrales obtenidos lo sean para comparación simultánea, pasando por mezcla de presentación simultánea y sucesiva, hasta llegar a una clara presentación sucesiva.

Como método experimental utilizan el de los estímulos constantes, de una forma muy similar a la nuestra. Después de cada pareja de estímulos (estímulo al que se le determina el umbral/estímulo a comparar) el observador ha de juzgar si los ha visto iguales o no. Los resultados de estos autores, obtenidos para estímulos monocromáticos, quedan resumidos gráficamente en la figura 2.1, que dan los autores como ajuste medio de sus datos. Como se observa el valor medio de T_c , para las distintas longitudes de onda estudiadas, es de alrededor de 185 ms.

Por otra parte, estos autores también comparan, para dos observadores, las curvas de discriminación en longitud de onda obtenidas para todo el espectro visible a intervalos de 10 nm, por comparación simultánea y sucesiva. Sus resultados concuerdan numericamente con los de Newhall et al., al obtener valores del umbral, en media, del doble para el segundo tipo de presentación sobre el primero. Asimismo, respecto de la forma de las curvas, estas coinciden prácticamente, salvo un pico en la zona de los verdes que se desplaza hacia longitudes de onda más cortas para la comparación sucesiva. Este resultado, indican los autores, es similar a lo obtenido en el caso de usar la técnica del "color naming", lo que pone de manifiesto la familiaridad de ambas técnicas.

Las condiciones experimentales que estos autores han utilizado, inducen a cuestionarse qué ocurrirá cuando éstas, en especial con respecto al tiempo de exposición, no sean tan críticas, sino que permitan la discriminación en forma más fácil y cómoda al observador, tal vez acercándose a tiempos de exposición más normales en los procesos de discriminación que se dan en la vida ordinaria. Por otra parte, el ojo humano no se caracteriza por trabajar siempre a igual luminancia, sino que suele realizar su discriminación de forma global en luminancia y cromaticidad. Esto nos hace plantearnos el estudio de umbrales diferenciales "globales" de color por comparación sucesiva. Cabría --

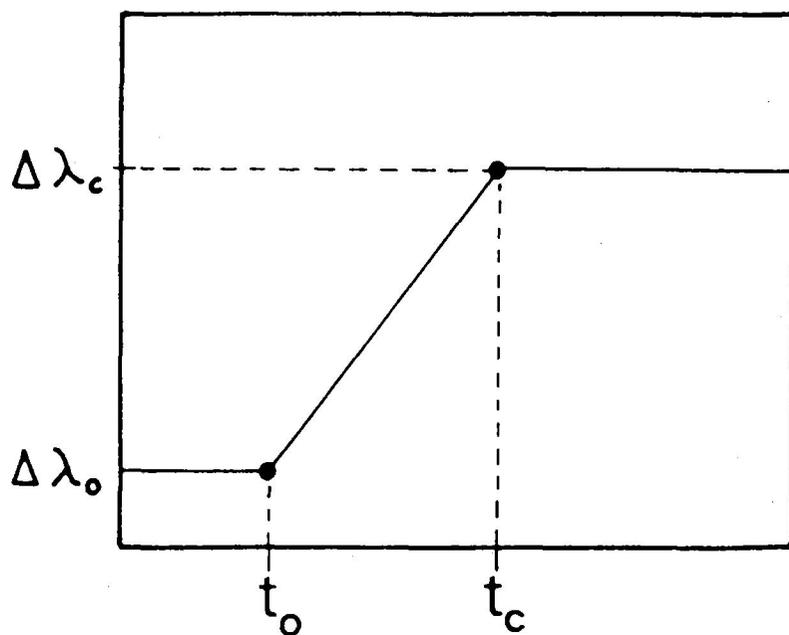


Figura 2.1: Resultados de Uchikawa e Ikeda (1981). En abscisas se representa el tiempo intermedio entre presentaciones. $t_c = 185$ ms.

plantearse por último, la estimulación de la misma área foveal de la retina, lo que por otra parte evitaría posibles asimetrías en la visión o efectos inductivos de unas zonas sobre otras, como cita MacDonald y Allen (1930).

Estas apreciaciones no provienen sólo de la revisión bibliográfica realizada, sino también de la propia experiencia que nuestro grupo de investigación ha adquirido en su línea de estudio de distintas condiciones experimentales en umbrales diferenciales de color, desarrollada a lo largo de los últimos años. Con respecto al presente trabajo, las materias que nos han servido de una utilidad más directa podemos concretarlas en los artículos de Hita et al. (1976, 1979, 1980, 1982), si bien todos ellos referidos a comparación simultánea de color. Son en particular de interés, aquellos en los que se han obtenido umbrales diferenciales de color bajo circunstancias muy similares a las que en este trabajo se plantean y con los mismos observadores. Tal es el caso de Hita et al. (1982) donde se estudia la influencia del tiempo de exposición sobre los umbrales diferenciales de color, encontrándose una estabilización en la discriminación para tiempos del orden, y superiores, a 1 s. Resultados análogos habían sido encontrados anteriormente referidos a umbrales diferenciales de luminancia, Hita et al. (1980).

En relación con el segundo trabajo de Uchikawa, referente a la discriminación sucesiva en pureza colorimétrica, el autor tiene como objetivo fundamental determinar la variación del umbral de pureza, para dos observadores y siete longitudes de onda dominante según el propio valor de la pureza de los estímulos, así como realizar un estudio comparativo del mismo parámetro entre las comparaciones de tipo simultáneo y sucesivo.

Utiliza un método experimental y de evaluación de los resultados, en términos generales, similar al anteriormente utilizado por el mismo autor. El tiempo intermedio entre estímulos a comparar lo fija en 2 s y adopta como tiempo de exposición de los estímulos, para todos los casos, en 1 s, sin realizar justificación de ello. La presentación de los estímulos se realiza mediante campos circulares

de 45', separados 30', correspondientes a cada uno de los estímulos, referencia-variable, dentro de un campo acromático de 4.9º circundante. La luminancia de los estímulos es de 170 td, siendo la del campo circundante aproximadamente la misma y trabajando de nuevo a luminancia constante.

Los resultados parecen indicar un aumento en el valor del umbral de 1.5 a 2 veces en el caso de la discriminación sucesiva respecto de la simultánea, si bien no aparecen diferencias significativas en la evolución con la pureza colorimétrica. De hecho ésta es prácticamente constante para la mayoría de las longitudes de onda dominante analizadas. De otro lado, aparecen incrementos en la saturación media de los estímulos en el sentido de los descritos por Newhall et al. (1957), aunque no en todos los casos. A la vista de sus resultados, el autor concluye que "no es probable una disminución de la discriminación sucesiva con tiempo de retraso entre presentaciones (SOA) mayores de 3 s", lo que nos parece que puede ser cuestionable.

Con respecto a la idea de comparar los umbrales diferenciales obtenidos por comparación sucesiva con los obtenidos por comparación simultánea por otros autores, se ha pensado conveniente referirse a los artículos que han tenido una mayor repercusión dentro de la determinación de estos umbrales por comparación simultánea. En base, por tanto, a lo visto en la descripción hecha de la colorimetría diferencial, se han recogido los trabajos de MacAdam (1942), Brown y MacAdam (1949) y Wyszecki y Fielder (1971). Si bien estos trabajos han sido realizados bajo condiciones experimentales muy distintas a las nuestras, pueden servirnos como punto de mira a la hora de evaluar nuestros resultados.

En efecto, los umbrales determinados por estos autores, así como la idea original de MacAdam de representar por elipses estos umbrales en el plano de cromaticidad, han servido, y siguen sirviendo, de base en la colorimetría para muchas de las áreas de investigación que en ellas se plantean.

Si bien, la idea de representar los umbrales diferenciales de cromaticidad de esta forma ha sido cuestionada por algunos autores, nosotros en este estudio la hemos adoptado, pues nuestra idea base no era el establecimiento de una métrica del espacio de color, sino el estudio experimental comparativo de la influencia sobre dichos - umbrales de distintos aspectos experimentales, y en tal sentido esta representación se ve como idónea.

Por último, ha sido interesante introducir el trabajo mencionado de Wyszecki y Fielder (1971), que obtienen umbrales diferenciales de color en condiciones experimentales más próximas a las nuestras y desde puntos de vista más cercanos, como son el no trabajar a luminancia constante, o el que el observador en las experiencias participe exclusivamente como "instrumento de cero".

2.2.- Planteamiento

A la vista de los trabajos publicados hasta la fecha sobre discriminación cromática por comparación sucesiva, se puede deducir que este campo de la colorimetría, a pesar de su trascendencia, no ha sido aún estudiado en profundidad. Muchos de los aspectos fundamentales del mismo están sin analizar hasta el momento, y lo que es más interesante, no existen trabajos que pretendan realizar un análisis global del mismo, o al menos de un conjunto de sus apartados más importantes.

Esta, por otra parte, es una de las grandes dificultades que encuentran los investigadores, cuando en el campo de la visión del color, se quiere construir un modelo que explique la visión cromática en su conjunto. Suele ocurrir que los datos que se tienen sobre el comportamiento del ojo referidos a la percepción cromática bajo aspectos particulares del problema, se han obtenido por grupos de observadores distintos y bajo una variedad de condiciones experimentales enorme. Trabajos en los que aspectos distintos de la discriminación cromática hayan sido estudiados de forma conjunta no son fáciles de encontrar en la literatura, habiéndose elaborado los modelos teóricos de la visión a partir de datos muy diversos.

Como consecuencia, hemos planteado un trabajo experimental en el que se analicen distintas características de la discriminación cromática por comparación sucesiva, así como la influencia de algunos de los parámetros característicos que puedan influir en ella. Se han realizado las experiencias para un mismo conjunto de observadores y bajo condiciones experimentales lo más versátiles y próximas a las situaciones cotidianas de discriminación que permite un tipo de investigación primaria como la que se plantea.

Las materias de estudio elegidas en la presente memoria nacen como consecuencia de lo realizado hasta la fecha en este campo y de las prioridades que, a nuestro juicio, ha de darse al estudio de determinados parámetros y características de este tipo de comparación.

En este sentido, y según lo visto en el apartado anterior, no se encuentran prácticamente estudios en los que el tiempo que transcurre entre la exposición del estímulo de referencia y aquel con el que se quiere comparar en discriminación sucesiva, tome valores mayores de 5 s, y en ningún caso, se ha estudiado la posible influencia de este parámetro en la discriminación cromática cuando este toma valores altos dentro de los límites de la memoria a corto intervalo de tiempo (short-term memory). A nuestro juicio este tiempo constituye uno de los parámetros principales en este tipo de comparación.

De otra parte, los estudios mencionados en este campo, principalmente los de Uchikawa, adolecen de hacer trabajar al ojo en condiciones limitadas a la hora de determinar su capacidad de discriminación. Es decir, estudian umbrales en longitud de onda o pureza colorimétrica, pero permaneciendo constante la luminancia. Esto nos conduce a plantearnos un doble propósito. Por un lado, trabajar en el espacio cromático atendiendo a las variaciones en coordenadas de cromaticidad que definan al umbral, lo que además pueda aportar conclusiones con vista al estudio del espacio de color y su posible estructuración métrica. Además, se ha procurado no limitar el funcionamiento normal del ojo, ya que éste está habituado a situaciones en las que se dan variaciones simultáneas de claridad, tono y saturación cuando se pasa de ver un estímulo a otro. Se plantea, por lo tanto, la obtención de umbrales diferenciales de color atendiendo a la tri-varianza visual.

Otros aspectos de la discriminación que se han considerado interesantes, por su trascendencia en la ciencia del color, son aquellos relacionados con la adaptación cromática. Este campo de la visión es, a menudo, base para la elaboración de modelos sobre los mecanismos de visión del color, debido a la gran cantidad de información que del estudio de la adaptación cromática se puede deducir acerca de las características espacio-temporales de la visión. Como se ha apuntado en la revisión bibliográfica, aún no se ha abordado este tema desde el punto de vista de la comparación sucesiva de estímulos, y sólo se ha utilizado la memoria al color como técnica de --

trabajo en algunos estudios de adaptación cromática y en ningún caso en el sentido que ahora se plantea.

En esta línea, es de notar asimismo, la variedad de técnicas experimentales utilizadas a la hora de hacer intervenir la memoria en el proceso visual. No sólo se detecta una gran falta de trabajos que aborden el problema en su conjunto, sino que los resultados difieren significativamente entre ellos.

En nuestro caso hemos seguido una sistemática de estudio lo más parecida posible a los procesos de discriminación por comparación simultánea, pero introduciendo sucesión y memoria, para hacer, por otro lado, un estudio comparativo respecto a aquella, ya extensamente estudiada. La línea seguida se acerca por tanto, a la de los trabajos de Uchikawa, pero con algunas diferencias; no solo las ya mencionadas, sino además otras tales como la observación de estímulos en la misma -- área de la retina, con el fin de acercarnos mejor a las condiciones naturales de observación y evitar las posibles asimetrías asociadas a la estimulación de áreas contiguas de la misma.

A la vista de estas consideraciones, se han planteado experiencias encaminadas a abarcar los aspectos mencionados, habiéndose comenzado por el estudio de los umbrales diferenciales de luminancia por comparación sucesiva y la influencia que sobre ellos tenga el tiempo entre exposiciones. Este estudio ha sido posteriormente ampliado al plano de cromaticidad a partir del estudio de umbrales diferenciales de color. La influencia de un campo adaptante acromático frente a la adaptación a la oscuridad, ha sido también analizada, mediante el estudio de los mencionados umbrales para distintos estímulos cromáticos.

El estudio de umbrales diferenciales de color por comparación sucesiva ha sido, en sí mismo, otro de los objetivos de este trabajo para distintos puntos representativos del espacio de color, atendiendo de forma especial a sus características y particularidades.

Por último, un análisis comparativo de umbrales diferenciales de color por comparación sucesiva y simultánea, se ha incluido, ya

sea desde el punto de vista de los datos obtenidos experimentalmente por nosotros, como de los aportados por otros autores.

C A P I T U L O I I I

III.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1.- Características Generales

El dispositivo experimental utilizado para la realización de la presente memoria responde, en términos generales, a las características que usualmente poseen los instrumentos dedicados al estudio de la colorimetría diferencial. Son éstas principalmente la utilización de colorímetros visuales que permitan una gran gama en la obtención de estímulos y alta reproducibilidad de los mismos, un sistema de observación adecuado al tipo de visión requerido, solidez y versatilidad propias para la realización de un gran número de medidas, como es el caso que nos ocupa, así como la posibilidad de calibrado espectroradiométrico del sistema en forma fiable.

Acompañando a ésta serie de características generales de los dispositivos, aparecen las propias asociadas a la materia particular en que se desarrolla la investigación. En nuestro caso, la idea principal que condiciona el montaje es la realización de experiencias en discriminación cromática ya sea por comparación sucesiva de estímulos o simultánea de los mismos. Se hace necesario, pues, compaginar estos dos tipos de presentación de estímulos en una misma concepción del dispositivo experimental, a fin de poder hacer comparables los resultados que se obtengan en un caso u otro.

Como quiera que la mayor parte del trabajo responde al estudio de umbrales diferenciales de color por comparación sucesiva, nos centraremos fundamentalmente en torno al dispositivo experimental diseñado para este caso, haciendo una descripción de las partes y características del montaje experimental, añadiendo una descripción de las modificaciones realizadas en él cuando se trata de estudiar umbrales diferenciales de luminancia por comparación sucesiva o umbrales diferenciales de color por comparación simultánea.

Respecto al estudio por comparación sucesiva de umbrales diferenciales de color, hemos exigido al dispositivo dos características

asociadas directamente al tipo de comparación. Estas son, de una parte, el que los estímulos estudiados exciten siempre la misma zona de la retina tal como se ha justificado previamente, y por otra, el disponer de un sistema de obturación que nos permita regular tanto el tiempo de exposición como la duración de los periodos de tiempo entre presentación de estímulos, lo que nos permite el estudio de formas alternativas de comparación sucesiva, en el sentido de las descritas por Durup y Fessard (1938).

Como característica impuesta al montaje cuando la comparación fue simultánea, es de notar, que el campo de observación, en este caso, fuera circular y bipartito con la idea de hacer posible la comparación de nuestros resultados con los de la mayoría de los autores que han trabajado en esta área, ya que esta forma de campo de observación es la que se encuentra más próxima a la comparación simultánea utilizada en la industria y el comercio.

Como característica común al dispositivo experimental, se le ha añadido un sistema de producción de estímulos que permita la adaptación temporal o espacial del observador.

A fin de sistematizar la descripción del conjunto experimental hemos dividido este en cuatro partes:

- a) Sistema de producción de estímulos
- b) Sistema de observación
- c) Sistema de obturación
- d) Sistema de calibrado

que serán objeto de los siguientes apartados. La figura 3.1 muestra un esquema general del dispositivo. Las características particulares que se han introducido para el estudio de los aspectos específicos mencionados, serán descritas cuando estos sean abordados.

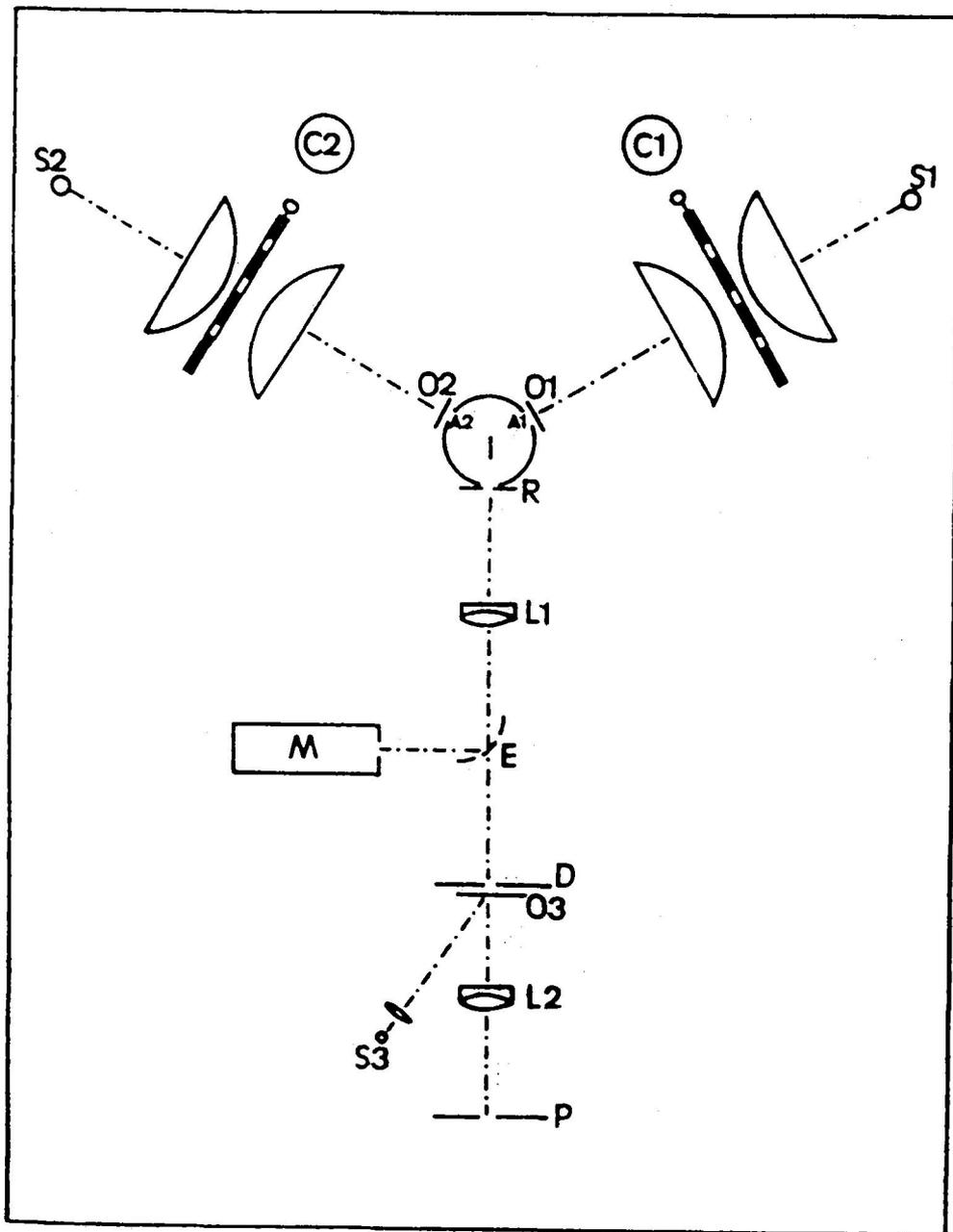


Figura 3.1: Esquema general del dispositivo experimental.

3.2.- Sistema de Producción de Estímulos

La obtención tanto de los estímulos de referencias como de los estímulos que se presentan a comparar con los primeros, se ha realizado mediante el conjunto comprendido por los colorímetros C1 y C2 más la esfera integrante I, tal como se muestra en la figura 3.1.

Los colorímetros mencionados son del tipo Donaldson para colorímetros visuales. Ambos van provistos de lámparas de halógeno SILVANIA FFX 500 w / 220 v, alimentadas a la red através de un estabilizador BOAR - 2000ST (0,3% de precisión de regulación, margen de tensión de entrada 190 - 260 v, margen de frecuencia 45 - 55 Hz). La curva de emisión espectral relativa de este tipo de lámparas se muestra en la figura 3.2, conforme al calibrado realizado de una de ellas en el Instituto de Optica "Daza de Valdés" del C.S.I.C.

Cada colorímetro consiste básicamente en un sistema portador de filtros que incluye la posibilidad de dejar pasar más o menos energía luminosa procedente de cada uno de ellos mediante diafragmas, y un sistema óptico de lentes asociado al mismo. Este sistema óptico consiste en una pareja de lentes condensadoras, que en el caso de C1 tienen de focales 37,5 y 47,5 cm y 20 cm de diametro, y en el caso de C2 una focal para cada lente de la pareja de 30 cm y diametro de 15 cm. La colocación de la lámpara en el colorímetro es tal que se sitúe en el foco objeto de la primera de las lentes, de manera que sobre los filtros incida luz colimada.

Entre las dos lentes de cada colorímetro se sitúa una placa metálica en la que se alojan los tres filtros, rojo, verde y azul, en orificios apropiados. Estos filtros serán los responsables de la cromaticidad de los primarios a utilizar. Sobre cada uno de los orificios, la placa lleva colocados diafragmas de apertura variable, lo que nos permite la obtención de estímulos en una gran variedad de posibilidades, combinando la luz que de cada uno de los filtros deja pasar los diafragmas. Las figuras 3.3 muestran las placas metálicas portadoras de filtros de los colorímetros C1 y C2, con el sistema de diafragma de apertura variable de cada uno de ellos.

Mediante la segunda lente del condensador de cada colorímetro - se hace incidir la luz proveniente del sistema sobre el orificio de entrada de la esfera integradora, donde se realizará la mezcla de las luces que dejan pasar los filtros en las cantidades que regulan los diafragmas. A fin de aprovechar al máximo la luz emitida por las lámparas, se han situado los colorímetros con respecto a la esfera integrante de tal forma que la imagen final del filamento se forme sobre los orificios de entrada de la esfera. En estos orificios circulares A1 y A2 - de 1,5 cm de radio se han situado sendos vidrios difusores, a fin de - que la luz entre ya en la esfera parcialmente difundida, así como proteger el interior de la misma.

La esfera integrante I en la que se realiza la fusión de los primarios, está recubierta en su interior de MgO, sobre una superficie - cromada de acuerdo con las normas convencionales en este sentido, Keitz (1955). El diametro de la esfera es de 15 cm, estando los orificios de entrada y el de salida en el mismo plano a 120°. Sobre el orificio de salida se ha colocado una rendija R de anchura variable, fijada en 2,5 mm para las experiencias.

Los filtros utilizados en ambos colorímetros son de la casa SCHOTT interferenciales modelo AL (20 nm de ancho de banda) cuyas curvas de - transmitancia se muestran en las figuras 3.4. Es de notar que el conjunto de filtros es idéntico en ambos colorímetros, debido a que hemos estado interesados, a fin de evitar problemas adicionales, Hita et al. (1977), en partir de igualaciones isómeras a la hora de determinar umbrales diferenciales de color.

Los colorímetros han sido convenientemente refrigerados por ventiladores, a fin de evitar el calentamiento excesivo de los filtros, - lo que podría originar cambios en sus curvas de transmitancia espectral, J. Juan (1974). Por otra parte se han tomado precauciones para aislar los colorímetros del resto del sistema y evitar así luces parásitas.

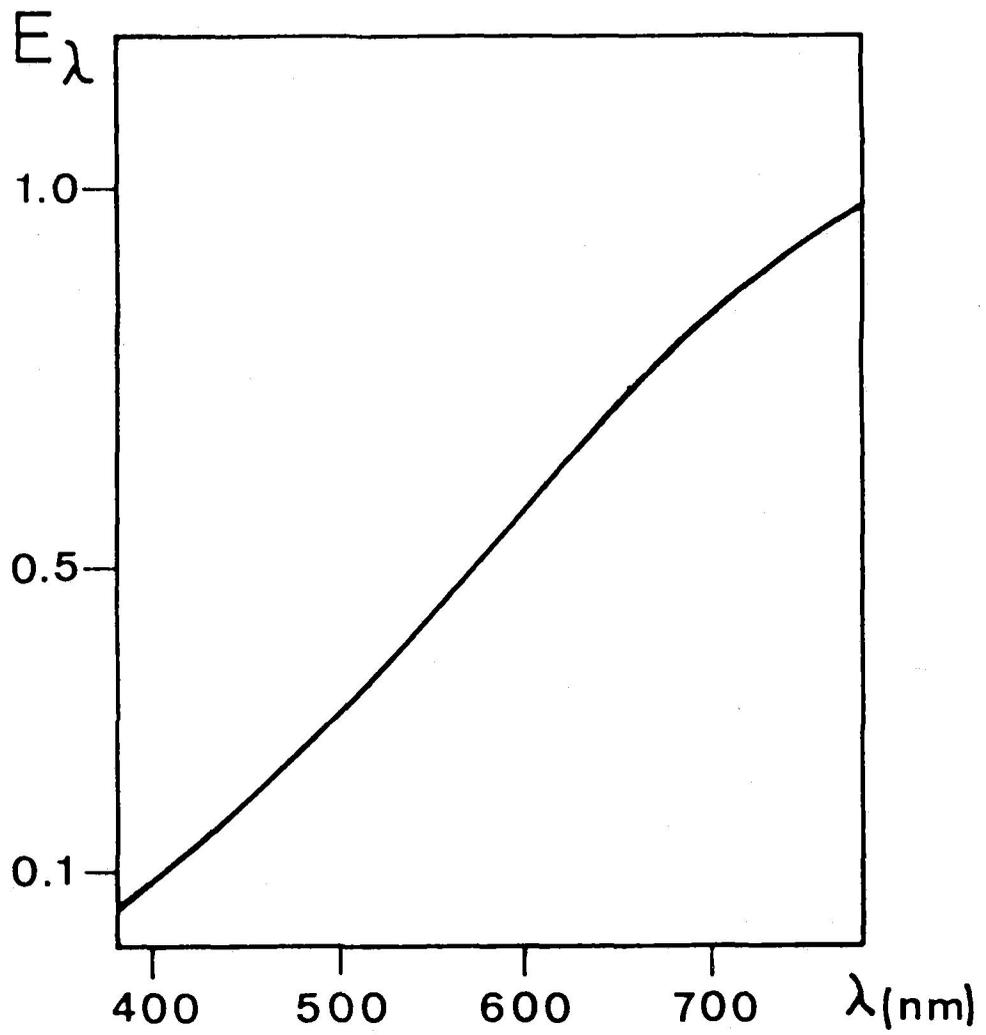


Figura 3.2: Curva de emisión espectral de las lámparas utilizadas en los colorímetros.

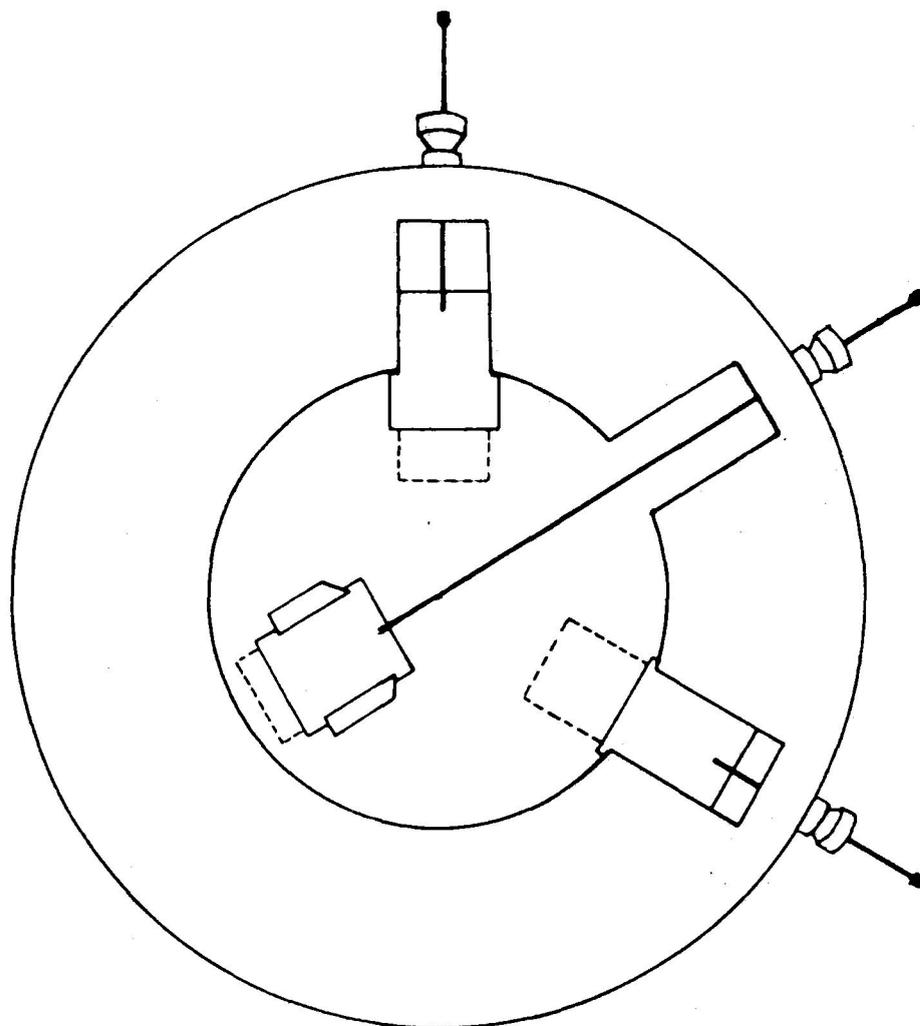


Figura 3.3.a: Placa portadora de filtros del colorímetro C1.

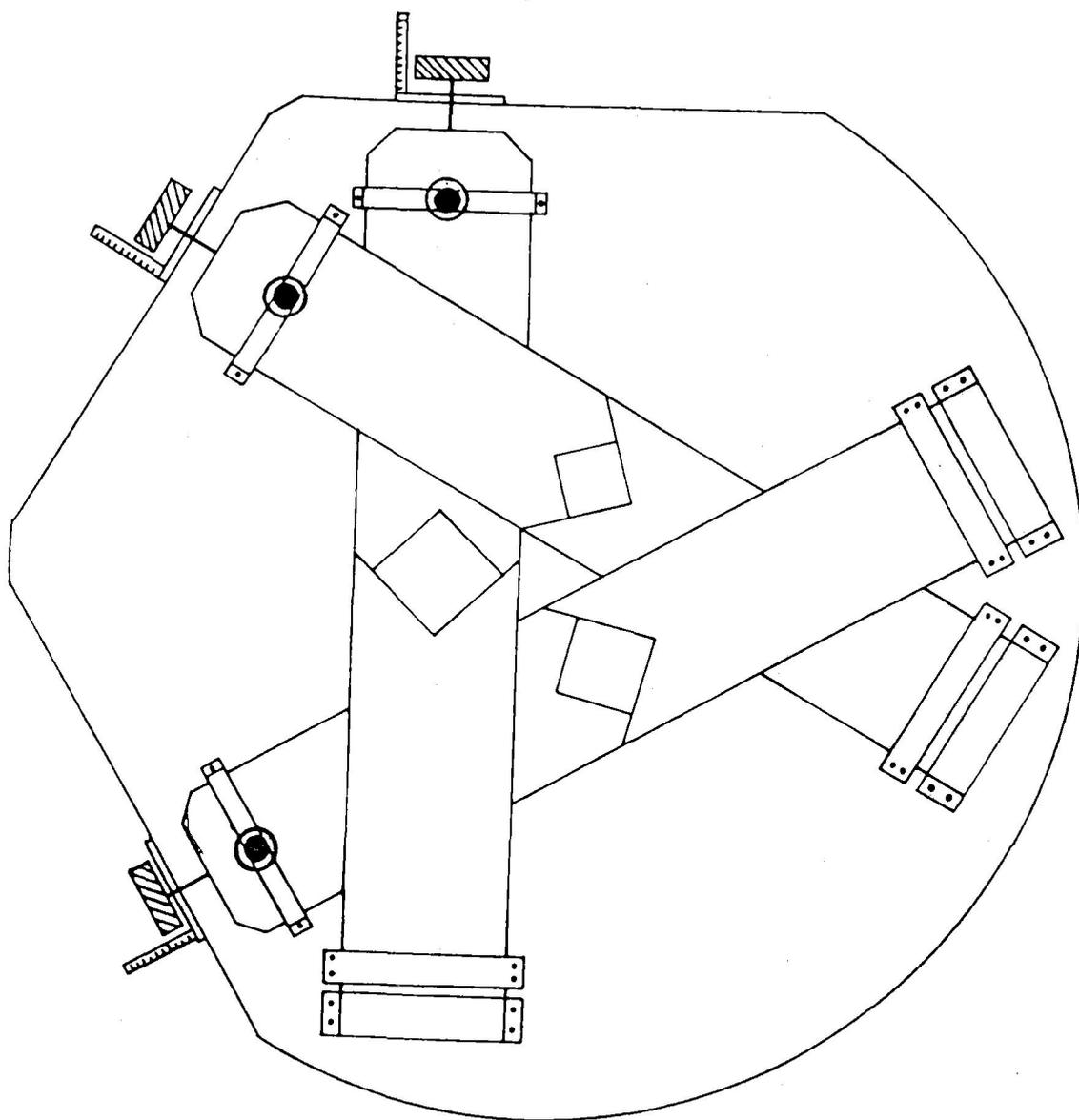


Figura 3.3.b:Placa portadora de filtros del colorímetro C2.

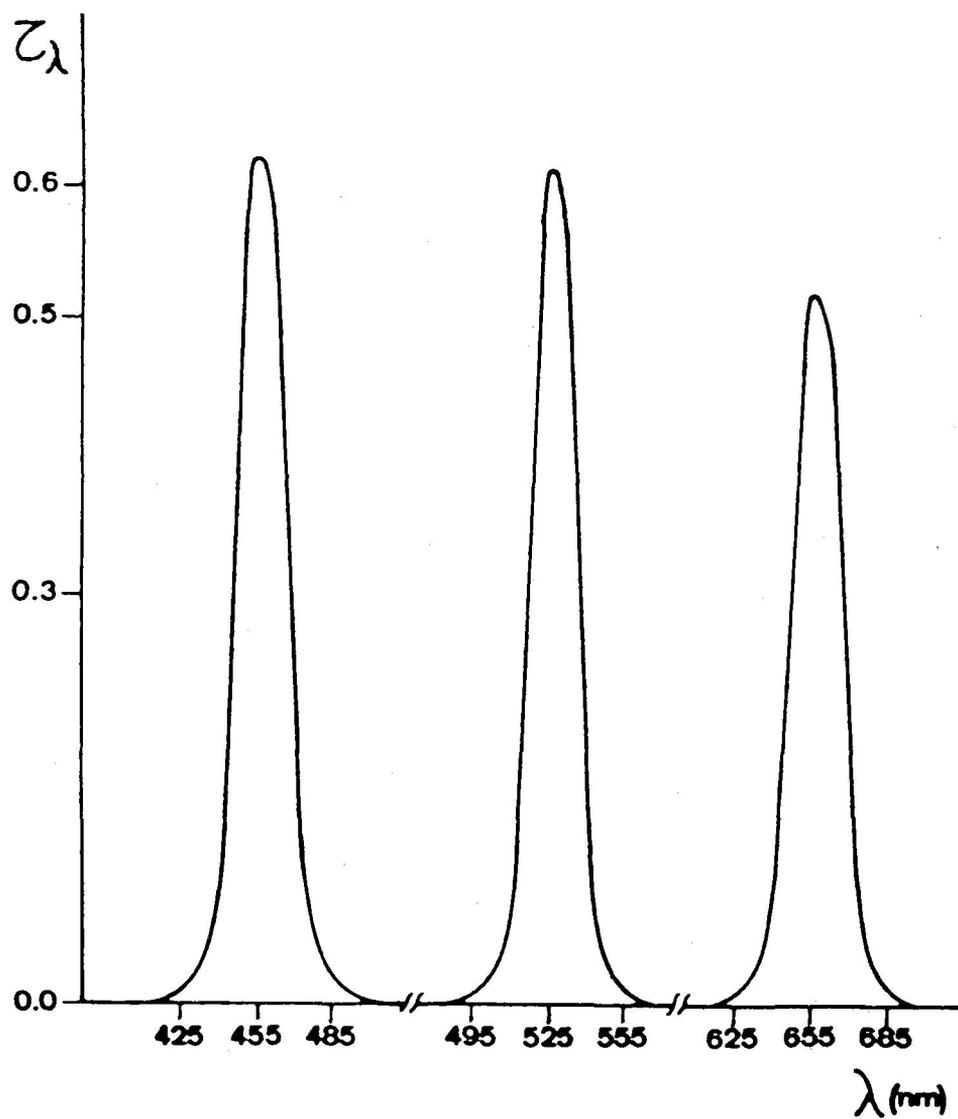


Figura 3.4: Curvas de transmitancia espectral de los filtros utilizados en los colorímetros.

3.3.- Sistema de Observación

Como se ha indicado anteriormente, el tipo de observación utilizada en la realización de las experiencias fue el de visión maxwelliana. Las razones de esta elección están basadas en que de esta forma conseguimos iluminar de manera uniforme una determinada área, siempre la misma, de la retina, condición necesaria a la hora de trabajar en problemas asociados a los mecanismos de visión del color. Para conseguir este tipo de visión es preciso un sistema óptico que permita la mencionada iluminación uniforme de la retina, en nuestro caso -foveal, y un sistema mecánico de fijación de la cabeza, a fin de que los estímulos exciten dicha zona y no otra, lo que garantiza este tipo de observación.

Se dispone, para ello, de un sistema de lentes acromáticas L1 y L2 (figura 3.1), de 127 y 180 mm de focal respectivamente, de tal forma que la rendija de salida de la esfera R se sitúe en el foco -objeto de L1, con lo que obtenemos un haz colimado. Dicho haz es recogido, tras pasar a través del diafragma circular D que regula el tamaño y forma del campo, por la lente L2, la que tiene su foco imagen -en la pupila artificial de salida P sobre la que se sitúa el ojo del observador. Esta pupila artificial consiste en un orificio de 3 mm -de diámetro en nuestro caso.

Por otra parte, como hemos indicado para la visión maxwelliana, el observador ha de mantener su cabeza fija durante las experiencias. Para conseguir esto, se ha utilizado una dentonera, fijada a la mesa del dispositivo, que posee movimiento en el plano perpendicular al eje óptico del sistema. Este movimiento, de tipo horizontal y vertical, nos permite la colocación correcta de la cabeza, en el sentido de acoplamiento de la pupila de salida del sistema y de entrada al ojo, fijando, una vez conseguido esto, los mecanismos de cremallera que permiten los movimientos mencionados.

El tamaño del campo se fijó en 3,5º, siendo su forma circular. El observador, en estas condiciones, ve el estímulo que se le ex-

pone como un círculo de cromaticidad uniforme en un campo circundante oscuro.

Para el caso en el que se estudiaron los umbrales diferenciales de color por comparación sucesiva con adaptación a un iluminante tipo A, se añadió al dispositivo una lámpara de incandescencia (3.5 v, 0.3 A), que viene representada por S3 en la figura 3.1. Dicha lámpara está seguida de un difusor a fin de borrar el filamento de la misma e iluminar uniformemente la placa sobre la que se ubica el diafragma D. Esta placa fue recubierta de MgO, lo mismo que la placa del obturador O3, de forma que cuando este estuviera cerrado, el observador quedara adaptado a un campo uniforme acromático, y cuando el obturador se abriera, apareciera el campo circular cromático rodeado de un campo circundante acromático.

3.4.- Sistema de Obturación

Con objeto de obtener el modo de presentación de los estímulos deseado, se diseñó un sistema de obturación que permitiera la presentación sucesiva de los mismos y cierta versatilidad para el posible estudio de otros modos de presentación, además de posibilitar la observación con campo adaptante uniforme. Con este propósito, el sistema de obturación consta de tres obturadores 01,02 y 03, situados los dos primeros en las entradas de la esfera y el último sobre el diafragma que limita el tamaño y la forma del campo. Los tres van controlados por un generador de impulsos eléctricos y una puerta tipo OR.

Cada obturador es de tipo electromagnético, consistente en una bobina que al ser alimentada por el generador de pulsos actúa como electroimán, atrayendo a una barra de hierro a la que va unida la chapa obturadora. De esta forma, o bien se deja pasar a la esfera la luz proveniente de los colorímetros en el caso de 01 y 02, o bien se deja llegar al observador la luz proveniente de la esfera, para 03.

El generador de pulsos está diseñado de forma tal que de secuencias de los mismos en dos salidas alternativamente. Es decir, que tras generar un pulso por una de las salidas, el siguiente pulso sea generado por la otra, no pudiéndose nunca superponer pulsos de una y otra salida.

Tanto la duración de los pulsos, como el intervalo de tiempo entre ellos son regulables de forma continua, extendiéndose los primeros de 0 a 15 s aproximadamente, y los segundos de 0 a 40 s. La figura 3.5 muestra un esquema del generador de pulsos y de sus salidas.

La puerta OR fue diseñada con el fin de poder trabajar con campo adaptante y además hacer independiente de la inercia de los obturadores 01 y 02, la duración de los estímulos expuestos y el tiempo entre ellos. Su diseño y construcción fue realizado en nuestro laboratorio y su esquema se puede observar en la figura 3.6.

Dos han sido las formas en las que se ha trabajado con este sistema de obturación. Por una parte, y para el estudio de la influencia

del tiempo entre estímulos a comparar sobre el umbral diferencial de luminancia, se conectaron las salidas del generador de pulsos a los obturadores O1 y O2 respectivamente. Así mismo, las salidas del generador de pulsos alimentaban a la puerta OR, la que tenía a su vez la salida conectada al obturador O3. De esta forma, a cada pulso del generador se activaban el obturador correspondiente (O1 u O2) y el obturador O3.

La segunda forma de trabajo, se llevó a cabo cuando se utilizaba un solo colorímetro, en el caso de estudiar umbrales diferenciales globales de color por comparación sucesiva, sirviendo este para producir el estímulo de referencia y el variable. En este caso las dos salidas del generador de pulsos son directamente las entradas de la puerta OR, a la que se le añadió una nueva salida en paralelo a la original, con lo que se alimentaban para cada pulso del generador simultáneamente O2 y O3.

En cualquiera de los casos, el calibrado del sistema de obturación, es decir, de los tiempos de duración de los pulsos, así como de los periodos entre ellos, fue realizado sobre el montaje experimental, colocando una célula fotoeléctrica unida a un reloj de alta sensibilidad GRIFFIN-GEORGE TKL-900V, detrás del obturador O3. De esta manera se tienen en cuenta las inercias mecánicas debidas a los obturadores, realizándose una medida real de los tiempos de presentación. La precisión en la medida de los tiempos seleccionados en el generador de pulsos fue estimada en un 1%.

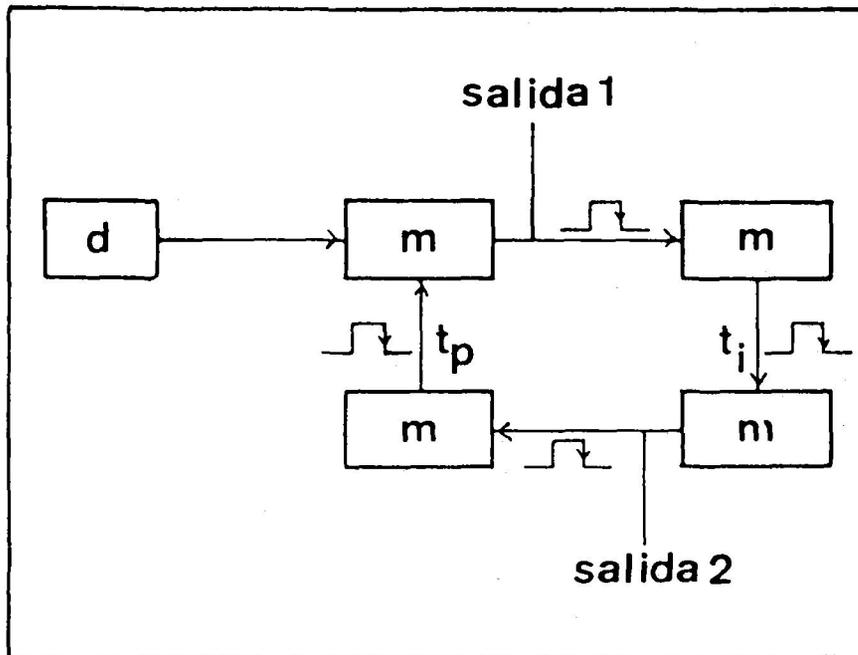


Figura 3.5.a: Esquema del generador de pulsos. d: disparador; m: monoestable; t_i : tiempo intermedio; t_p : tiempo entre comparaciones.

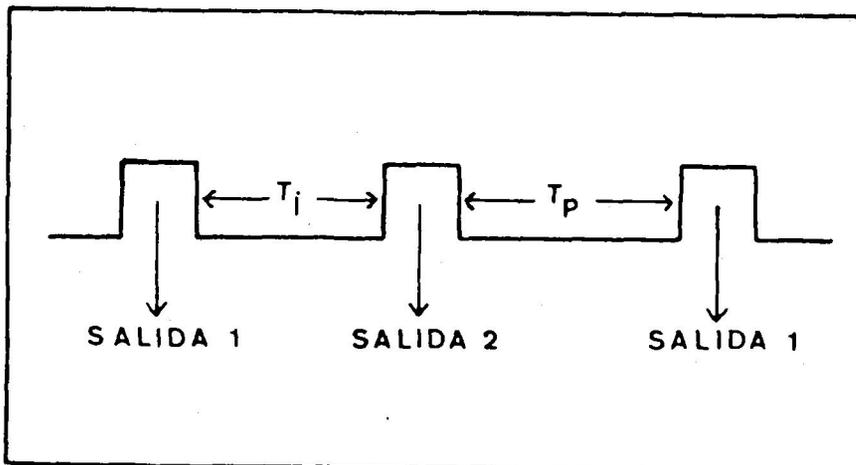


Figura 3.5.b: Esquema de las salidas del generador de pulsos. T_i : tiempo intermedio; T_p : tiempo entre comparaciones.

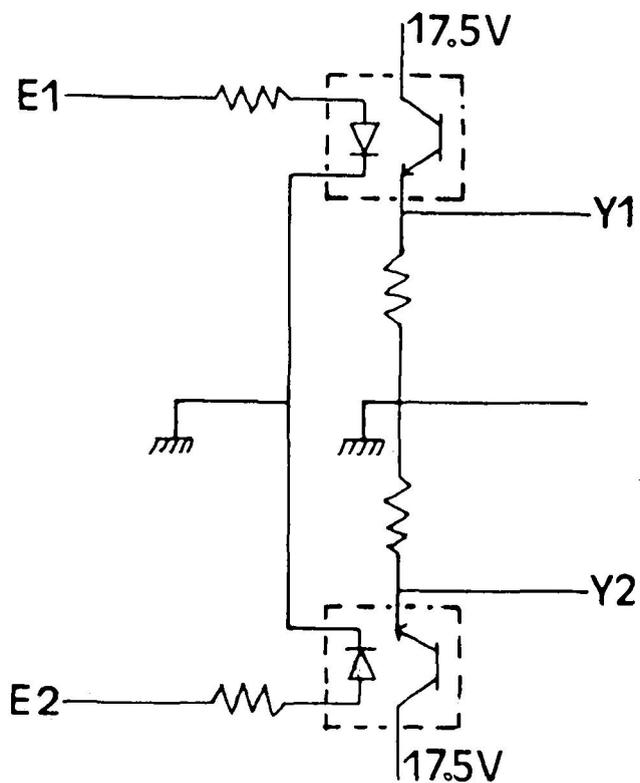
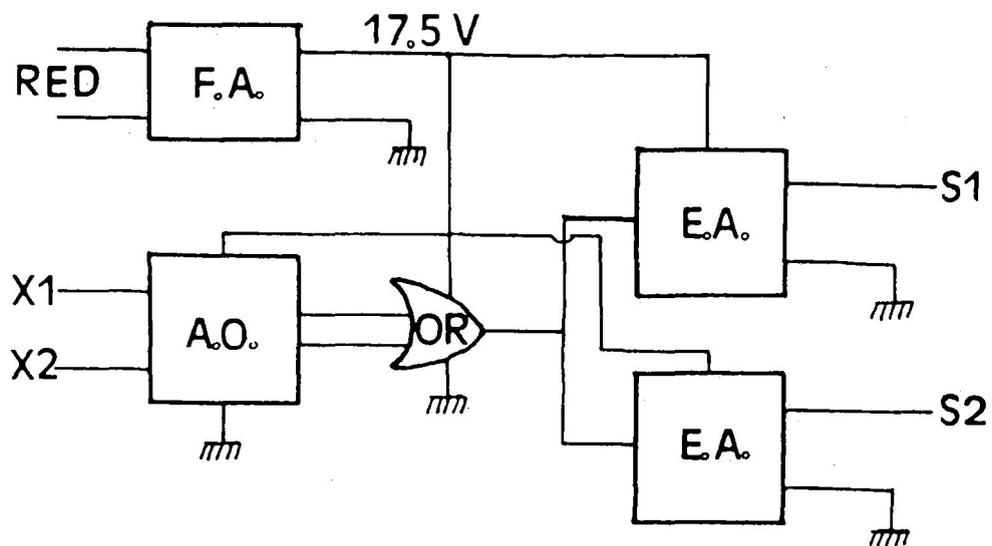


Figura 3.6: Esquema de la puerta OR. F.A.: fuente de alimentación; A.O.: acoplo óptico; E.A.: etapa de amplificación. Se incluye detalle del acoplo óptico.

3.5.- Sistema de Calibrado de Estímulos

A.- Descripción General

El calibrado del dispositivo experimental podemos dividirlo en dos partes, una de medida experimental sobre el dispositivo, y otra de cálculo por ordenador de las coordenadas de cromaticidad y luminancia relativa de los estímulos analizados.

Para la primera, es decir la medida en el laboratorio de la radiancia relativa de los estímulos se ha dispuesto de un sistema formado por el espejo cóncavo E (de 8 cm de focal) y el espectrorradiómetro M (figura 3.1). Consiste este último en un monocromador JOBIN- YVON HV-20, de red de difracción (1200 líneas/mm), el cual separa espectralmente el haz incidente en su rendija de entrada, con una resolución de 2, 4 u 8 nm según las rendijas que utilicemos a la entrada y salida. Acoplado a él se dispuso, sobre la rendija de salida, un fotodiodo de Silicio, EG&G modelo 4000-B (1 cm², responsividad 10⁷ v/w R_f = 200 MΩ a 230 nm, corriente de oscuridad 5 pA, impedancia de salida 500 Ω) que incluye etapa de amplificación. La señal del fotodiodo es amplificada mediante un amplificador operacional y recibida sobre un dispositivo indicador digital RACAL-DANA 4003 (resolución 1μ v, precisión 0.04%, 10 MΩ impedancia de entrada en continua), con el que se realizaron las lecturas.

La elección del monocromador y fotodiodo mencionados se basa, de una parte, en las necesidades que se nos plantearon a la hora de llevar a cabo la experimentación que nos ocupa, y de otra las posibilidades que ofrecen las características de los mismos. Así, como se ha indicado, el monocromador permite resoluciones en el espectro visible del orden de 2, 4 y 8 nm, según utilicemos las rendijas de las que va provisto de 0.5, 1 o 2 mm, resoluciones que se ajustan muy bien a las necesidades que en colorimetría se plantean. En este sentido se han realizado calibrados de 5 en 5 nm en un principio, y posteriormente de 10 en 10 nm, debido esto último a que de esta forma obtenemos mayores valores de la señal del fotodiodo, basándonos previamente para ello en que los cálculos de las coordenadas de cromaticidad -

no varían sustancialmente, dentro de nuestras pretenciones, tal como ha indicado Seve (1982) y verificado en el caso que nos ocupa.

Por otra parte, se ha elegido un fotodiodo de Silicio como elemento fotosensible frente a otro dispositivo de alta respuesta, como pudiera ser un fotomultiplicador, debido a que si bien estos suelen presentar sensibilidades más altas y menor nivel de ruido, los fotodiodos presentan las ventajas de mayor estabilidad, menor dimensión y peso, mejor estabilidad antichoque, resistencia frente a vibraciones y prácticamente carecer de efecto micrófono, Zaidel (1979).

Evidentemente, la respuesta que registremos sobre el elemento de lectura no es una medida directa de la radiancia espectral del estímulo. Los distintos elementos del sistema presentan respuestas selectivas a lo largo del espectro que habrán de tenerse en cuenta a la hora de obtener una medida correcta, es decir, la absorción espectral del espejo E, la efectividad del monocromador y la respuesta espectral del fotodiodo. Estas tres características de elementos del sistema de calibrado serán objeto de descripción en los siguientes apartados.

B.- Medida del Factor de Reflexión Espectral Relativo del Espejo

El dispositivo experimental utilizado para medir la absorción espectral del espejo, se muestra en la figura 3.7. Consta de una lámpara de incandescencia estabilizada S, que ilumina, tras un difusor, una rendija R de anchura variable. A continuación se disponen dos lentes acromáticas L1 y L2 de igual focal (127 mm). El espejo se sitúa posteriormente en el banco óptico a 45° con éste, y el monocromador con el fotodiodo y los instrumentos de medida en un banco a 90°, como se indica en la figura. De esta forma se consigue formar la imagen final de la rendija R sobre la rendija de entrada del monocromador, fijando el tamaño de R de forma tal que tengan el mismo tamaño la imagen final y la rendija de entrada al monocromador. La disposición de las lentes y el espejo es tal que la imagen dada por L2 sea del mismo tamaño que la que da el espejo.

En estas condiciones se barre el espectro visible, registrando las medidas que da el espectrorradiómetro. A continuación se repiten las medidas pero situando el monocromador sobre el banco óptico en el que se ubican las lentes y la rendija, y retirando el espejo. Se coloca entonces el monocromador con su rendija de entrada sobre la imagen de R que da L2. Por lo tanto, el factor de reflexión espectral del espejo vendrá dado por el cociente entre la medida con espejo y la medida sin espejo.

Este calibrado se realizó trabajando con una resolución en el monocromador de 4 nm, tomando intervalos de 10 nm. Como quiera que no estamos interesados en medidas radiométricas absolutas, hemos normalizado los resultados al valor más alto, presentándose la curva representativa de los mismos en la figura 3.8.

C.- Respuesta Espectral de la Fococélula. Efectividad del Monocromador

Para la efectividad del monocromador hemos tomado la curva que el fabricante suministra de este parámetro. La curva del fabricante se da en la figura 3.9, cayendo dentro del comportamiento que normalmente presenta una red de difracción por reflexión para la efectividad.

Respecto de la respuesta espectral del fotodiodo de Silicio, se llevó a cabo su medida en el Instituto de Optica "Daza de Valdés". Los resultados, dentro del espectro visible, se muestran en la figura 3.10, donde se observa que ésta es creciente a lo largo del espectro, lo que genera en nuestro caso valores más bajos en las medidas para las longitudes de onda cortas en el visible.

La linealidad de la fotocélula fue comprobada sobre el dispositivo, haciendo incidir sobre ella un determinado estímulo y variando la intensidad que le llega mediante polarizadores. Se obtiene una alta correlación en el ajuste lineal entre la respuesta de la fotocélula y la intensidad incidente.

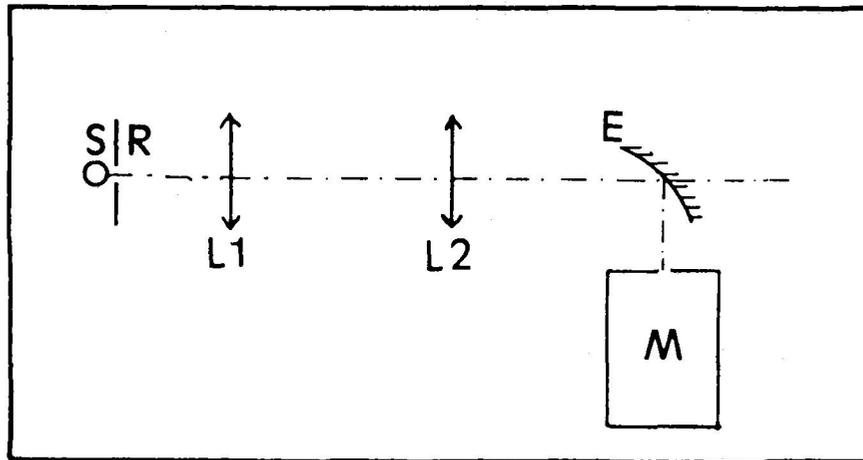


Figura 3.7: Esquema general del dispositivo para la medida del factor de reflexión espectral del espejo.

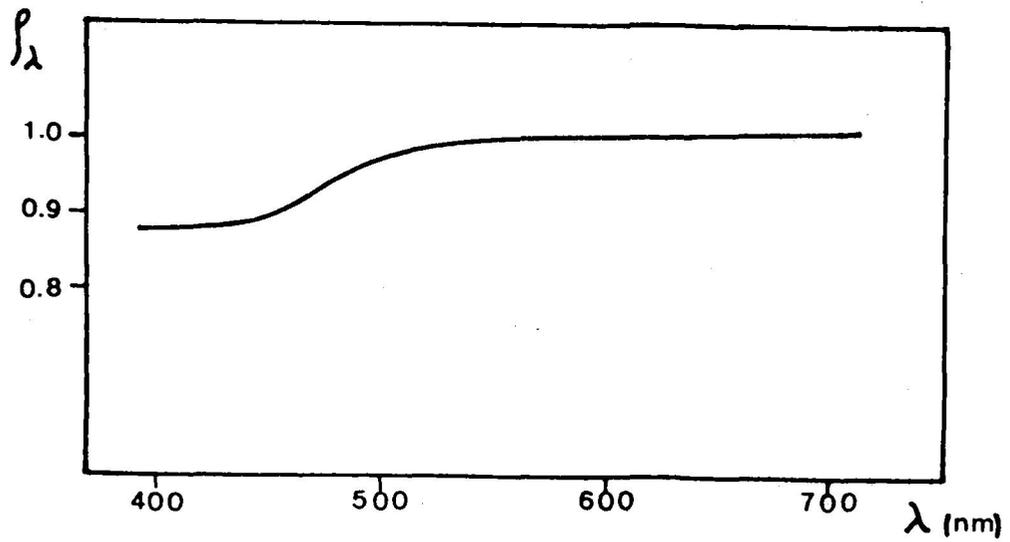


Figura 3.8: Curva del factor de reflexión espectral relativo del espejo.

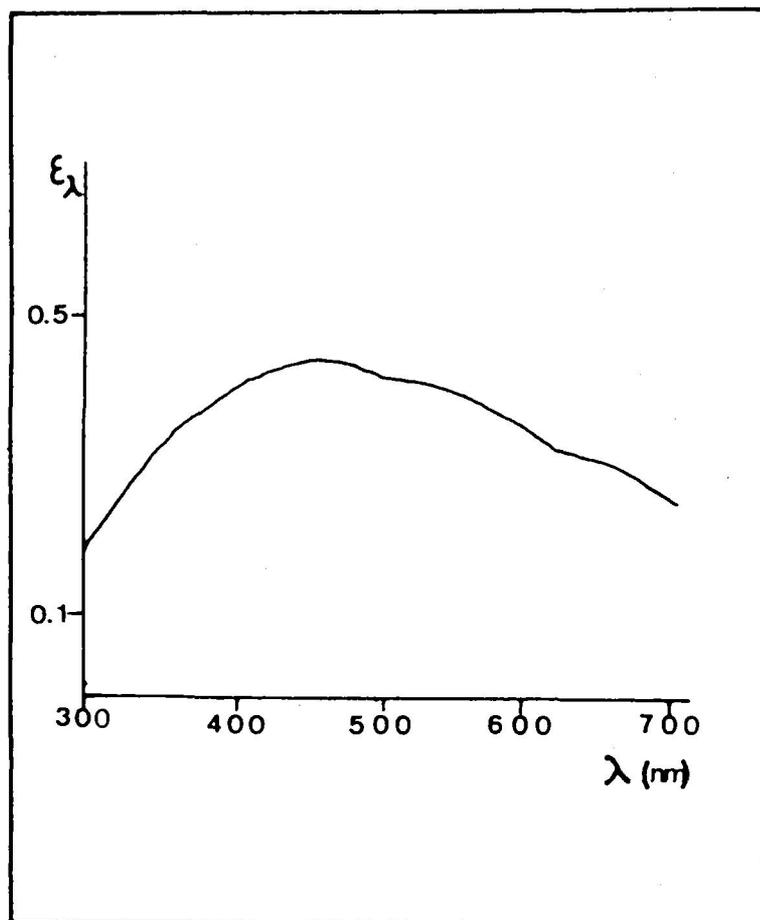


Figura 3.9: Efectividad espectral del monocromador.

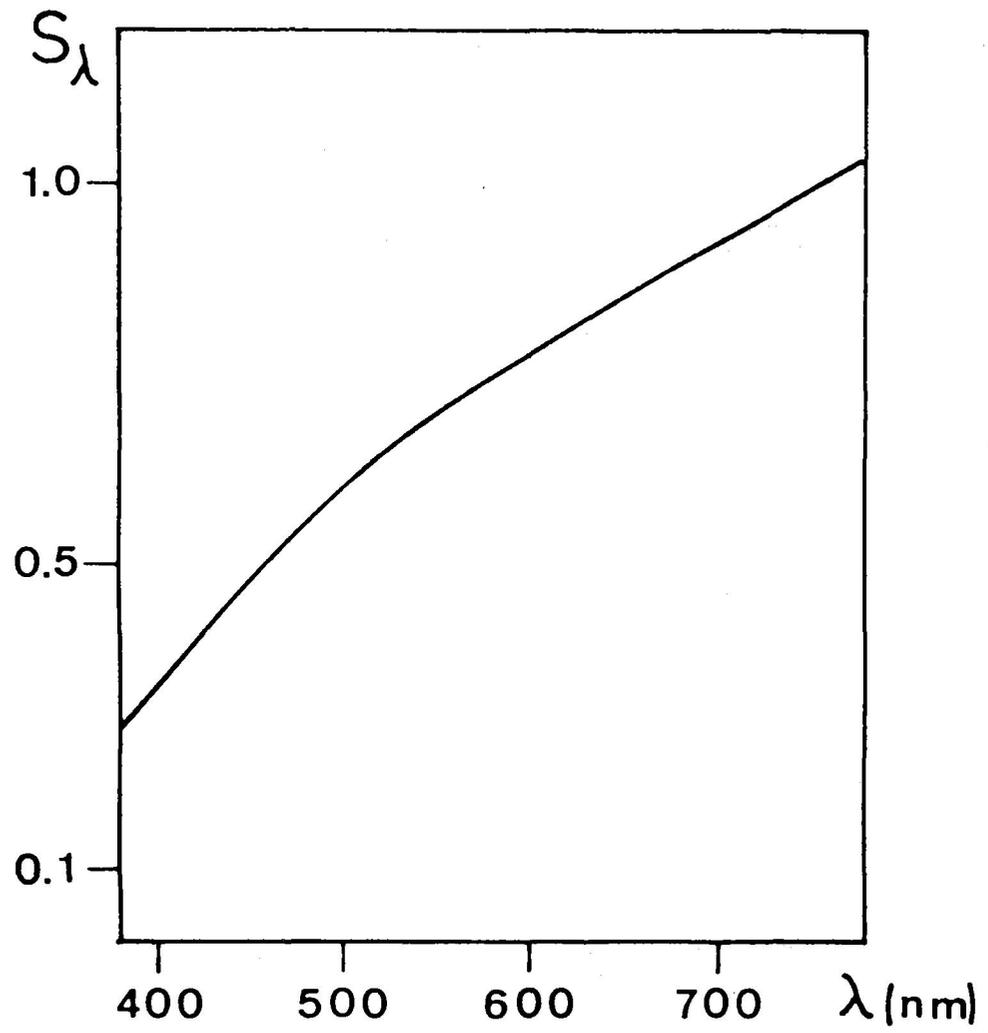


Figura 3.10: Sensibilidad espectral del fotodiodo de Si.

D.- Realización de Calibrados

La radiancia espectral de los estímulos provenientes de la esfera integrante, ya procedieran de uno u otro colorímetro, fue determinada mediante la inclusión en el banco óptico que soporta el sistema de observación del espejo cóncavo E, de forma tal que intercepte el haz colimado emergente de L1, como se indica en la figura 3.1. El haz se dirige hacia la entrada del monocromador M, sobre cuya rendija de entrada se forma la imagen de R.

En estas condiciones, la radiancia espectral relativa del estímulo vendrá dada por:

$$R_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{\rho_{\lambda} \epsilon_{\lambda} S_{\lambda}}$$

donde M_{λ} es la medida en mv sobre el multímetro, ρ_{λ} el factor de reflexión del espejo, ϵ_{λ} la efectividad del monocromador y S_{λ} la respuesta espectral del fotodiodo.

Al colorímetro C2, por su condición de ser el que proporciona los estímulos a comparar con el de referencia, se le ha exigido una gran reproducibilidad, es decir, que proporcione siempre que se sitúen los mandos en una misma posición el mismo estímulo bajo el punto de vista radiométrico. Por otra parte, debido al número elevado de estímulos que se analizan durante las experiencias, se ha implicado la necesidad del calibrado global del mismo, realizándose el cálculo de las coordenadas de cromaticidad de los estímulos utilizados para la determinación de un umbral diferencial, mediante ordenador. Para ello, se procede a calibrar la luz proveniente de cada uno de los filtros por separado, para las distintas posiciones de los mandos que regulan los diafragmas. De esta forma se obtienen matrices, una para cada filtro, en las que las filas representen posiciones del mando y las columnas longitudes de onda seleccionadas para el calibrado, siendo los elementos de las matrices las radiancias obtenidas para cada longitud de onda y posición de mando, tras tener en cuenta la curva de respuesta espectral del fotodiodo, el factor de reflexión del espejo y la efectividad del monocromador.

De esta forma , y ayudado por el hecho de que los filtros utilizados no solapan sus curvas de transmisión, podemos determinar la radiancia espectral de un estímulo sin más que conocer las posiciones de mando de los diafragmas que regulan las cantidades de cada primario azul, verde y rojo. La radiancia espectral del estímulo será la suma de ellas, con lo que será inmediato determinar sus valores trisúmulos y coordenadas de cromaticidad.

En cualquier caso la reproducibilidad de los calibrados fue probada realizándose medidas en las que determinadas posiciones de mando del colorímetro fueran repetidamente colocadas, ya fuera en el sentido de cerrar o abrir el diafragma. Además, la reproducibilidad del calibrado fue probada a lo largo del tiempo en que está encendido el colorímetro durante una sesión de experimentación (alrededor de 20 m), comprobándose la no influencia del tiempo que esté conectada la lámpara, ni el posible calentamiento de los filtros, si bien previamente se habían envejecido las lámparas, y por otra parte, la temperatura se estabiliza rápidamente por la acción del sistema de refrigeración.

Para todos los casos, ya fueran con el colorímetro C1 como con el C2, las longitudes de onda seleccionadas fueron siempre las mismas. Distintos calibrados del dispositivo fueron realizados a lo largo del desarrollo de la experimentación, siendo de 5 en 5 nm en el estudio primero de umbrales diferenciales de luminancia por comparación sucesiva y de 10 en 10 nm en el resto. Las longitudes de onda para el primero de los casos se especifican en la tabla III.I, siendo las seleccionadas en el segundo las marcadas con asterisco.

TABLA III.I: Longitudes de Onda seleccionadas en los Calibrados.

<u>FILTRO</u>	<u>λ (nm)</u>
	440
	445*
	450
Azul	455*
	460
	465*
	470
	<hr/>
	510
	515*
	520
Verde	525*
	530
	535*
	540
	<hr/>
	640
	645*
	650
Rojo	655*
	660
	665*
	670

3.6.- Modificaciones al Dispositivo para la Determinación de Umbrales Diferenciales de Color por Comparación Simultanea

A la hora del estudio de los umbrales por comparación simultánea de estímulos ha sido preciso modificar el dispositivo experimental, a fin de adecuarlo a las necesidades que exige este tipo de presentación. En la figura 3.11, se muestra un esquema del dispositivo utilizado, - donde se puede apreciar como modificación principal la inclusión de - un nuevo bloque destinado en este caso, a establecer los estímulos de referencia.

Consta este bloque de un colorímetro tipo Donaldson análogo a - los anteriores, C3, cuya placa portadora de filtros se muestra en la figura 3.12, y cuyo condensador está formado por lentes de 34 cm de - focal y 23 cm de diametro. En este colorímetro se colocan los filtros que anteriormente se colocaban en C1, con el fin de seguir trabajando en condiciones de igualación isómera de partida.

Igualmente a lo ya descrito, se dispone de una esfera integrante I', análoga a I, con el mismo tipo de recubrimiento, y una lente acromática L1' colimadora, igual a L1 (127 mm de focal). De esta forma, los estímulos procedentes de un brazo y otro se producen mediante dispositivos experimentales análogos.

A fin de hacer posible la comparación de los estímulos procedentes de uno y otro colorímetro, se situa sobre el banco un dado fotométrico K, que transmite en una de sus mitades el haz colimado procedente de L1 y en la otra, refleja el procedente de L1' en la dirección - de observación, con lo que obtenemos la yuxtaposición de ambas luces. En estas condiciones, el observador verá a través de L2, un campo circular, dividido verticalmente y limitado por el diafragma D.

Con respecto a los calibrados, todo lo dicho anteriormente se - mantiene, si bien en este caso el espejo se situa detrás del dado, para poder calibrar ambos estímulos sin tener que variar la posición - del monocromador y tener en cuenta la transmisión y reflexión del dado en las medidas, con lo que se hace una medida real de los estímulos que llegan al observador.

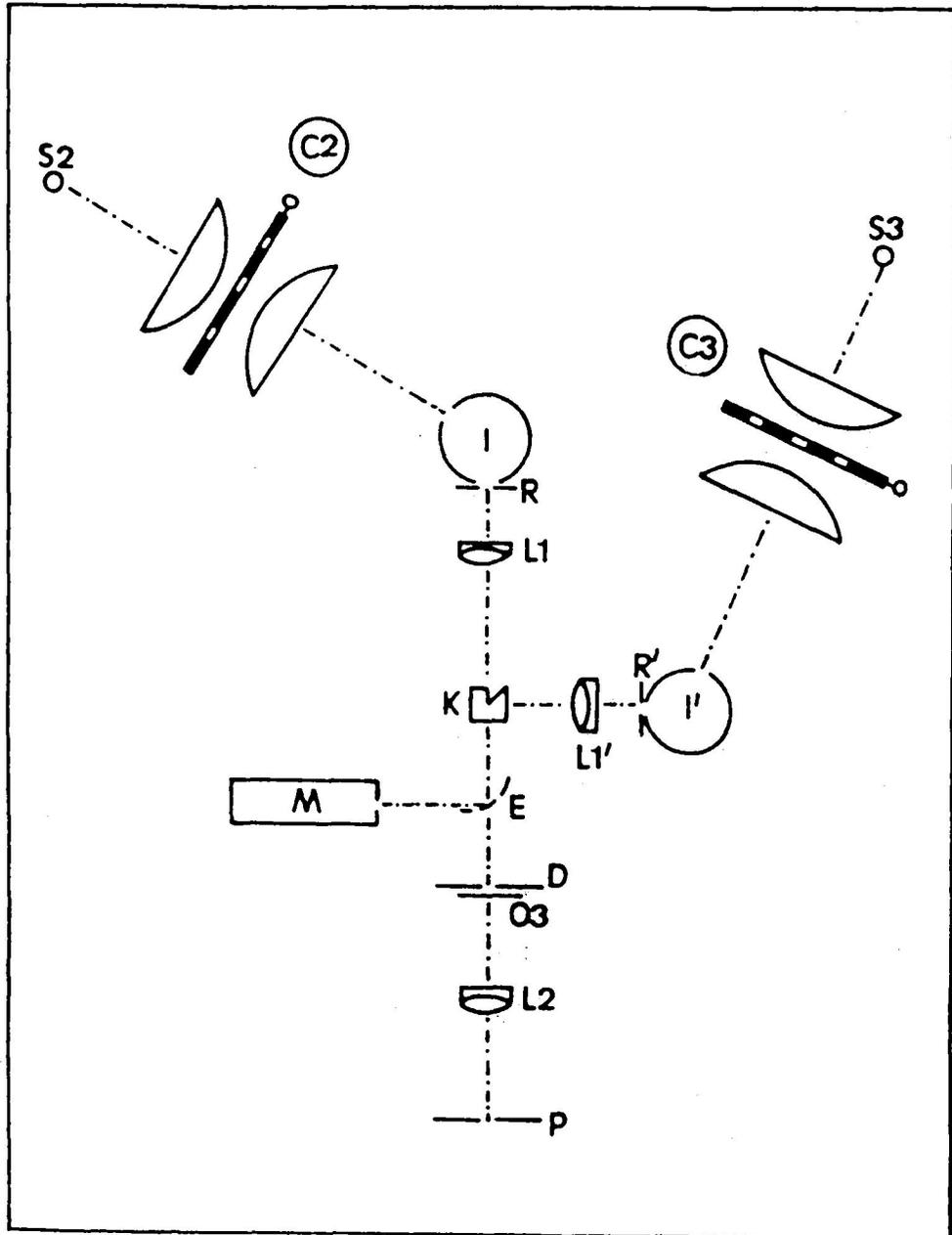


Figura 3.11: Esquema general del dispositivo experimental para el estudio de umbrales diferenciales de color por comparación simultánea.

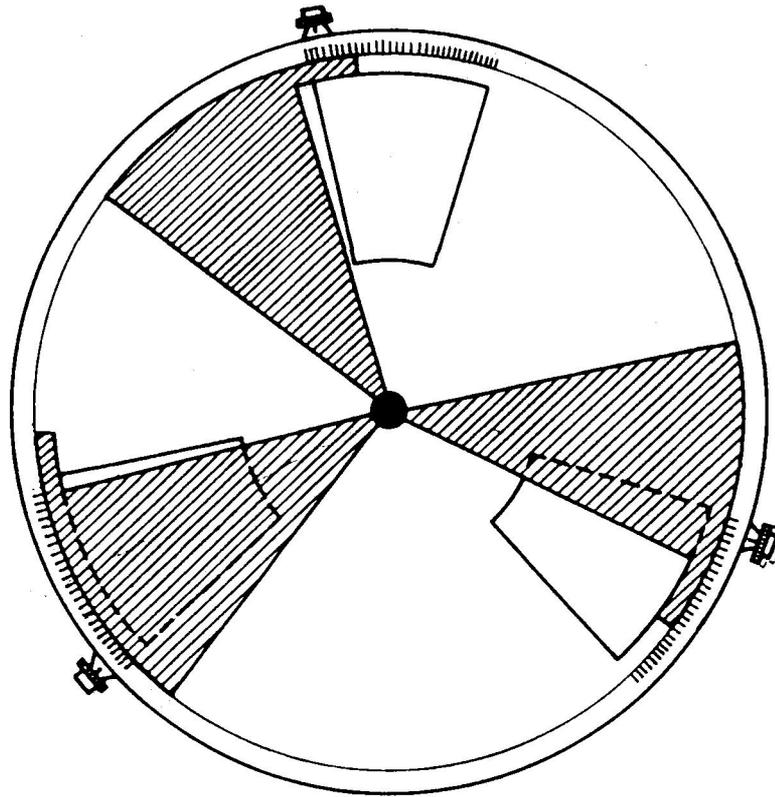


Figura 3.12: Placa portadora de filtros del colorímetro C3.

3.7.- Puesta a Punto del Dispositivo

Aunque, muchas de las características de los elementos del dispositivo experimental y de las precauciones que han de tenerse en cuenta a la hora de hacer las medidas, han sido ya descritas a lo largo de la exposición de este capítulo, hemos considerado interesante presentar una visión global de todo lo relacionado con la puesta a punto del dispositivo y la verificación correcta de la experimentación.

Pretendemos apuntar tanto las peculiaridades del dispositivo que influyen en su puesta a punto, como los errores asociados a la experimentación y, en su caso, como se han tratado de evitar. Seguimos un orden sobre el dispositivo y la experimentación atendiendo a la naturaleza de lo estudiado según sean consecuencias de las características de los instrumentos, de la propia puesta a punto del dispositivo o del cálculo, en sí, de los valores triestímulos.

Pasando a esta descripción, con referencia al sistema de iluminación, se ha asegurado la constancia en la emisión de las lámparas mediante el uso del estabilizador (0.3% de precisión), cuya tensión de salida ha permanecido fijada en 220 v durante el desarrollo de las experiencias. De otro lado, se ha vigilado el envejecimiento de las lámparas por dos métodos. Primero envejeciendo las lámparas inicialmente y segundo realizando calibrados periódicos de los colorímetros, a fin de adecuar los datos a las radiancias reales utilizadas.

De esta forma, se tiene también en cuenta otro de los parámetros temporales que pueden afectar al dispositivo, el envejecimiento del recubrimiento de MgO de las esferas integrantes, que puede ser selectivo, Lozano (1978).

La mayor parte de los dispositivos eléctricos fueron conectados, asimismo, al estabilizador. Es el caso de la lámpara que suministra el campo circundante, el generador de pulsos y la puerta OR. En la misma línea, la etapa de amplificación del fotodiodo de Si, utilizado para los calibrados, estaba alimentada por una fuente estabilizada de ± 15 v.

En los sistemas de producción y observación de estímulos hemos distinguido también en lo referente a la reproducibilidad del colorímetro, el alineamiento de los elementos ópticos del sistema y la colocación del observador en el dispositivo.

En relación con el primer apartado, mediante un diseño apropiado de los mandos que regulan la apertura de los diafragmas, se ha asegurado la falta de holguras e inercias mecánicas en el colorímetro y además, se han realizado medidas de la reproducibilidad de las posiciones de los mandos mediante el calibrado para distintas posiciones de los mismos. Se ha encontrado, que dicha reproducibilidad se satisface exactamente dentro del error del instrumento de medida en el calibrado. La posible influencia de la temperatura que adquiere el sistema de producción de estímulos fue también tenida en cuenta, como se ha mencionado anteriormente. Para ello, se dotaron a los colorímetros de turbo ventiladores probándose la no variación de los calibrados a lo largo del tiempo que duraba una sesión experimental.

El alineamiento de los elementos ópticos del sistema fue realizado mediante el uso de un láser de He-Ne 0.5 mw, procediéndose según las normas convencionales a este respecto. Para una mejor realización de este alineamiento, se dispusieron todos estos elementos sobre bancos ópticos, perfil Zeiss, en jinetillos con desplazamientos, mediante dispositivos de cremallera, vertical y horizontal, que permiten el -- exacto centrado en el eje óptico del sistema.

Con referencia a la adaptación del observador al dispositivo, - se le ha exigido, en principio, al mismo, una buena acomodación. En este sentido el acoplamiento de la pupila del ojo del observador y la - artificial del dispositivo fue realizado, como se ha indicado, mediante la fijación por dentonera de la cabeza del observador.

De lo relacionado con los calibrados de los estímulos y el cálculo de sus coordenadas de cromaticidad y luminancia, son varios los aspectos a tener en consideración. De una parte, encontramos la indeterminación propia al número de cifras significativas utilizadas al tomar los valores correspondientes al factor de reflexión espectral del

espejo, a la efectividad de la red del monocromador y a la respuesta espectral del fotodiodo, y que incluimos en la estimación general del error de la medida.

De otro lado, tenemos los aspectos relacionados con la misma - realización de los calibrados. En este sentido, hemos asegurado un - correcto alineamiento del sistema de calibrado con el resto del dispositivo y que la rendija del monocromador quede completa y uniformemente iluminada durante la realización de los calibrados. Además, se ha tenido cuidado de ajustar a cero, previamente y a lo largo de las medidas, la respuesta del fotodiodo cuando no es iluminado, a fin de restar la corriente de oscuridad, lo que se ha realizado mediante un potenciómetro en la etapa de amplificación. Asimismo, se ha elegido una escala en el multímetro digital que permita una lectura estabilizada de la señal, evitándose las fluctuaciones debidas al ruido de los elementos de medida. Esta escala del multímetro nos dará el principal error instrumental que se introduce en la realización de las - medidas.

En cuanto al uso del monocromador, hemos considerado su resolución y la reproducibilidad de las posiciones que fijan las longitudes de onda seleccionadas. Lo primero ha sido ya ampliamente expuesto en los apartados anteriores y solo mencionaremos que para los calibrados realizados esta ha sido, según el caso, de 4 y 8 nm, lo que se ajusta bien a los cálculos colorimétricos, Seve (1982).

En relación a lo segundo, hemos comprobado, mediante un láser de He-Ne y lámparas de Na y Hg, que las longitudes de onda que el - mando selector indica, coinciden con las realmente seleccionadas. Además, como técnica de trabajo, hemos actuado siempre sobre este man *muy fino* do en el mismo sentido de giro, a fin de evitar posibles inercias - mecánicas.

Por último, y con referencia al cálculo explícito de los valores triestímulos, a partir de la resolución del monocromador, hemos realizado la suma espectral para el cálculo de los mismos, de 5 en 5 nm y de 10 en 10 nm, según las consideraciones expuestas en el a-

partado de realización de calibrado, basados en el trabajo de Seve - (1982) en este sentido. Es de notar, que implícitamente siempre se - comete un error en el cálculo de los valores triestímulos al pasar - de la integral a la sumatoria, debido a que la radiancia espectral - no puede ser medida continuamente y a que las funciones de mezcla es- tán tabuladas para puntos determinados del espectro, lo que ha sido recientemente estudiado por Krystek (1982).

En resumen, hemos estimado el error en nuestra medida habiendo adoptado éste como el asociado al escalón mínimo de variación de los mandos del colorímetro, expresado en términos de diferencias de coor denadas de cromaticidad y luminancia. Esta elección es recíproca, y por tanto sirve para fijar el tamaño del escalón, que en cualquier - caso, hemos calculado que engloba los errores sistemáticos menciona-- dos.

Por otra parte, los errores accidentales los hemos considerado sujetos a la propagación de errores en colorimetría, descrita por -- Nimeroff (1957) y Wyszecski (1959), lo que, por otro lado, fundamenta el cálculo estadístico del elipsoide de discriminación representati- vo del umbral.

CAPITULO IV

IV.- METODO GENERAL Y DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS

4.1.- Descripción y Justificación del Método Experimental

A la hora de elegir un método experimental de medida del umbral diferencial de color hemos tenido en cuenta una serie de consideraciones importantes, cuando se realizan trabajos en el campo de la Optica Fisiológica con observadores. Se basan éstas, principalmente, en el deseo de que las medidas sean ajenas, en lo posible, a las condiciones psicológicas particulares del observador. Se trata pues, de que los resultados, si bien característicos de un observador determinado, no vengan afectados por aspectos asociados a las situaciones psicológicas determinadas del mismo, en momentos y circunstancias dados, ligados a una medida concreta. Además, ha de procurarse que la intervención del observador en la medida, se limite a una actuación como "elemento de cero", en la que éste esté exento de realizar funciones sobre los instrumentos y en el desarrollo de las experiencias, ya que ello podría condicionar las respuestas del mismo. Es, pues, nuestra intención, que el observador quede al margen de todo lo que pudiera afectar a la objetividad de las medidas.

Buscamos un método de trabajo que permita evitar los problemas planteados. De un lado conseguir objetividad en las respuestas del observador durante la realización de las medidas y además, evitar la variabilidad de respuesta inherente al propio observador. En la línea de estos planteamientos, el método de los "estímulos constantes" parece el más indicado, frente a otros comunes en la literatura, como el del "error medio" o el de los "límites".

El primero de estos métodos se basaría, principalmente, en la realización de igualaciones de color, actuando el observador, normalmente para ello, sobre los mandos del colorímetro. Este método supone, por tanto, la aparición de posibles efectos táctiles, Le Grand (1972), que pueden afectar las medidas, así como una evaluación de los resultados mediante la asimilación de estos a una distribución normal de probabilidad. Es de esperar que este método esté más condicio-

nado por la propia variabilidad del observador que otros en los que el observador no tenga participación activa en las experiencias.

El segundo método de los mencionados, el de los "límites", supone la variación continua de los estímulos hasta apreciar diferencias respecto de una igualación previa de estímulos. Este método, en general, no parece presentar reproducibilidad y exactitud en la determinación del umbral, lo que se ha verificado en nuestro caso con experiencias previas. Por otra parte, pueden influir parámetros, como la velocidad en la variación del estímulo o la adaptación continua al estímulo en el que se pretende detectar una diferencia, como indica Le Grand (1972).

A la vista de lo expuesto, el método de los "estímulos constantes" parece ser el que presenta mejores características de objetividad y reproducibilidad en las medidas, así como unas posibilidades en la evaluación de los resultados superiores a los anteriormente expuestos. Mediante este método podemos asegurar la actividad única del observador como "instrumento de cero", ya que la función a realizar por el mismo durante las observaciones es exclusivamente responder si ve iguales, o no, dos estímulos que se le presenten a comparar. De acuerdo con esto, nuestras sesiones experimentales han consistido esencialmente en la presentación de una secuencia de parejas de estímulos referencia/variable, anotándose tras cada una de ellas, la respuesta que el observador da acerca de su igualdad o desigualdad. En todos los casos experimentales, esta secuencia en la presentación de estímulos ha sido tal que, desarrollándose la sesión para el estudio del umbral de un solo estímulo de referencia, los estímulos variables presentados no hayan seguido ninguna norma en su orden de presentación, siendo éste siempre al azar. De esta forma, aseguramos que el observador no pueda hacer juicios previos sobre los estímulos que se le van a presentar, ni está influido por evoluciones determinadas.

Evidentemente, los estímulos dados a comparar con el de referencia han estado siempre próximos a éste en el espacio de color. De hecho, se ha pretendido rodear al estímulo de referencia de una "nube" de puntos (estímulos), tal que sus extremos representen a colores --

que sean considerados como "claramente distintos" del de referencia - por el observador. La obtención de esta nube de puntos corresponde a movimientos determinados de los mandos del colorímetro, que describiremos posteriormente, y persigue unos objetivos claros. Ha sido nuestra intención el no poner restricciones al ojo en su funcionamiento, como podrían ser las derivadas de trabajar a luminancia o cromaticidad constante, si bien esto último ha sido utilizado en un apartado - de la presente memoria por razones que posteriormente se apuntarán. En cualquier caso, son muchos los autores que, tratando de determinar las características de la discriminación cromática, ya sea por ejemplo el estudio de umbrales diferenciales de cromaticidad, trabajan en sus experiencias a luminancia constante para la obtención de estos umbrales.

En nuestra opinión, cuando el objeto de estudio está relacionado con los aspectos cromáticos de la discriminación, no se deben imponer restricciones al funcionamiento usual del ojo humano, tales como las mencionadas. De hecho, si pretendemos aproximarnos, en lo posible, a las condiciones de la vida ordinaria, no encontramos en esta con - frecuencia condiciones de luminancia o cromaticidad constante, y sí, una variabilidad continua de las mismas. Así pues, en la realización de la mayor parte de nuestro trabajo, no hemos impuesto ninguna de estas limitaciones en los estímulos a comparar, realizándose la experiencias con variación simultánea de luminancia y cromaticidad. Solo se ha trabajado a cromaticidad constante en el caso del estudio de los umbrales diferenciales de luminancia, lo que se puede justificar en base a que, en determinadas condiciones, el ojo humano sólo percibe este atributo del color. Tal es el caso de la visión escotópica . Por otra parte, se puede añadir que en la literatura aparece con frecuencia esta separación, y a veces la comparación de resultados con los de otros autores exige esta imposición.

Como anteriormente mencionábamos, la obtención de la nube de - puntos en el diagrama cromático alrededor del estímulo de referencia, la posibilita la variación de la apertura de los diafragmas que regu-

lan la luz que se deja pasar a través de cada filtro del colorímetro.

Mediante la variación, en las diferentes formas posibles, de estas aperturas, a partir de una igualación inicial isómera obtenida mediante cálculos espectrofotométricos, se obtienen una serie de estímulos que rodean al inicial, que son los presentados a comparar con el de referencia. De esta forma, se obtiene la nube de puntos que sea representativa de la capacidad de discriminación en color del observador para el caso estudiado, siempre que se asegure que el estímulo de referencia quede completamente rodeado en el mayor número de direcciones posibles, lo que se consigue por los métodos convencionales.

En el caso de estudio de umbrales de luminancia, esta "nube" se reduce a una "línea" en el espacio de color, resultante de la sola variación de un filtro, siendo éste precisamente, en una posición determinada de mando, el estímulo a estudiar, como se detallará más adelante.

Cada uno de los estímulos variables que forman la nube, fue presentado 10 veces al observador para que este juzgara su igualdad, o no, con el estímulo de referencia. La secuencia de presentación de estímulos variables fue siempre al azar, como se ha indicado previamente, a fin de promediar las condiciones psicológicas, asociadas a la discriminación, del observador. Se le ha asignado a cada punto un peso estadístico, igual al número de veces que el observador responde que ve iguales los estímulos de referencia y variables.

Con objeto de que el observador no varíe su posición, crítica - como se sabe en el caso de visión maxwelliana, las respuestas sobre igualdad o desigualdad de estímulos fueron emitidas por el observador mediante un sistema de interruptores que accionaban pilotos luminosos de respuesta, encargándose el experimentador de registrarlas.

La evaluación estadística del umbral a partir de la nube de puntos y sus pesos asociados, ha sido objeto de un apartado de la presente memoria que dentro de este capítulo incluimos.

A fin de evitar la fatiga del observador, las sesiones experimentales no excedieron en su duración más de 20 min. Como consecuencia

de ello, se ha precisado para la determinación de un umbral un número de ellas tal que nos permite la obtención de datos a distintas horas del día y en distintos días, lo que, por otra parte, perseguíamos. En efecto, de trabajos como los de Wyszecski (1972) e Hita y Romero (1981), se desprende esta necesidad cuando se realizan este tipo de experiencias, con el fin de promediar las condiciones psicológicas - temporales del observador, y así hacer las medidas lo más independientes posible de la variabilidad que, según las experiencias de estos autores, puede apreciarse en resultados de discriminación cromática - cuando se evalúan umbrales obtenidos en situaciones particulares, tales como en un solo día, etc. De aquí también la conveniencia de obtener para un solo punto de la nube un amplio número de respuestas.

Aspectos más detallados de las medidas y el desarrollo propio de la experimentación, se aportan en los capítulos posteriores dedicados a tal fin.

4.2.- Descripción y Justificación de los Parámetros Experimentales

Previamente, durante la descripción del dispositivo experimental utilizado para la realización de las medidas en la presente memoria, se han detallado y justificado algunos de los parámetros de la experimentación. A pesar de ello, pretendemos en este capítulo hacer una revisión de nuevo de éstos, junto con los hasta ahora no especificados y que determinan el conjunto de condiciones experimentales que ha sido preciso fijar para la determinación de los umbrales en la forma pretendida.

Sin embargo, no todas las condiciones experimentales a fijar, se pueden ajustar a una exacta planificación del experimento. A menudo se encuentran dificultades, como por ejemplo de tipo material, que condicionan la experimentación. Tal podría ser en nuestro caso, lo referente al nivel de luminancia utilizado, que viene determinado por el tipo de colorímetro, su lámpara y los filtros. En cambio, un elemento, como es el caso del colorímetro tipo Donaldson, se puede considerar un material óptimo para la investigación en el campo del estudio de umbrales diferenciales de color. Es, por tanto, preciso llegar a compromisos en los que, si bien no podamos trabajar en condiciones de iluminación retinal muy próximas a las usuales en la técnica e industria, si podamos exigir un nivel claramente fotópico en el que la discriminación presente características similares a las de niveles más altos, exceptuando el deslumbramiento.

En el mismo sentido, pero refiriendonos al campo de las posibilidades humanas, otro de los importantes compromisos que es preciso tomar al trabajar en Optica Fisiológica es, normalmente, el número de observadores a utilizar para la realización de las medidas. Es conocido que las observaciones en este campo de la ciencia son a menudo tediosas y precisan de gran constancia e interés a fin de que la experimentación se realice en forma correcta. Se plantea pues, qué características han de poseer estos y qué número mínimo es preciso a fin de poder generalizar los resultados.

Independientemente de la justificación que hagamos del número y tipo de observadores que se han utilizado en la realización de las medidas de este trabajo, se comprende que es difícil un número alto de observadores fiables para realizar experiencias de este tipo, lo que nos limita a las personas directamente ligadas a la investigación realizada, ya que se exigen unas condiciones de observación altamente rigurosas.

A la hora de describir los parámetros experimentales de nuestras experiencias, se ha hecho una clasificación de los mismos atendiendo a la siguiente división, la cual pasaremos a detallar.

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 intermedio entre presentación de estímulos

c) Parámetros visuales:

- 1) Tipo de visión
- 2) Modo de apariencia del estímulo
- 3) Area 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.

a) Parámetros Fotométricos

Los estímulos que han sido objeto de estudio en las distintas partes del trabajo experimental, se indican, con sus coordenadas de cromaticidad y luminancia, en la tabla IV.I. La denominación utilizada corresponde a la que usualmente se utiliza en este campo para designar de forma general las distintas zonas del diagrama cromático, Judd (1954). La figura 4.1 muestra la situación de estos estímulos en el diagrama CIE 1931 (x,y).

Los tres primeros mencionados en la tabla IV.I, corresponden a los estudiados a la hora de analizar los aspectos temporales de la discriminación sucesiva para umbrales diferenciales de luminancia. Estos estímulos se generan con cada uno de los filtros de los colorímetros independientemente, es decir, dejando pasar la luz proveniente de la lámpara a través de un solo filtro para una posición del diafragma determinada. De esta forma, conseguimos trabajar a cromaticidad constante, siendo ésta la generada por el sistema lámpara más filtro. Mediante la variación de la abertura del diafragma se conseguirán las variaciones de luminancia en el colorímetro variable a estudiar, en comparación con el de referencia.

Estos tres estímulos son, por tanto, los primarios de nuestros colorímetros, habiéndose trabajado con dos niveles de luminancia distintos. Estudiar otras cromaticidades nos hubiera acarreado el tener que generar luminancias distintas, de la misma cromaticidad, mediante suma aditiva de los primarios, lo que hubiera supuesto una considerable complicación al método, cuando en un caso como el que se ha mostrado tenemos una variedad de puntos apreciable y una sencillez de trabajo notable.

Los siguientes cinco colores que se mencionan en la tabla IV.I corresponden a aquellos puntos del diagrama cromático a los que, en cualquiera de las distintas partes de la investigación, se les han determinado sus umbrales diferenciales globales de color. Como se observa en la tabla, aproximadamente todos tienen el mismo valor de la luminancia, lo que no es casual. Se debe esto al hecho, de que al plantear

TABLA IV.I. Especificación de los estímulos estudiados en el sistema
CIE 1931

<u>Estímulo</u>	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>Y</u>
Azul*	.151	.024	4.077
Verde*	.134	.803	32.197
Rojo*	.726	.274	5.752
Azul	.176	.121	9.523
Verde	.298	.495	14.008
Magenta	.569	.337	17.340
Amarillo	.497	.436	15.098
Púrpura	.337	.155	15.594

* Estímulos correspondientes a los primarios del colorímetro

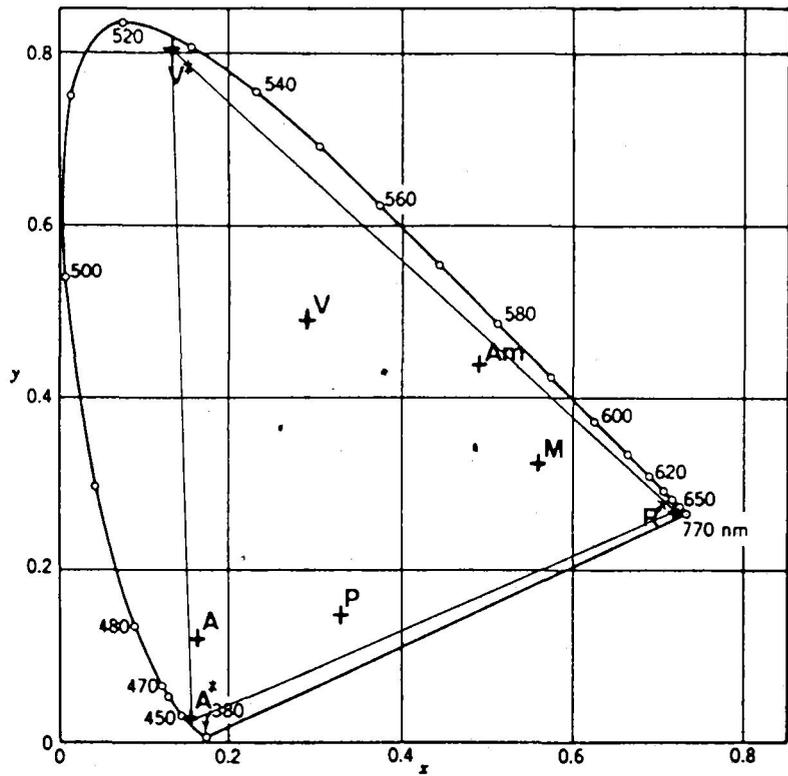


Figura 4.1: Diagrama CIE 1931 (x,y) con los - puntos analizados.

nos este estudio, se pensó en la necesidad de hacer comparable los resultados obtenidos entre sí, y a su vez con los de otros autores obtenidos por distintos métodos experimentales. Conviene, por tanto, poder obtener resultados de los umbrales correspondientes a un determinado valor de la luminancia, para, de una parte, visualizar mejor las diferencias existentes entre los distintos estímulos estudiados, así como su posible evolución para las distintas cromaticidades, y de otra, - poder comparar estos resultados con los aportados por otros autores - en estas condiciones bajo otras situaciones experimentales, como por ejemplo las ya clásicas elipses de MacAdam (1942).

Esta limitación se une a las posibilidades del colorímetro a la hora de producir estímulos, por lo que cuando se fijó el nivel de luminancia se buscó el tener un valor suficientemente alto dentro de lo que el colorímetro permite, accesible para cualquiera de los estímulos que se pretendían analizar, atendiendo asimismo a que las posiciones de los diafragmas en el colorímetro variable que se obtuvieran, permitieran su variación de tal manera que no se llegara a cerrar o abrir por completo uno de los diafragmas, sin haberse generado estímulos - que fueran vistos claramente distintos al de referencia.

El nivel de luminancia fijado en nuestras experiencias cae en el fotópico bajo, con un valor de la iluminación retinal aproximado de 30 td, relativo a un valor de $Y = 12$. Trabajos como los de Brown (1951), Walraven (1962), parecen indicar que el nivel de luminancia no afecta significativamente a los resultados en la discriminación cromática dentro de niveles fotópicos.

Una vez elegidos los estímulos a estudiar, es decir, los valores de sus x , y , Y , se determinaron las posiciones de los diafragmas en el colorímetro que los reproducían mediante un programa de cálculo desarrollado a partir de los datos del calibrado. En esta forma, - se consigue reproducir una determinada pareja de coordenadas de cromaticidad, dentro del error asociado al tamaño del escalón fijado en las posiciones de los diafragmas del colorímetro. En cualquier caso, se pretendió estudiar un conjunto de puntos suficientemente representativo del diagrama cromático.

Con respecto al tipo de fusión de primarios, tal como se puede deducir del dispositivo experimental, se ha utilizado la fusión espacial de los mismos mediante el uso de una esfera integrante. Trabajos anteriores realizados en el departamento, Hita y Jimenez (1980), muestran que no parece influir en la discriminación el tipo de fusión empleada, ya sea temporal o espacial, lo que nos lleva a decidimos por la segunda debido a la facilidad en su obtención frente a la temporal, la que requeriría añadirle al dispositivo experimental algún sistema que la posibilite.

Por último, con respecto al carácter de las igualaciones, como ya se ha indicado anteriormente, se ha trabajado en condiciones de igualdad de partida isómera. Al no ser objeto de este estudio ninguno de los aspectos relacionados con el metamerismo, capítulo este de gran interés actual en la colorimetría, se convino trabajar con parejas de filtros iguales, debido a una mayor sencillez en la realización de igualaciones y en los calibrados, al haber escogido éstos interferenciales.

b) Parámetros Temporales

A nuestro juicio, dos han sido los tiempos, que en el tipo de discriminación estudiada, presentan interés de análisis: el tiempo de exposición y el tiempo intermedio entre presentaciones del estímulo de referencia y el variable, en el caso de discriminación sucesiva. Con respecto al primero, no existen en la literatura artículos que nos indiquen qué tiempo es preciso como mínimo para obtener la percepción de un estímulo cromático y su almacenamiento en memoria, con el fin de su posible reconocimiento posterior. Sí se ha realizado este estudio en reconocimiento de formas. En estos casos parece necesario al menos 0.5 s para la integración por memoria, Uchikawa e Ikeda (1981). Como se ha indicado, respecto a estímulos cromáticos, no existen datos, lo que nos ha llevado a fijar en 1 s el tiempo de exposición, ya sea para el estímulo de referencia o el variable. Consideramos que 1 s es un tiempo suficiente para la percepción, y que permite al observador ver los estímulos comodamente. Otros autores han utili

zados diferentes tiempos de exposición, como Newhall et al. (1957) de 5 s, o de 110 ms, Uchikawa e Ikeda (1981). Es de notar, que ninguno de estos autores hace una justificación consistente del tiempo utilizado, y que Uchikawa (1983) pasa a utilizar 1 s sin aportar justificación alguna. Sin duda, sus razones pueden apuntar a las mismas por nosotros esbozadas, sin haber tomado nosotros el mismo tiempo en base a su trabajo, ya que el comienzo del trabajo experimental de la presente memoria es anterior a la aparición del artículo mencionado.

En realidad, las razones que nos movieron a utilizar este tiempo se basan en trabajos anteriores realizados en el departamento, Hita et al. (1980, 1982), en los que el tiempo de exposición es analizado como parámetro que puede influir en la discriminación cromática por comparación simultánea de estímulos. Los resultados muestran, que ya sea en luminancia como en cromaticidad, la discriminación mejora hasta tiempos alrededor de 1 s, a partir del que se estabiliza.

Si bien otros autores, como Siegel (1965) han apuntado tiempos de exposición óptimos de 0.2 s, nuestras experiencias muestran que 1 s es un tiempo en el que el observador se encuentra más cómodo a la hora de la discriminación. Esta conclusión se ha llevado al caso de la comparación sucesiva de estímulos, entendiendo 1 s como un tiempo bueno para realizar la percepción y memorización de los estímulos.

El segundo de los parámetros temporales a describir, el tiempo intermedio, ha sido objeto de análisis como apartado de la presente memoria. Cuando se llevó a cabo la planificación del trabajo experimental, se encontró que este tiempo podría ser muy importante a la hora de evaluar un tipo de comparación por memoria. En efecto, si bien no se ha pretendido analizar las distintas etapas del proceso de la memorización, si surge el deseo de conocer como se deteriora la información cromática cuando el tiempo transcurre, o si, en cualquier caso, se puede llegar a vislumbrar un comportamiento estable en los valores asociados a la discriminación, a partir de un cierto tiempo tras la percepción del estímulo.

El rango de tiempos analizado ha sido de 0.5 a 20 s, ajustándose a condiciones en las que se analicen tiempos susceptibles de ser usados en este tipo de comparación en el laboratorio, y por otra parte no sean tan cortos que no se puedan evitar las influencias de efectos de post-imagen en la discriminación. En este sentido se ha seguido lo recomendado por Wysecki (1967), acerca de que los procedimientos de igualación han de estar orientados hacia la aplicación práctica, o bien - deben conducir a interpretaciones teóricas interesantes.

Tiempos excesivamente largos, del orden de minutos, hacen imposible la utilización del tipo de igualación, como la aquí planteada, en el laboratorio, y otros métodos experimentales de evaluación de la discriminación se harían necesarios. En cualquier caso, se ha querido tomar como zona de estudio la que se considera en la literatura como asociada a los efectos de memoria en intervalos cortos de tiempo (short-term memory) en la que solo aparece como estudio de este parámetro, el trabajo de Uchikawa e Ikeda (1981) hasta tiempos de 5 s, y solo para discriminación en longitudes de onda.

c) Parámetros Visuales

Como se desprende de la división hecha previamente, varios son los parámetros que, inherentes a la visión, conviene especificar, ya sean desde el punto de vista del tipo de visión y sus características principales, como relacionados con los procesos de adaptación que se han llevado a cabo durante las experiencias.

El tipo de visión, como ya se ha mencionado, ha sido monocular y maxwelliano. Las características, ya descritas de este tipo de visión, nos permiten el iluminar de manera homogénea una superficie determinada de retina. En estas condiciones, el área de la retina que se estimula es siempre la misma, con las ventajas que ello conlleva, cuando lo que se pretende estudiar es el comportamiento local, como es nuestro caso, ya que excitaciones de zonas diferentes en distintas presentaciones, originarían problemas ajenos a este estudio.

La visión elegida ha sido de tipo foveal, habiéndose fijado un campo de 3.5 grados, suficiente como para comprender la mayor parte de

la fovea y no tan grande como para que aparezcan fenómenos tales como los relacionados con la mancha de Maxwell. Por otra parte, queremos - comparar nuestros resultados con los de otros autores que han utilizado para la reducción de sus datos experimentales las funciones de mezcla del observador patrón CIE - 1931, el cual, según las últimas recomendaciones de la CIE, se aconseja para campos de 4 grados y menores, quedando para campos mayores el observador patrón CIE - 1964, obtenido con campo de 10 grados.

El efecto del tamaño del campo aparece ampliamente estudiado en la literatura, McCree (1960), Bedford y Wyszecki (1958), encontrándose como varía la discriminación cuando el campo disminuye, si bien para valores menores de 1 grado. En nuestro caso estamos lejos de ello, aunque es interesante destacar que del trabajo de McCree (1960) se - puede deducir un acercamiento entre el comportamiento de los tritanopes en discriminación en longitudes de onda y el de observadores normales para campos muy pequeños (15').

Respecto de la forma del campo y su apariencia, como se puede - desprender de la descripción del dispositivo experimental, este ha sido circular uniforme en el caso de comparación sucesiva, y circular - partido en el sentido vertical cuando la comparación fue simultánea. En los dos casos el modo de apariencia de los estímulos fue de apertura. Corresponde éste, al caso como el que tenemos, en el que se trabaja con luces "dirigidas" y no provenientes de la luz difundida por una superficie difusora (modo de objeto). Este tipo de visión se considera más útil cuando se pretenden analizar aspectos relacionados con la visión del color, frente a problemas de tipo técnico e industrial en los que la mayoría de los trabajos se realizan con presentaciones en modo de objeto.

Por otra parte, la forma de presentación en campo partido, en - el caso de la comparación simultánea, ha sido elegida frente a otras usuales en colorimetría, como podrían ser con campos concéntricos o mediante cabezal de Lummer-Brodhun, ya que sí bien estas últimas dan resultados cuantitativamente mejores para la discriminación, Lozano - et al. (1974), este tipo de campo ha sido el más usado, lo que nos --

permite hacer comparables nuestros resultados, y además parece más - próximo a las condiciones normales de comparación.

Con respecto a los parámetros de adaptación, distinguimos entre la adaptación previa a las medidas que se llevó a cabo en cualquiera de las sesiones experimentales, y la adaptación, ya sea espacial o -- temporal, propia del proceso de discriminación. En todos los casos, - la primera ha sido a la oscuridad durante un periodo de 5 minutos anterior a la aparición de estímulos a comparar. Esta adaptación a la - oscuridad pretende colocar al ojo en unas condiciones independientes a cualquier tipo de iluminación anterior a la que pudiera haber estado sometido. De otro lado, el tiempo de adaptación previa (5 m) se ha considerado suficiente, sí bien no alcanza el valor asintótico de la adaptación respecto a la medida del umbral absoluto, lo que no es pre ciso en este caso ya que se trabajó en el dominio fotópico. Tiempos - de adaptación previa a la oscuridad como el utilizado se encuentran usualmente en la literatura.

Por último, durante la realización de las medidas, la adaptación empleada fue, como en el caso de MacAdam (1942), a la oscuridad, ha-- biendose dedicado una parte del trabajo a estudiar la influencia que la adaptación a un determinado estímulo podría ocasionar en el umbral respecto a la adaptación a la oscuridad. Se ha elegido en este caso - un estímulo acromático, producido por una lámpara de incandescencia - sobre un blanco difusor. Se eligió este tipo de adaptación ya que es una de las más estudiadas por su frecuencia en la vida diaria y debi do a su fácil obtención.

La influencia de la adaptación temporal en la discriminación ha sido extensamente estudiada, Bartleson (1977), pero no en el caso experimental que nos ocupa. El hecho de que la apariencia del campo - quedara, en este caso, como el de un estímulo con campo circundante, - induce a que la apariencia del estímulo sea distinta que en el caso - de la adaptación espacial a la oscuridad, lo que ha sido analizado -- por distintos autores, Brown (1952), Rautian y Solovjeva (1955), que encuentran que un fondo coloreado alarga las elipses de discriminación en la dirección de la cromaticidad del fondo, análogo resultado a los

de Jameson y Hurvich (1961) para discriminación en longitudes de onda. El nivel de luminancia en el campo circundante fue fijado 8.5 td , tal que, de acuerdo con Siegel (1969), este sea del orden o menor que el del estímulo, a fin de que no influya en la discriminación.

d) Observadores

Para la realización de nuestro estudio se han prestado a la experimentación tres observadores, a los que hemos identificado por las iniciales R. M., L.J. y J.R.. Los tres poseían, en el momento de comenzar las medidas, experiencia en este campo de investigación, habiendo actuado como observadores en anteriores trabajos. A pesar de ello, un tiempo de acomodación al nuevo dispositivo experimental y método de observación se llevó a cabo para cada uno de ellos.

Los tres observadores pertenecen al sexo masculino y con edades de 46, 28 y 26 años en la actualidad. Su visión al color es considerada "normal", tras pruebas realizadas mediante el test de Ishihara y los del Colegio Médico de Tokio y de Farnsworth D-15, para la detección de anomalías en la visión del color. Dos de los observadores no poseen ningún tipo de ametropía y el tercero un ligero astigmatismo en el ojo con que realizaba las observaciones.

Se consideran estas características de los observadores, como "normales" en una población, y por tanto, aptas para la realización de este tipo de investigación, lo que no quita el interés que pudiera tener la realización de estas medidas con observadores dicrómatas, o en general con anómalos a la visión del color, lo que se sale de los límites de este trabajo.

El número de observadores es también "normal" en este tipo de experiencias. Así, del estudio realizado por Ronchi y Ferrara Mori (1963) se desprende como la mayor parte de los trabajos que se realizan en el campo de la visión, utilizan dos observadores, seguidos por los que utilizan tres y uno. Esto, evidentemente, no justifica la utilización de tres observadores frente a un número mayor, pero pensamos, en base a lo expuesto, que este número es suficiente para

dar generalidad a los resultados. La elección de este número, depende a menudo de la naturaleza del experimento y del propósito de la investigación. Sin embargo, no hay normas ni convenios sobre el número óptimo de observadores para cada tipo de trabajo. Piénsese que datos aceptados extensamente, como las elipses de MacAdam están deducidas para un solo observador, lo que no ha estado exento de crítica.

En nuestro caso, el hecho de tomar tres observadores se ha considerado suficiente en el compromiso con el tipo de investigación y, en cualquier caso, no se ha pretendido realizar promedio con los resultados de los distintos observadores, lo que con frecuencia se hace. De esta forma, se puede realizar un mejor análisis de las variaciones inter e intra-observadores y poder así llegar a la generalización de los resultados.

4.3.- Desarrollo de las Experiencias

Aunque el método experimental seguido en la realización de las medidas en todos los apartados de esta investigación, ha sido, en líneas generales, el descrito en una de las secciones anteriores, la consecución de los objetivos marcados en cada una de ellos, ha requerido planteamientos particulares que trataremos de exponer en este capítulo. Asimismo, daremos una visión global de las técnicas de medida utilizadas en conjunto.

Tras una primera fase de puesta a punto del dispositivo y entrenamiento de los observadores en este tipo de comparación sucesiva, el primer estudio que se ha realizado ha sido la determinación de la influencia que sobre la discriminación sucesiva tiene el tiempo intermedio entre presentación de estímulos a comparar. Para ello, se pensó inicialmente realizar este estudio para umbrales diferenciales de luminancia, lo que facilita la experimentación y siempre se puede considerar como fase previa a una posterior referida a cromaticidad o global.

Este estudio, que como hemos indicado con anterioridad se realizó para tres estímulos y tres observadores, se llevó a cabo mediante la utilización de los dos colorímetros del dispositivo experimental, produciendo uno de ellos los estímulos de referencia y el otro los variables a comparar. Con el fin de evitar la posible influencia que sobre la discriminación pudiera tener el aprendizaje en el desarrollo de la experimentación, se simultaneó, para cada uno de los observadores, la obtención de los umbrales diferenciales de luminancia para los tres estímulos y los cinco tiempos estudiados, es decir, se mezclaron al azar las sesiones experimentales necesarias para los distintos estímulos y tiempos (0.5, 3, 5, 8 y 15s).

Como fase siguiente, se pasó a la determinación de los umbrales diferenciales de color por comparación sucesiva de estímulos, para los tres observadores, tres estímulos: azul, verde y magenta, tabla IV.I, y los dos estados de adaptación que han sido objeto de estudio: oscuridad y estímulo acromático. De nuevo, para un determi

nado observador las sesiones experimentales correspondientes a cada estímulo y adaptación, fueron realizadas en una secuencia al azar, mezclándose todas las referentes a los distintos parámetros a analizar.

En la realización de estas medidas una innovación fue introducida en el método. Debido a que a partir de los resultados del primer análisis mencionado se fijó para el resto de las experiencias un tiempo intermedio de 8 s, se ha utilizado un solo colorímetro para la realización de las comparaciones, lo que simplifica los calibrados. Este colorímetro fue el que en un principio aportaba los estímulos variables siendo por tanto la misión del experimentador en esta nueva forma de trabajo fijar en el colorímetro los estímulos a comparar de la nube de puntos alrededor del de referencia y, en el periodo de tiempo (15s) entre parejas de estímulos referencia-variable, colocar el estímulo de referencia en el colorímetro para su observación en el tiempo dado por el temporizador correspondiente a éste.

Las ventajas que puede aportar esta forma de trabajo son, aparte de la economía de materiales, la confianza y facilidad en la obtención de la igualación isómera de partida, y el permitir que se introduzcan estímulos distintos al de referencia en su lugar, con el fin de evitar posibles efectos de aprendizaje en el observador, mayores que en el caso de umbrales de luminancia al requerirse más medidas, y mantener mejor su atención a lo largo de las observaciones.

En una tercera fase de la experimentación, se pasó al estudio del tiempo intermedio cuando se incluye en la discriminación variaciones en la cromaticidad. En una fase previa, se había determinado el umbral diferencial de color con un tiempo intermedio de 8 s, para los estímulos amarillo y púrpura, y para los tres observadores, siguiendo un desarrollo análogo al hasta ahora descrito. Posteriormente, se pasó al estudio del umbral para los dos mismos estímulos y observadores, cuando se trabaja con tiempos intermedios de 0.5, 3 y 20 s. Este estudio, podría pensarse, está sujeto a limitaciones provenientes de la secuencia en que se desarrollaron las sesiones respecto de las de 8 s, por lo que se tomaron precauciones en el sentido de mezclar las sesiones correspondientes a los distintos estímulos, observadores y -

tiempos intermedios. Además, con vistas a disminuir al máximo los efectos de aprendizaje, estímulos próximos al de referencia se mostraban en vez de éste a lo largo de las sesiones en el sentido anteriormente mencionado, disminuyéndose en lo posible el número de medidas necesarias para la determinación del umbral.

En el caso del estudio del tiempo intermedio 0.5 s se volvió a utilizar dos colorímetros, ya que este tiempo no es suficiente para que el experimentador proceda a la variación de los mandos de los mismos.

La última fase de esta memoria ha sido el estudio de umbrales diferenciales de color por comparación simultánea de estímulos, debido a los cambios necesarios en el dispositivo experimental. Se ha determinado el umbral para los estímulos a los que previamente se les había determinado el correspondiente por comparación sucesiva, y para dos de los observadores que habían realizado estas medidas.

De igual forma que en el caso anterior, se tomó un número de puntos para la determinación del umbral suficiente como para realizar la comparación entre los umbrales obtenidos por uno y otro método de presentación. En este caso, el método experimental ha sido básicamente el mismo, si bien las precauciones tomadas propias a la discriminación sucesivas no son necesarias, realizándose las medidas para un mismo estímulo y observador por completo, sin mezclar sesiones experimentales a distintos estímulos.

Para todos los estímulos estudiados, se ha pretendido reproducir exactamente las coordenadas de cromaticidad en el colorímetro de referencia con respecto a las utilizadas en el caso de la comparación sucesiva, lo que se ha conseguido en general, si bien en algún caso, debido a las características del colorímetro introducido para el estímulo de referencia, no se ha podido conseguir exactamente el mismo valor de la luminancia, aunque siempre muy aproximado.

4.4.- Evaluación de Datos Experimentales

Con el fin de determinar el umbral diferencial de color a partir de la nube de puntos obtenida en cada caso, se ha utilizado un método estadístico de ajuste basado en los estudios en propagación de errores en colorimetría, Wyszecski (1959).

Mediante este método estadístico, fundamentado en el análisis de la varianza de las coordenadas y pesos de los puntos de la nube en el espacio de color, se ajusta un elipsoide de discriminación que asegura el 95% de la suma total de los pesos dentro de él. Objeto por tanto -- del método es la obtención de los coeficientes que definen la ecuación del elipsoide en la forma:

$$A(x-x_p)^2 + B(y-y_p)^2 + C(Y-Y_p)^2 + 2D(x-x_p)(y-y_p) + 2E(y-y_p)(Y-Y_p) + 2F(x-x_p)(Y-Y_p) = 7.81$$

en el espacio CIE 1931, e igualmente en cualquier otro sistema de representación del color (CIELUV, CIELAB, ...), y donde x_p , y_p , Y_p -- son las coordenadas del centro del elipsoide, obtenidas como media ponderada de las coordenadas de los puntos utilizados en la determinación del umbral.

A partir de la ecuación del elipsoide, se han determinado sus parámetros característicos (volumen, semiejes, puntos extremos, ...) sin más que aplicar los métodos de la geometría analítica.

Por otra parte, y a fin de caracterizar el umbral diferencial de cromaticidad, se ha analizado la sección elíptica obtenida al cortar -- el elipsoide por un plano de luminancia constante que pase por su centro. A esta elipse, que tendría de ecuación:

$$A(x-x_p)^2 + B(y-y_p)^2 + 2D(x-x_p)(y-y_p) = 7.81$$

se le ha determinado, con el fin de caracterizar la discriminación cromática del observador, sus semiejes, área, orientación y excentricidad. De esta forma, el valor cuantitativo del umbral diferencial de --

cromaticidad se ha asociado al área de la sección mencionada, llamada usualmente principal, y el del umbral diferencial de color al volumen del elipsoide.

Otros parámetros, como orientación y excentricidad, aportan datos interesantes de la discriminación al ser analizados en el espacio cromático.

Con respecto al umbral diferencial de luminancia, este se ha definido, según la literatura al respecto, como el logaritmo de la fracción de Weber, es decir:

$$\lg \frac{\Delta L}{L}$$

donde ΔL sería la variación en luminancia y L la luminancia correspondiente al estímulo estudiado.

A la hora de determinar el umbral diferencial de luminancia a partir de la ecuación del elipsoide de discriminación, se ha tomado una línea de coordenadas de cromaticidad constantes, que pasa por el centro del elipsoide, tomándose ΔL como la diferencia de las luminancias de los puntos del elipsoide que corta la línea definida.

Cuando se han estudiado umbrales diferenciales de luminancia, trabajando en el laboratorio a cromaticidad constante, se han seguido dos métodos a fin de dar mayor generalidad a las conclusiones. Uno es análogo al anteriormente descrito, y ajusta el umbral al 95% del número total de respuestas afirmativas.

Mediante el segundo, ΔL se define en la forma:

$$\Delta L = \frac{\sum |\Delta L_i| p_i}{10}$$

donde p_i es el peso asociado a cada escalón de luminancia $|\Delta L_i|$, respecto de la luminancia media de la distribución. Este método, denominado como de las "contribuciones experimentales", aporta información sobre la distribución y valor de los pesos asociados a los escalones.

El cálculo del elipsoide de discriminación fue realizado por ordenador según un programa anteriormente utilizado en el Departamen

to, Hita (1975). Sin embargo, algunas modificaciones se le han hecho con referencia al cálculo de algunos parámetros actuales y la inclusión de subrutinas que permiten el dibujo de las secciones del elipsoide a distintos valores de la luminancia, así como la distribución de los pesos estadísticos respecto de las secciones. Esto se realiza presentando los puntos estudiados que quedan en un intervalo de luminancia deseado superior e inferior a la sección a dibujar, mediante un número que indica el peso del estímulo que representa ese punto.

A la hora de dar los resultados experimentales, se han mostrado las secciones principales, habiéndose incluido algunas representaciones puntuales asociadas a ellas, a fin de confirmar la fiabilidad en la determinación del umbral.

Respecto a los sistemas de representación, dos han sido utilizados por su vigencia y actualidad: el sistema CIE 1931 (x, y, Y) y el sistema CIELAB. El primero ha sido ya extensamente descrito y la evaluación de datos se ajusta a sus características.

Con relación al segundo, es preciso hacer algunas puntualizaciones a la luz de las recomendaciones expresadas por Plaza (1983), basadas estas en las propias de la CIE. Es preciso hacer mención especial de que la obtención de los resultados en uno y otro sistema, elipsoides de discriminación asociados a un estímulo, se ha llevado a cabo a partir de las coordenadas y pesos de los puntos de la nube en cada sistema, evitando la transformación del elipsoide de un sistema a otro, - en base a las dificultades asociadas al carácter no lineal de las transformaciones, Pointer (1981), Hita et al. (1984).

Al evaluar las coordenadas de los estímulos en el sistema CIELAB se ha tomado, al trabajar con luces directas, como estímulo acromático correspondiente el equienergético, según las recomendaciones citadas.

De otro lado, este sistema está pensado principalmente para observaciones en modo de objeto, lo que en el caso de luces directas nos hace tomar un valor de la variable L , es decir, de X_n, Y_n, Z_n , por convenio. En nuestro caso, hemos ajustado los cálculos para que los valores de L estén alrededor de 70, que es un buen valor para la representación

del umbral en el plano a^* , b^* .

Se han incluido en el programa de cálculo nuevas variables introducidas por la CIE a partir de las coordenadas CIELAB. Estas recomendaciones se concretan para luces directas en las variables "tono (H)" y "saturación (S)", acercandonos así a las escalas de apariencia de color (en especial al sistema Munsell). Se definen estas variables como:

$$H = \arctan \frac{b^*}{a^*}$$

$$S = \frac{C}{L}$$

donde C representa a la variable "croma", definida como:

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

y S puede tomar valores entre 0 y 2. Estas variables permiten una especificación completa de los estímulos, habiendo sido introducidas en el programa de cálculo.

CAPITULO V

V.- RESULTADOS Y DISCUSION

5.1.- Variación de los Umbrales Diferenciales Sucesivos de Luminancia con el Tiempo Intermedio entre Presentaciones.

Tal y como se ha descrito anteriormente, la fase inicial de nuestro trabajo consistió en el estudio de la influencia que el tiempo entre presentaciones de estímulos a comparar pudiera tener sobre la discriminación cromática sucesiva. Antecedentes de este trabajo sólo se encuentran en Uchikawa e Ikeda (1981) bajo condiciones experimentales distintas a las nuestras y bastante diferentes de las del funcionamiento usual del ojo.

Los resultados obtenidos, tras el ajuste del umbral de luminancia al 95% de las igualaciones realizadas, se muestran en las figuras 5.1-3, correspondientes cada una de ellas a cada uno de los estímulos analizados y en las que se representan para cada observador los valores del logaritmo de la fracción de Weber en función del tiempo intermedio entre presentaciones, obtenidos en el sistema CIE 1931.

Como se puede observar, las curvas muestran una disminución en todos los casos de la capacidad de discriminación de los observadores para los tiempos intermedios más largos. En efecto, la fracción de Weber aumenta cuando " t_i " también aumenta, apareciendo una tendencia a la estabilización del umbral para los tiempos más largos estudiados.

Esta estabilización en el valor del umbral no se obtiene de forma general. Excepción a ella son los resultados obtenidos para el observador LJ en los estímulos azul y verde, aunque no sucede lo mismo en el caso del estímulo rojo, donde aparece un comportamiento análogo al de los otros observadores.

Por otra parte, la tendencia a la estabilización apuntada, se observa para la mayoría de los casos en tiempos de 8 s y superiores, si bien a veces, en especial para el estímulo rojo, se puede considerar adelantada, comenzando a partir de 5 s.

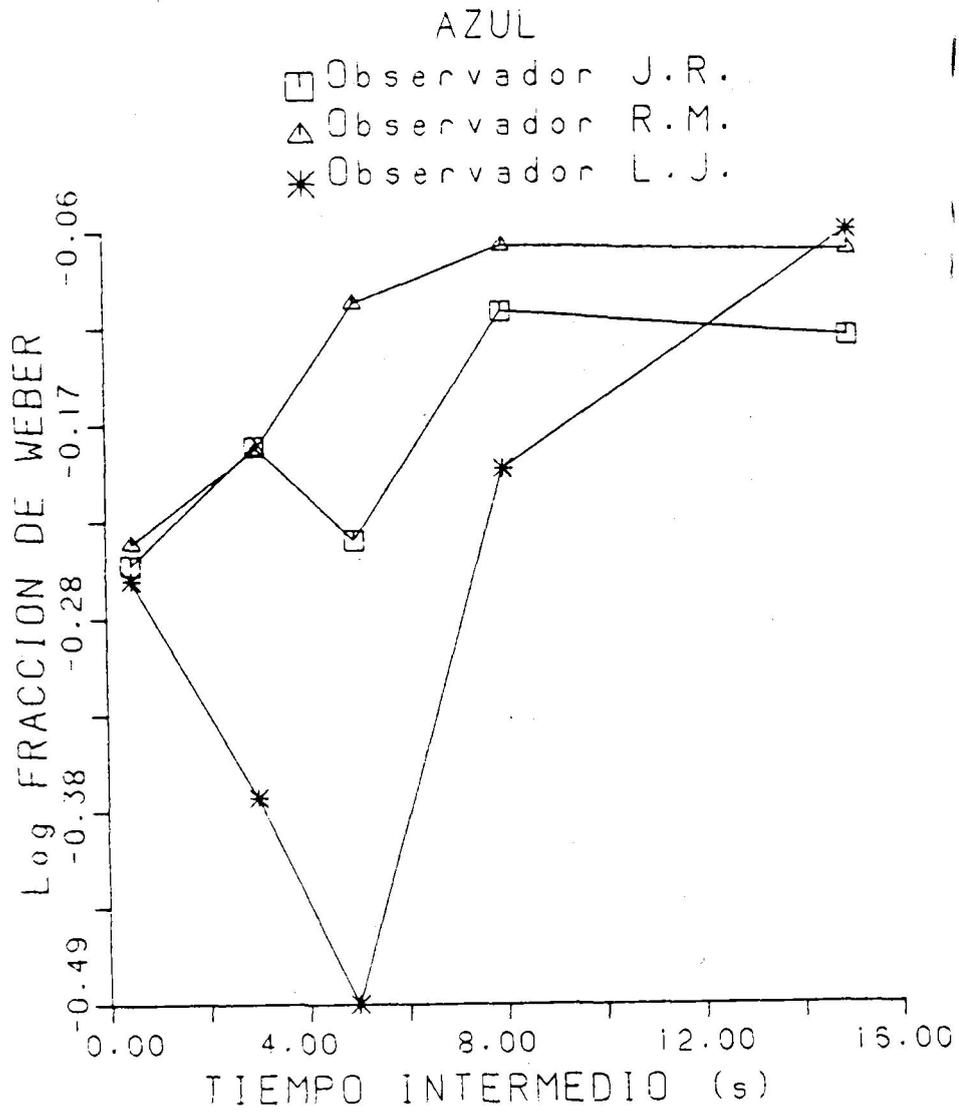


Figura 5.1: Resultados para el estímulo azul median
te el método de ajuste del umbral al 95%
de las igualaciones.

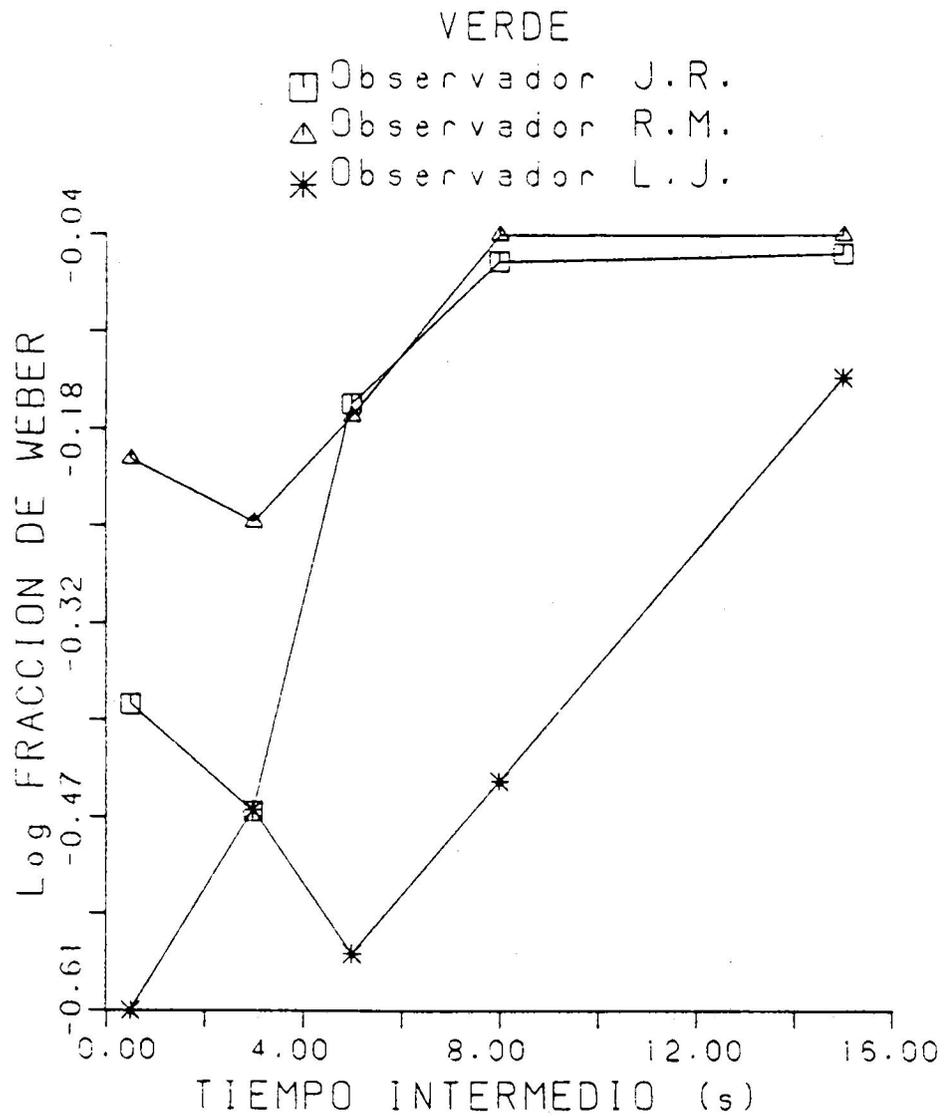


Figura 5.2: Resultados para el estímulo verde mediante el método de ajuste del umbral al 95% de las igualaciones.

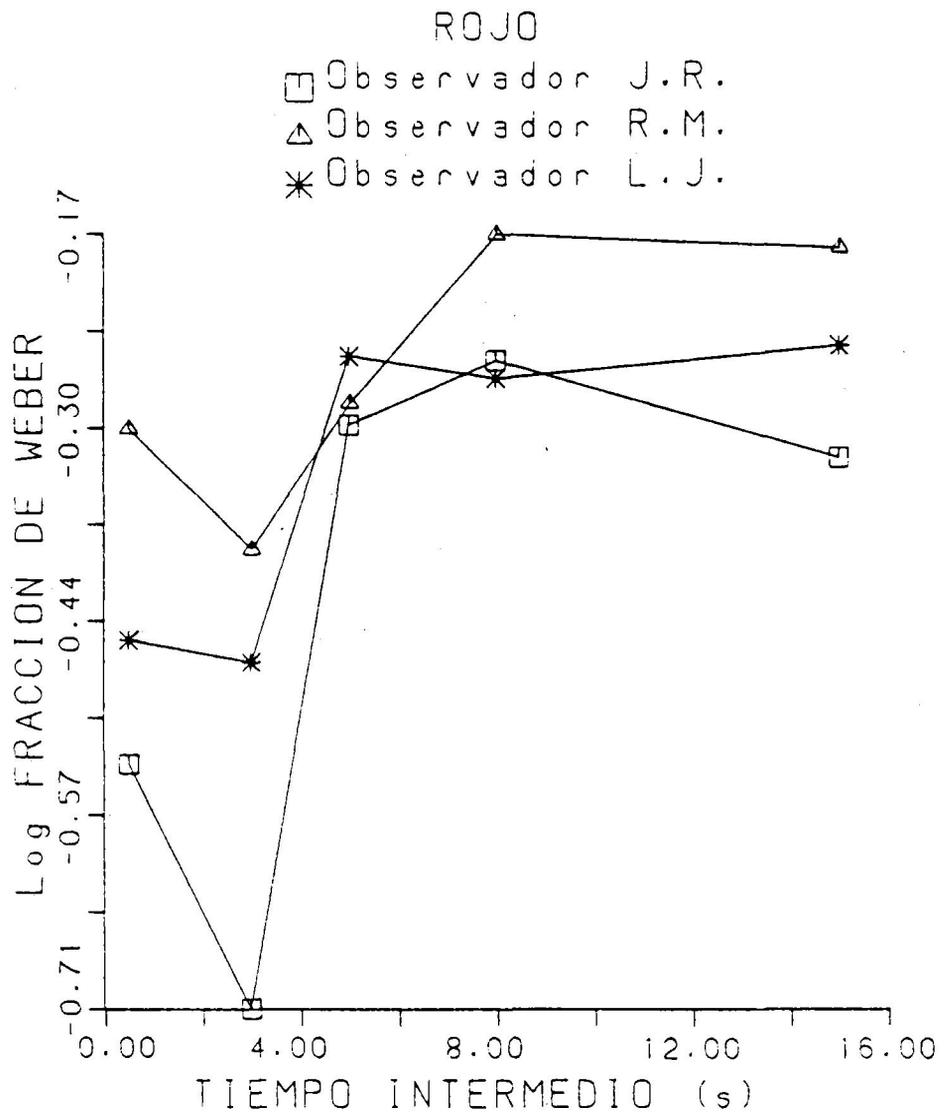


Figura 5.3: Resultados para el estímulo rojo mediante el método de ajuste del umbral al 95% de las igualaciones.

En la misma línea de análisis de las distintas zonas de las representaciones, para tiempos intermedios cortos se observa que no -- hay aumento sistemático del umbral a medida que el tiempo intermedio aumenta, sino que en muchos de los casos estudiados disminuye el valor del umbral entre 0.5 y 3 s, lo que es particularmente cierto para el estímulo rojo. De hecho, no aparecen diferencias significati--vas entre los valores de uno y otro caso en la mayoría de las situa--ciones.

A la vista de estas consideraciones cabría plantearse, si los resultados no son en cierta forma similares, cualitativamente, a los anteriormente mencionados de Uchikawa e Ikeda (1981), figura 2.1, co--rrespondientes a una curva de tipo escalón aunque con pendiente dis--tinta de 90°. Téngase en cuenta que en el caso de estos autores la --estabilización del umbral en longitud de onda se producía a partir --de 0.2 s hasta el tiempo máximo estudiado de aproximadamente 5 s, pu--diendo deberse estas diferencias al tiempo de exposición utilizado --por dichos autores de 0.11 s. En cualquier caso, no parecen estar de acuerdo nuestros resultados con lo apuntado por Uchikawa (1983) cuan--do indica que, aún utilizando tiempos de exposición de 1 s, se puede considerar estabilizada la discriminación a partir de los 2 s de --tiempo intermedio entre presentaciones.

En el caso que nos ocupa, no hemos realizado el ajuste de los resultados a una determinada curva debido a que, a pesar de ser usual en la literatura la realización de estos ajustes en condiciones pare--cidas a las nuestras, el número de puntos para ello no lo hemos con--siderado suficiente a la hora de obtener un coeficiente de correla--ción aceptable, parámetro éste que tampoco aparece en la literatura cuando tales ajustes se realizan.

Como apéndice a estos resultados son de notar las pruebas rea--lizadas, con posterioridad a la realización de las medidas y por el observador JR, por un método experimental distinto al hasta enton--ces empleado, para el estímulo rojo. Consiste este procedimiento en presentar al observador el estímulo de referencia previamente duran--te 5 s, tras lo que se le presentaban estímulos a comparar con él, -

con tiempos de exposición de 1 s. El observador había de juzgar, como en el método general, acerca de la igualdad o no de estos estímulos con el de referencia.

Basicamente pues, este método consiste en el mismo usado a lo largo de toda la memoria, pero reduciendo la presentación del estímulo de referencia a una sola vez al comienzo de la sesión experimental. Si bien este método presenta dificultades a la hora de su puesta en práctica debidas a las asimetrías inherentes al mismo, fue introducido como prueba a comparar con el anteriormente utilizado.

El valor medido para el umbral fue aproximadamente el mismo -- que el obtenido por el mismo observador y estímulo para un tiempo intermedio de 15 s, lo que puede apuntar, aunque dentro de la limitación que impone tener sólo un caso experimental, a que la estabilización del umbral pudiera considerarse aceptable dentro de los límites expuestos por los resultados.

Con vista a reforzar las posibles conclusiones que pueden derivarse de los resultados establecidos, se han evaluado los datos experimentales por el método de "las contribuciones experimentales", anteriormente descrito, apartado 4.4. Los resultados obtenidos por este método se dan en las figuras 5.4-6.

El comportamiento general observado es basicamente el mismo -- que el apuntado anteriormente, si bien los valores del umbral son relativamente más altos debido a las características del cálculo. Aparece de nuevo la tendencia a la estabilización del umbral, aunque de forma no tan acusada, siendo menor el número de casos en los que -- existe igualdad para los valores correspondientes a 8 y 15 s. Si ocurre esto para el observador JR, pero no en el resto de los casos donde lo que se observa es un aumento del umbral con el tiempo intermedio que tiende a ser menor conforme este alcanza valores más altos.

Parece entonces más próximo a los resultados obtenidos concluir un aumento del valor del umbral cuando el tiempo entre presentaciones aumenta, aunque tendiendo a una clara estabilización para tiempos superiores a 8 s, motivo por el que se adoptó éste para la reali

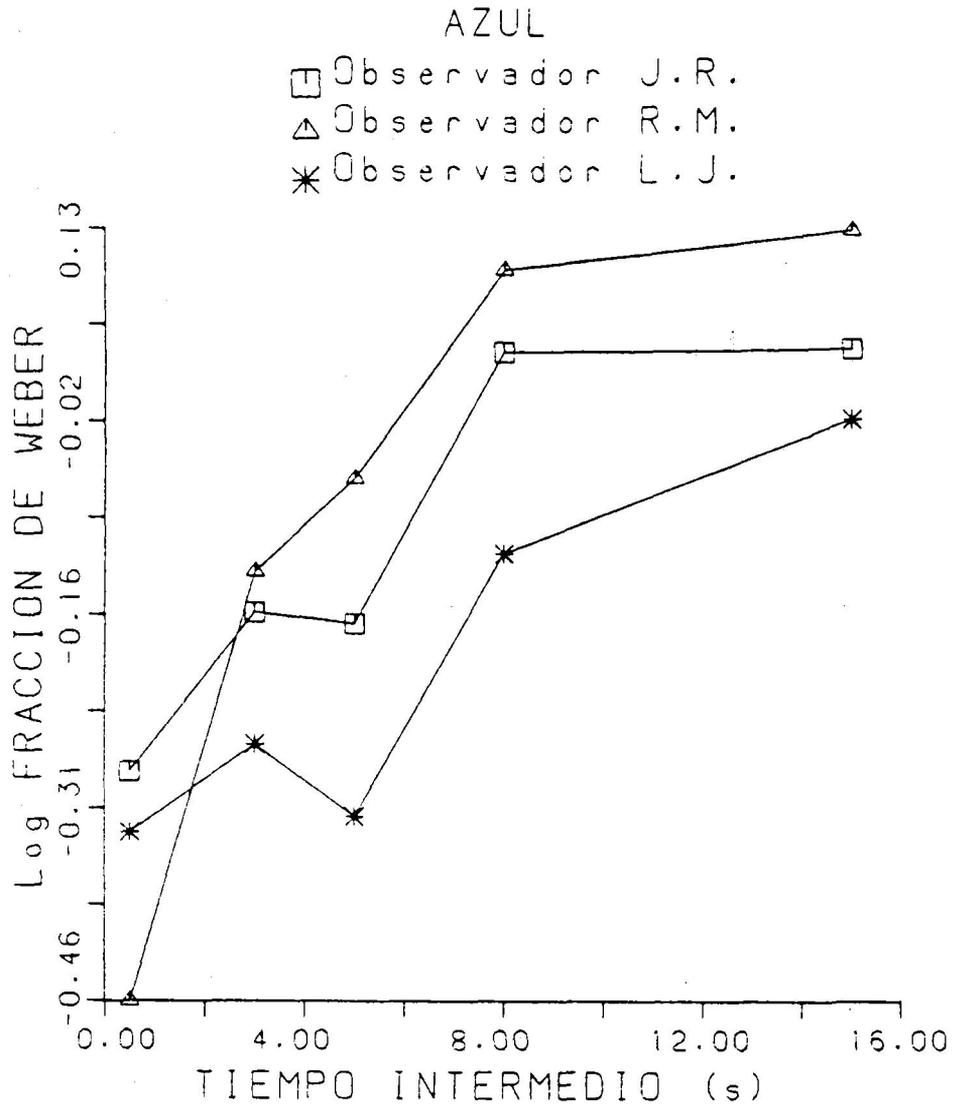


Figura 5.4: Resultados para el estímulo azul mediante el método de las contribuciones experimentales.

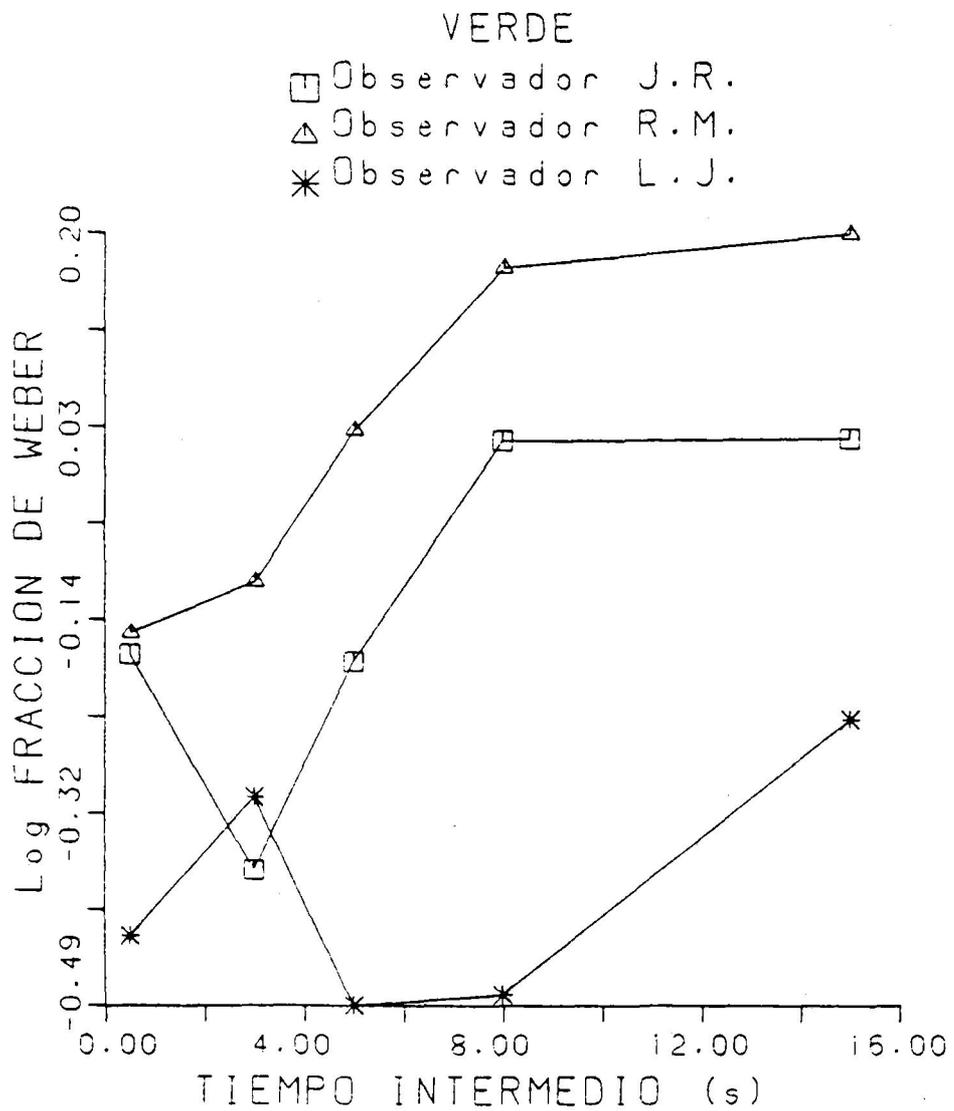


Figura 5.5: Resultados para el estímulo verde mediante el método de las contribuciones experimentales.

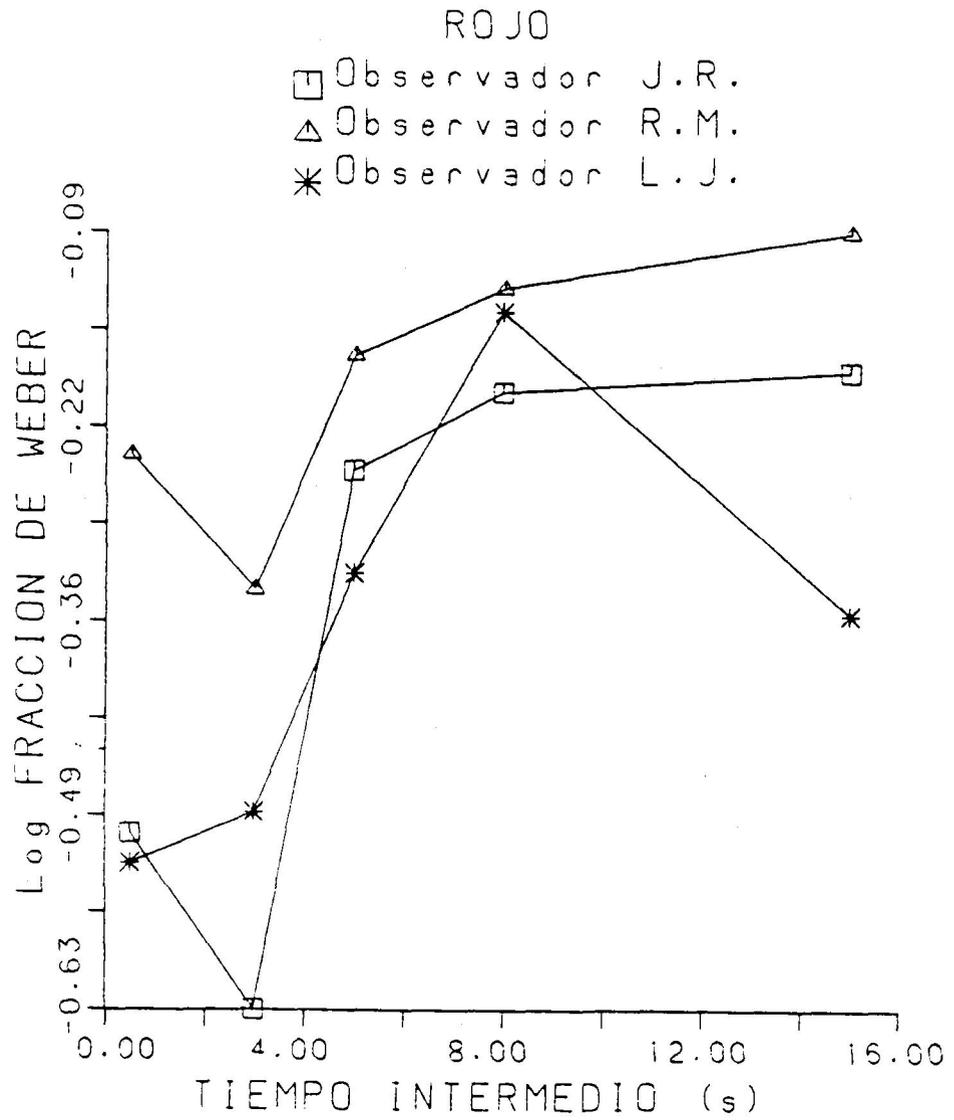


Figura 5.6: Resultados para el estímulo rojo mediante el método de las contribuciones experimentales.

zación posterior de las experiencias, junto con no ser un tiempo excesivamente largo, lo que haría difícil si no inviable la realización de las experiencias planteadas.

Las diferencias que, en algunos casos, se observan entre los valores relativos obtenidos por uno y otro método son propias a las características de los mismos y en ningún caso parecen afectar a las conclusiones generales mencionadas.

Otro aspecto de estudio de este apartado ha sido la evaluación de la diferencia de luminancia entre el estímulo de referencia y la obtenida como media ponderada de los distintos casos, es decir como:

$$Y_c = \frac{\sum p_i Y_i}{\sum p_i}$$

donde los p_i son los pesos estadísticos asociados a los distintos estímulos a comparar con el de referencia de luminancia Y_i . La base para este estudio parte de lo apuntado principalmente por Newhall et al. (1957), referente al posible aumento de la luminancia del estímulo "recordado" respecto del realmente visto, al hacer igualaciones de color en forma sucesiva. Las tablas V.I-III muestra las diferencias obtenidas para los distintos observadores, estímulos y tiempos.

Como se puede deducir de las mismas, no se pueden extraer conclusiones definitivas acerca del aumento de luminancia apuntado por Newhall. En efecto, de una parte los resultados para los estímulos azul y verde, en especial el primero, sí muestran esta característica con aumentos proporcionales de hasta, en algunos casos, alrededor del 20%. Sin embargo, no sucede lo mismo para el caso del estímulo rojo, de aproximadamente igual luminancia que el azul, donde lo que sucede es lo contrario, es decir, que las diferencias son de signo opuesto, aunque tampoco se den de forma clara.

Para el estímulo verde, el de mayor luminancia, las variaciones encontradas son las menos significativas en la mayor parte de los casos. Esto unido a lo encontrado para los estímulos azul y rojo hace -

suponer que lo indicado por Newhall no se cumple en el caso de un tipo de comparación como el que aquí se utiliza y si bien lo expuesto podría interpretarse como una dependencia del efecto apuntado por -- Newhall con la cromaticidad de los estímulos a comparar, lo cierto - es que las variaciones encontradas en un sentido u otro no pueden ser consideradas significativas. Por último, tampoco se detecta evolución de las diferencias con el tiempo intermedio entre presentaciones.

TABLA V.I: Diferencias relativas de luminancia para el estímulo AZUL; e: estímulo de referencia; c: media del umbral.

t_i	$(Y_e - Y_c) / Y_e$		
	RM	LJ	JR
0.5	-.216	-.153	-.262
3	-.213	-.074	-.210
5	-.167	-.063	-.259
8	-.179	-.054	-.227
15	-.215	-.120	-.177

TABLA V.II: Diferencias relativas de luminancia para el estímulo VERDE; e: estímulo de referencia; c: media del umbral.

t_i	$(Y_e - Y_c) / Y_e$		
	RM	LJ	JR
0.5	-.187	-.088	-.048
3	-.210	-.086	-.061
5	-.214	-.064	-.088
8	-.165	-.030	-.058
15	-.160	-.044	-.055

TABLA V.III: Diferencias relativas de luminancia para el estímulo ROJO; e: estímulo de referencia; c: media del umbral.

t_i	$(Y_e - Y_c) / Y_e$		
	RM	LJ	JR
0.5	+0.030	+0.035	+0.037
3	+0.029	+0.103	+0.060
5	+0.095	+0.091	+0.092
8	+0.069	+0.074	+0.066
15	+0.077	+0.129	+0.088

5.2.- Variación del Umbral Diferencial de Cromaticidad en Función del Tiempo Intermedio.

Una vez realizado el estudio de la influencia del tiempo intermedio en el umbral diferencial de luminancia es inmediato plantearse el problema bajo un punto de vista más general, extendiendo el estudio al caso de la discriminación en cromaticidad, aspecto éste de importancia fundamental en colorimetría. De hecho, es más frecuente encontrar en la literatura trabajos exclusivamente dedicados al estudio de la discriminación en el plano de cromaticidad, así como en longitud de onda o pureza colorimétrica, que trabajos que analicen la discriminación en color simultáneamente bajo todas las posibles variables de la percepción visual simple, o atributos de claridad, tono y saturación.

Este planteamiento, desde luego parcial, parecer ir en contra de un principio de funcionamiento global del ojo y por lo tanto sus conclusiones deben ser limitadas. La aceptación actual de lo expuesto lo pone de manifiesto la introducción en los sistemas de representación más modernos, CIELAB por ejemplo, de expresiones en las que en el cálculo de los tres parámetros derivados de la trivarianza visual se incluye la luminancia; tal es el caso de las coordenadas a^* y b^* del ejemplo mencionado.

Entendemos por tanto, que los estudios en colorimetría diferencial han de realizarse asociando el concepto de color a un todo, especificado por sus tres coordenadas, atendiendo en las experiencias a todas las posibles variaciones que puedan darse en las mismas. Esta opinión es compartida también por diversos autores, Wyszecki y Fiedler (1971).

Con ello sugerimos que, aunque interesados en el plano de cromaticidad en el caso que nos ocupa, se deriven los resultados de un estudio global en el que se tengan en cuenta las variaciones de las coordenadas de luminancia y cromaticidad de los posibles estímulos a analizar.

En nuestras experiencias se traduce todo ello en el cálculo del umbral de cromaticidad a partir de la obtención del umbral diferencial "global" de color. A la hora de evaluar los resultados esto se realizó mediante la obtención de la sección elíptica principal del elipsoide de discriminación, entendida esta como la que se obtiene cuando cortamos el mismo por un plano de luminancia constante que pase por su centro.

Los aspectos evaluados son en cierta forma los mismos que los anteriormente analizados cuando se estudian los umbrales diferenciales de luminancia, aunque bajo la perspectiva de estudiar parcialmente los aspectos de cromaticidad del problema general.

Para la realización de este trabajo se seleccionaron dos estímulos bien diferenciados en el diagrama cromático: amarillo y púrpura, actuando dos de los observadores que han participado en el desarrollo de la presente memoria: RM y JR, lo que puede considerarse suficiente con respecto a los objetivos que se han pretendido. Es decir, la posible generalización de la evolución: $\Delta L/L = f(t_1)$, encontrada anteriormente, al caso de variaciones de cromaticidad.

A la vista de los resultados anteriores, expuestos en el apartado 5.1, se seleccionaron los tiempos intermedios de 0.5, 3, 8 y 20 s. Como se puede observar, dos cambios aparecen respecto al estudio anterior: la no utilización del tiempo intermedio de 5 s, y el aumento del de 15 a 20 s. La justificación de estas variaciones se debe a -- que, tal como se ha visto en el caso de la luminancia, puede preverse que las zonas más interesantes en la evolución corresponden a los tiempos más cortos y a los más largos, lo que a la hora de programar convenientemente las medidas hace que no tomáramos en consideración 5 s, por otra parte tan próximo a 3 s en comparación con los otros tiempos seleccionados.

De otro lado, el cambio de 15 por 20 s se introdujo a fin de comprobar si se confirmaba la estabilización en la discriminación -- que por memoria se obtenía en el caso anterior, sin tomar, de otra -- parte, un tiempo intermedio excesivamente largo que pudiese introdu--

cir problemas adicionales y por tanto dejar de tener interés el tipo de comparación analizado.

Para caracterizar cuantitativamente este umbral, hemos representado el valor del área de la sección principal, en el sistema CIE 1931, en función del tiempo intermedio, habiéndose hecho una representación de los valores relativos de los mismos a fin de una mejor evaluación de las diferencias encontradas. Los resultados se muestran en las figuras 5.7-8, correspondientes a cada uno de los estímulos analizados.

Con respecto al estímulo amarillo, ambos observadores presentan un comportamiento muy similar, aunque mostrándose diferencias más acusadas en la variación relativa de los umbrales en el caso del observador JR. Como se puede observar, para los dos observadores aparece -- una disminución brusca en la capacidad de discriminación en cromaticidad al pasar de 3 a 8 s el tiempo intermedio. Esto se acompaña de menores variaciones por encima y por debajo de estos valores.

Tal y como aparecía en muchos de los casos anteriormente analizados para la luminancia, no hay prácticamente diferencias en el valor relativo del umbral al pasar de 0.5 a 3 s, lo que podría interpretarse como una constancia en la capacidad de discriminación debida a los efectos asociados al contraste sucesivo y a una débil pérdida de información para tiempos cortos de memoria.

Para los tiempos más largos aparece, en ambos casos, una disminución en el valor del umbral en 20 s respecto de 8 s, siendo acusada en el caso del observador JR, si bien dentro de los límites que en la variabilidad de las medidas en este campo de la visión del color suelen ser admitidas. Cabe pensar para este estímulo en la estabilidad en la capacidad de discriminación encontrada en el apartado anterior, pero referida ahora al umbral de cromaticidad.

En el caso del estímulo púrpura, no se presentan todas las características encontradas para el estímulo amarillo. Aunque sí se observa un aumento en el valor del umbral para los tiempos más largos, no se detecta una estabilización del mismo para uno de los observadores, RM, para el que el umbral sigue aumentando con el tiempo intermedio.

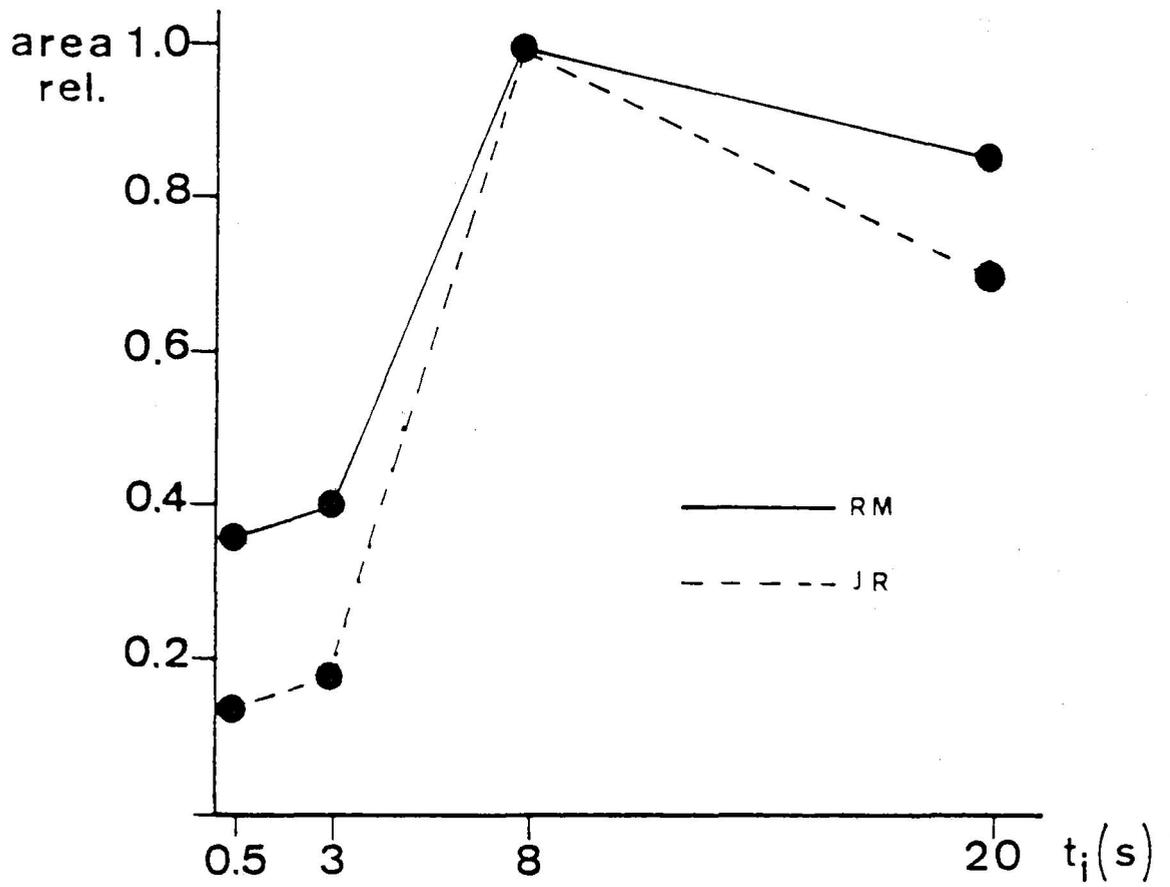


Figura 5.7: Resultados para el estímulo AMARILLO.

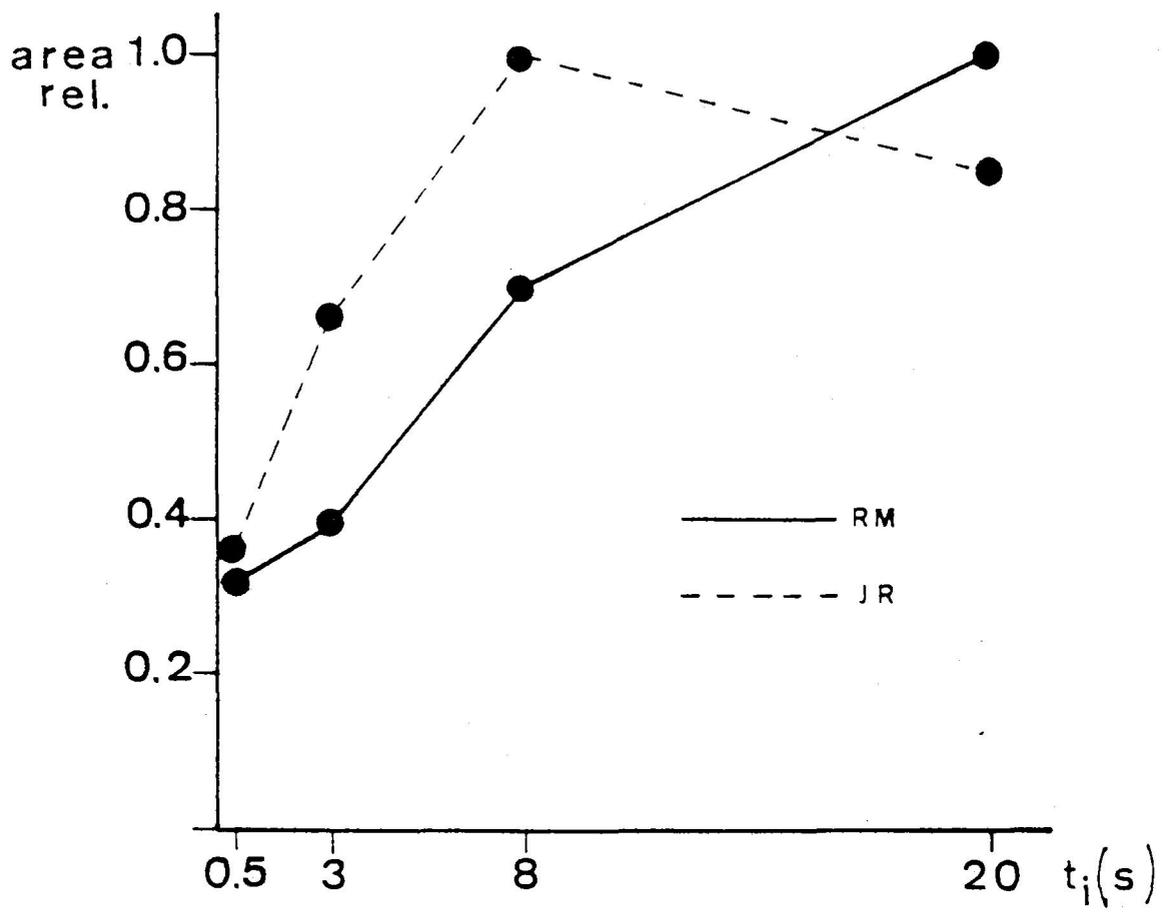


Figura 5.8: Resultados para el estímulo PURPURA.

En cualquier caso, esta variación relativa resulta ser menos pronunciada para tiempos largos.

Para el observador JR sí se obtienen resultados similares a los del estímulo amarillo, presentándose una débil disminución en 20 s -- respecto a 8 s, lo que refuerza lo anterior. Sin embargo, no parece poderse deducir lo previamente mencionado para tiempos intermedios -- cortos, lo que hace suponer que este hecho pueda estar ligado a la -- cromaticidad de los estímulos. De hecho, en los resultados para luminancia, se presentaba este efecto de una forma clara para uno de los estímulos, el rojo, frente a una aparición más ocasional en el resto de los casos.

En resumen y para todos los estímulos, parece que el valor del umbral correspondiente a tiempos intermedios largos, es aproximadamente -- el duplo del valor umbral correspondiente a tiempos cortos.

A la vista de estos resultados, no cabe suponer que la discriminación para presentaciones sucesivas en aspectos relacionados con la cromaticidad de los estímulos, pueda considerarse estabilizada en tiempos intermedios cortos, 3 s, como indica Uchikawa (1983) a pesar de -- que se utilicen tiempos de exposición de los estímulos de 1 s.

En cualquier caso, sí se puede deducir una falta de variabilidad significativa en la capacidad de discriminación de los observadores a partir de tiempos como los empleados en nuestras experiencias -- posteriores. Por otra parte, se acusa una posible influencia de la -- cromaticidad de los estímulos en las características de la discriminación por memoria, lo que estaría en la línea de lo expresado por Bartleson (1961) y que parece justificar la utilización industrial de algunos colores, incluso su patente.

Con respecto a los aspectos cualitativos de la discriminación, -- se han analizado, en el sentido apuntado por Newhall et al. (1957) acerca de las variaciones de saturación y claridad de los estímulos al hacer intervenir la memoria en los procesos visuales, los centros de las secciones representativas del umbral. Las coordenadas de cromaticidad de estos centros son obtenidas, en el ajuste del elipsoide, co-

mo la media ponderada de las coordenadas de todos los puntos que intervienen en la determinación del umbral, teniendo en cuenta los pesos estadísticos asociados a los mismos.

En las tablas V.IV-V se presentan los valores correspondientes a los distintos observadores, estímulos y tiempos analizados para el sistema CIE 1931. Si se pretende evaluar estos datos, es preciso referirse a la tabla IV.I, donde se muestran las coordenadas de cromaticidad de los estímulos analizados.

De la comparación directa de las distintas tablas de resultados, se desprende que las variaciones encontradas afectan, en cualquier caso, de forma poco significativa a las coordenadas de cromaticidad, lo que hace suponer que no puede considerarse importante la variación de la cromaticidad del centro de la elipse respecto del punto que representa el estímulo estudiado.

De otro lado, estas pequeñas variaciones no sugieren ninguna evolución determinada con la cromaticidad ni con los tiempos, lo que permite concluir que este tipo de presentación, y con la evaluación de los resultados utilizada, los efectos asociados a la memoria no introducen cambios en la cromaticidad media de los estímulos.

Este resultado es comparable a lo expuesto por Uchikawa e Ikeda (1981), cuando en el estudio de los umbrales en longitud de onda a lo largo del espectro, no encuentran variaciones cualitativas importantes respecto de las curvas obtenidas por comparación simultánea, si bien y relacionado con ello, han sido varios los autores, Newhall et al. (1957), Bartleson (1961), Hanes y Rhoades (1959), que han mostrado la falta de variación en el tono de los colores en experiencias de comparación sucesiva de estímulos.

Por otra parte, Uchikawa (1983), al estudiar el umbral de pureza colorimétrica sólo encuentra débiles variaciones en el sentido de aumento de la saturación media de los estímulos y no en todos los casos, lo que puede hacer suponer que en experiencias como las que aquí se plantean no se pueda deducir variaciones segnificativas en la cromaticidad media de los estímulos.

Esto no es óbice para que en el caso de objetos de color, u --
otras formas de intervención de la memoria en el proceso visual,
puedan aparecer estas variaciones, si bien en muchos aspectos suje--
tas a la variabilidad de las condiciones experimentales, así como a
otros aspectos de las muestras coloreadas a comparar distintos de los
de la percepción visual simple, Bartleson (1961).

TABLA V.IV: Centros de las elipses representativas del umbral diferencial de cromaticidad; estímulo AMARILLO.

(.495, .436)

<u>t_i</u>	<u>RM</u>		<u>JR</u>	
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>
0.5	.490	.441	.493	.440
3	.499	.439	.497	.440
8	.496	.435	.495	.434
20	.496	.435	.495	.432

TABLA V.V: Centros de las elipses representativas del umbral diferencial de cromaticidad; estímulo PURPURA.

(.337, .155)

<u>t_i</u>	<u>RM</u>		<u>JR</u>	
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>
0.5	.338	.156	.338	.158
3	.339	.157	.339	.156
8	.338	.156	.340	.157
20	.337	.154	.338	.155

5.3.- Estudio de los Umbrales Diferenciales de Color por Comparación Sucesiva de Estímulos

Una vez establecida la práctica estabilización en los umbrales diferenciales, tanto de luminancia como de cromaticidad, obtenidos a partir de la presentación sucesiva de estímulos, para tiempos intermedios de aproximadamente 8 s, parece lógico tratar de analizar estos umbrales en un espectro suficientemente representativo del diagrama cromático.

Este estudio, independientemente del análisis comparativo para estos mismos observadores y estímulos cuando la presentación de estímulos a comparar se hace de forma simultánea, lo que será objeto de un apartado posterior, se centrará en la comparación de nuestros resultados con los de otros autores para presentación simultánea y diferentes condiciones experimentales, centrándonos en diferentes aspectos. Ello basado en el carácter de trabajos de base, como los de MacAdam, muy aceptados en Colorimetría y que han servido de base a la misma.

En principio, y aunque la utilización de observadores diferentes limita, en parte, estas comparaciones en lo referente a la capacidad global de discriminación, parece interesante tratar de estudiar las posibles variaciones en la orientación de las elipses representativas del umbral diferencial de cromaticidad en los diferentes casos, estudio del que se pueden derivar aspectos de interés sobre la variación de las direcciones de mayor o menor capacidad de discriminación de los observadores cuando el tipo de comparación varía.

Otro objetivo también de interés radica en la comparación de los tamaños relativos de los umbrales para las diferentes zonas del espacio cromático, referentes a cada estudio particular por observadores, a fin de evitar los problemas derivados de la utilización de observadores diferentes. Este estudio pensamos que podría acarrear conclusiones de aplicación interesante bajo un punto de vista técnico.

Junto a este aspecto se plantea, por otro lado, el análisis de la variación de las excentricidades de las elipses ajustadas para los dife

rentes casos.

Lógicamente, el análisis que se plantea puede depender, en gran medida, del observador, por lo que un estudio comparativo entre observadores parece que pueda ser interesante con vistas a establecer la generalización de las conclusiones.

En otro orden de cosas, un problema asociado al análisis de datos empleado en la realización del trabajo radica en la posible desviación del centro del elipsoide con respecto al estímulo de referencia, lo que de acuerdo con algunos trabajos anteriores podría derivarse de la utilización de las funciones de mezcla del observador patrón y no las propias de los observadores, si bien este aspecto puede quedar paliado dado el carácter isómero de las igualaciones de partida, Hita et al.(1977).

Un problema, ya clásico en Colorimetría Diferencial para la presentación simultánea de estímulos, radica, de un lado en el estudio de la estructura métrica del espacio de color, problema intimamente ligado, como se ha mencionado anteriormente, con la forma de los umbrales diferenciales. La adecuación, o no, de estos umbrales a contornos elípticos puede acarrear consecuencias de transcendencia en este campo. Este análisis, profusamente realizado para trabajos en comparación simultánea, MacAdam (1943), Le Grand (1970), Parra (1970), Crawford (1970), Wyszecki (1971), Hita et al. (1976, 1982b), no ha sido realizado aún para umbrales sucesivos y parece interesante poder establecer comparaciones, en orden a diferenciar, si ello es factible, entre colorimetría diferencial por comparación simultánea y sucesiva.

También intimamente ligado a este problema se plantea el de la homogeneidad del espacio de color. Es conocido que, aceptando las elipses de MacAdam como representativas del umbral diferencial de cromaticidad, el interés fundamental de la colorimetría radica en encontrar un sistema de representación del color que, obtenido por transformaciones, lineales o no, del CIE 1931, convierta las mencionadas elipses en circunferencias que además sean iguales en tamaño para todo el espacio.

Ante este problema, hemos optado por realizar una doble representación de nuestros resultados utilizando el sistema CIE 1931, de un lado,

y el CIELAB de otro. La elección de este segundo sistema frente a otros posibles, radica en que diferentes autores apuntan la posibilidad de -- que este sea el sistema que mejor consigue las premisas establecidas, Lozano (1978), Pointer (1981), Hita et al. (1984), si bien no de una forma definitiva y dependiendo de múltiples parámetros.

La elección del sistema CIE 1931 se hace necesaria si se pretende, como es el caso, la comparación de nuestros resultados con los trabajos básicos en este campo.

Por otro lado, y con miras a analizar la adecuación de la nube de puntos representativa del umbral al contorno elíptico ajustado, hemos realizado también una representación de ambos aspectos centrándonos en las secciones elípticas principales, ya que, en realidad, estas secciones son las que presentan interés para estudios restringidos al plano de cromaticidad.

En este sentido, se representan proyectados sobre el contorno elíptico obtenido al cortar el elipsoide de discriminación por un plano perpendicular al eje de luminancia que pase por su centro, los puntos contenidos en un intervalo de luminancias equivalentes a 1/10 del valor total del valor del umbral de luminancia, lo que nos permite asegurar un valor prácticamente constante de la misma para todos ellos.

Esta representación se ha realizado también en los dos sistemas de especificación del color adoptados, ya que debido al carácter, no lineal de las transformaciones puestas en juego al pasar de un sistema a otro -- pudieran producirse distorsiones significativas en la nube de puntos, -- Pointer (1981).

Una vez establecidos los diferentes aspectos a analizar en este -- apartado, pasamos a dar los resultados experimentales obtenidos en cada caso. En principio, y como elemento de referencia, nos referiremos a las tablas V.VI-VII, donde se especifican las coordenadas de cromaticidad -- de los estímulos estudiados.

En este sentido, las figuras 5.9-38 muestran los resultados obtenidos para los cinco estímulos analizados y los tres observadores con -- tiempo intermedio de 8 s. En cada una de estas figuras se indican los --

parámetros del elipsoide ajustado, así como de la sección principal - del mismo, para los dos sistemas, CIE-1931 y CIELAB.

Las figuras 5.39-41 son un resumen de las anteriores, realizado con miras a una evaluación, si bien menos exhaustiva, sí global de los resultados.

Finalmente, las figuras 5.42-56, representan los contornos elípticos ajustados para la sección principal del elipsoide de discriminación y las nubes de puntos correspondientes a cada caso y sistema.

De la comparación de las figuras anteriores con los resultados de MacAdam y Stiles, figuras 1.3-4, se encuentra que no existen diferencias altas entre las orientaciones de las elipses de discriminación para ninguno de los observadores, todo ello, claro está, dentro del margen de variabilidad que es de esperar en este tipo de experiencias. Es más, resulta interesante constatar que no se observan diferencias tan significativas como las apuntadas por Wyszecki (1972) para un mismo - observador y diferentes situaciones experimentales cuando la presentación de estímulos es simultánea. Téngase en cuenta las diferencias -- tan significativas entre ambas experiencias, si bien es cierto que, - de acuerdo con este autor, nuestros resultados, como ha sido establecido, se han obtenido tratando de integrar estas posibles variaciones individuales.

Algo similar puede decirse en lo referente a los tamaños relativos de estas elipses para las distintas zonas del espacio de color.

Cabe, no obstante, señalar la existencia de un pequeño giro generalizado para los tres observadores de las elipses representativas para el estímulo verde hacia la derecha con respecto a los resultados de MacAdam, lo que podría implicar una dependencia de la orientación de los umbrales con el tipo de presentación. En la misma línea, algo similar sucede con los umbrales representativos del estímulo azul, pero no se acusa tanto en los demás casos.

En lo referente a los tamaños relativos, no se detectan variaciones que puedan ser consideradas de interés o con una evolución determinada.

Con relación a las excentricidades, también relativas, la dispersión de resultados es ciertamente alta y no permite apreciar variaciones generalizadas en ningún sentido, si bien tampoco cabe expresar de una forma global que existan diferencias significativas con relación a los resultados obtenidos por MacAdam y sugeridos por Stiles en base a su elemento de línea. No obstante, del análisis de los resultados parece desprenderse una mayor tendencia a la homogeneidad, relación de semejejes igual a uno, en el caso del observador JR que para los otros dos.

Del estudio comparativo de los umbrales encontrados para los tres observadores y los cinco estímulos analizados, resulta interesante observar la alta similitud de los mismos, lo que en principio no era de esperar, máxime teniendo en cuenta el tipo de igualación estudiado y el intervalo de tiempo entre presentaciones adoptado. Considérese, una vez más, los resultados de Wyszecki (1971), e incluso los propios de nuestro laboratorio para igualaciones simultáneas, Hita et al.(1979), donde era de esperar una mayor coincidencia que aquí.

También es de destacar la gran coincidencia entre el centro del elipsoide de error ajustado y las coordenadas del estímulo de referencia estudiado lo que en principio tampoco era de esperar, pues aun dado el carácter isómero de las igualaciones de partida, el tipo de experiencia planteado podría inducir una cierta dispersión.

Para el estudio de los anteriores parámetros en el caso del sistema CIELAB, nos hemos remitido al trabajo de Pointer (1981) en el que los resultados de MacAdam se transforman a este sistema, lo que no está exento de problemas cuando la transformación de las elipses se hace directamente dado el carácter no lineal de la misma, Hita et al.(1984). Como se ha comentado anteriormente esto se ha evitado en este trabajo.

Conclusiones similares a las anteriores pueden obtenerse del estudio comparativo realizado en este caso.

Con vistas a cuantificar algunos de los aspectos mencionados, las tablas V.VI-VII representan un resumen de los tamaños y excentricidades, así como orientaciones de las elipses calculadas anteriormente.

Como se puede observar no existen diferencias pronunciadas entre

observadores, si a caso la capacidad de discriminación más limitada - del observador JR.

Con referencia al estudio de la posible homogeneidad de ambos sistemas de representación del espacio de color, pueden seguirse muchos procedimientos para su análisis, concretamente todos los propuestos para este mismo problema, pero en presentación simultánea por Pointer (1981) e Hita et al. (1984). No obstante seguiremos el más simple consistente en el cálculo de la excentricidad media (tomando esta como relación de semiejes) y su desviación típica, analizándose después si existen diferencias significativas entre ambos sistemas.

En este cálculo se incluyen todos los resultados de todos los observadores en cada sistema. De las tablas V.VI-VII se obtiene:

Sistema CIE 1931 (n= 15); $\bar{x} = 0.399$; $\sigma_n = 0.101$

Sistema CIELAB (n= 15); $\bar{x} = 0.383$; $\sigma_n = 0.163$

Evaluada la diferencia entre estos valores al 95% de significación, no se encuentran diferencias entre ambos sistemas con respecto a la uniformidad local representada por el análisis de la excentricidad.

En cualquier caso un estudio completo de este aspecto requiere también analizar la igualdad en los tamaños de las elipses a lo largo del diagrama cromático. Este estudio se ha llevado a cabo mediante el cálculo de la desviación típica para cada sistema, de las áreas de las elipses, normalizadas al valor medio a fin de hacer comparables ambos sistemas de representación. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Sistema CIE 1931; $\sigma_n = .848$

Sistema CIELAB ; $\sigma_n = .402$

En este caso se observa como aparece una desviación menor para el sistema CIELAB. Un analisis estadístico al 95% de significación da como resultado que ambas desviaciones no puedan ser consideradas iguales en este nivel de significación, lo que implica una diferencia entre ambos sistemas. En este sentido parece pues que el sistema CIELAB pre-

senta ventajas frente al CIE 1931 con respecto a la uniformidad a lo largo del espacio.

Finalmente, del análisis de las figuras 5.42-56, se puede deducir la bondad del ajuste de las nubes de puntos a los contornos elípticos calculados, si bien en algunos casos este ajuste parece más deficiente que en otros.

Cabe señalar aquí, que los mismos problemas que se plantean en el estudio de umbrales para presentación simultánea, aparecen en este caso, es decir, puntos de peso nulo se incluyen dentro del contorno elíptico y algunos de peso no nulo salen fuera de él. No obstante, este problema no tiene en este caso el mismo valor que en el de las comparaciones simultáneas, debido al carácter mucho más aleatorio de las respuestas por memoria.

En cualquier caso, no aparecen como excesivamente frecuentes estas situaciones y en la mayor parte de los casos los puntos de peso no nulo que salen fuera, no suelen ser de muy alto valor. Además los puntos de peso nulo que aparecen en el interior raramente se acercan al centro del elipsoide. Todo ello nos permite afirmar la existencia de un buen ajuste en la mayor parte de los casos y por tanto, la bondad de la elipse como representativa del umbral de cromaticidad para el caso de la colorimetría diferencial en presentación sucesiva de estímulos.

Debemos advertir por último, la necesidad de revisiones más -- profundas si se pretende llegar a conclusiones de tipo matemático concernientes a la estructuración métrica del espacio de color, aun tratándose de estas experiencias, Hita et al. (1982b).

TABLA V.VI: Resumen de los resultados experimentales obtenidos para las elipses de discriminación en el sistema CIE 1931.

OBSERVADOR: R.M.

<u>estímulo</u>	<u>orientación</u>	<u>relación semiejes</u>	<u>área.10⁻⁴</u>	<u>centro</u>	<u>estímulo referencia</u>
azul	75'1°	0.32	2.22	x=0.176 y=0.121	0.176 0.121
verde	83'5°	0.57	41.60	0.296 0.502	0.298 0.495
magenta	26'8°	0.33	10.60	0.571 0.337	0.569 0.337
amarillo	48'2°	0.44	14.24	0.496 0.435	0.497 0.436
púrpura	32'0°	0.30	5.23	0.338 0.156	0.337 0.155

OBSERVADOR: L.J.

azul	77'6°	0.35	1.69	0.176 0.120	0.176 0.121
verde	77'2°	0.42	39.78	0.296 0.493	0.298 0.495
magenta	30'2°	0.34	13.67	0.569 0.334	0.567 0.337
amarillo	49'7°	0.30	11.21	0.495 0.429	0.497 0.436
amarillo	35'5°	0.30	4.34	0.340 0.155	0.337 0.155

TABLA V.VI: Continuación

OBSERVADOR J.R.

<u>estímulo</u>	<u>orientación</u>	<u>relación semiejes</u>	<u>área.10⁻⁴</u>	<u>centro</u>	<u>estímulo referencia</u>
azul	75'4°	0.36	4.88	0.176 0.123	0.176 0.121
verde	86'7°	0.50	27.76	0.298 0.495	0.298 0.495
magenta	20'3°	0.52	15.09	0.570 0.337	0.569 0.337
amarillo	53'1°	0.61	22.61	0.495 0.434	0.497 0.436
púrpura	28'9°	0.33	5.26	0.340 0.157	0.337 0.155

TABLA V.VII: Resumen de los resultados experimentales obtenidos para las elipses de discriminación en el sistema CIELAB.

OBSERVADOR R.M.

<u>estímulo</u>	<u>orientación</u>	<u>relación semiejes</u>	<u>area</u>	<u>centro</u>	<u>estímulo referencia</u>
azul	318'6°	0.16	160.25	a*= 45.46 b*=-102.36	45.54 -109.13
verde	129'7°	0.69	576.67	- 62.68 40.80	-60.55 39.16
magenta	89'2°	0.31	369.36	79.67 52.98	79.61 57.54
amarillo	94'9°	0.27	400.39	17.89 74.05	17.81 79.15
púrpura	124'1°	0.44	272.51	118.88 -77.72	119.50 -77.95

OBSERVADOR L.J.

azul	319'9°	0.16	120.19	46.25 -109.73	45.54 -109.13
verde	117'4°	0.54	553.36	- 60.47 38'35	-60.55 39.16
magenta	92'6°	0.33	450.92	81.05 56.80	79.61 57.54
amarillo	96'6°	0.21	279.15	19.19 70.04	17.81 79.15
púrpura	126'6°	0.38	222.80	119.80 -77.09	119.50 -77.95

TABLA V.VII: Continuación

OBSERVADOR J.R.

<u>estímulo</u>	<u>orientación</u>	<u>relación semiejes</u>	<u>area</u>	<u>centro</u>	<u>estímulo referencia</u>
azul	319'2°	0.18	330'14	43.59 -107.54	45.54 -109.13
verde	131'9°	0.58	385.55	-59'98 39'08	-60.50 39.16
magenta	89'1°	0.54	509'32	79'77 58'58	79.61 57.54
amarillo	98'7°	0.41	576'86	17.82 72.34	17.81 79.15
púrpura	127.1°	0.54	226'42	117.78 -76.20	119.50 -77.95

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .176			Area ($\times 10^{-4}$) = 2.22
y = .121	2.37	-.742	Orientación = 75.19
Y = 9.588			Rel. Semiejes = .32

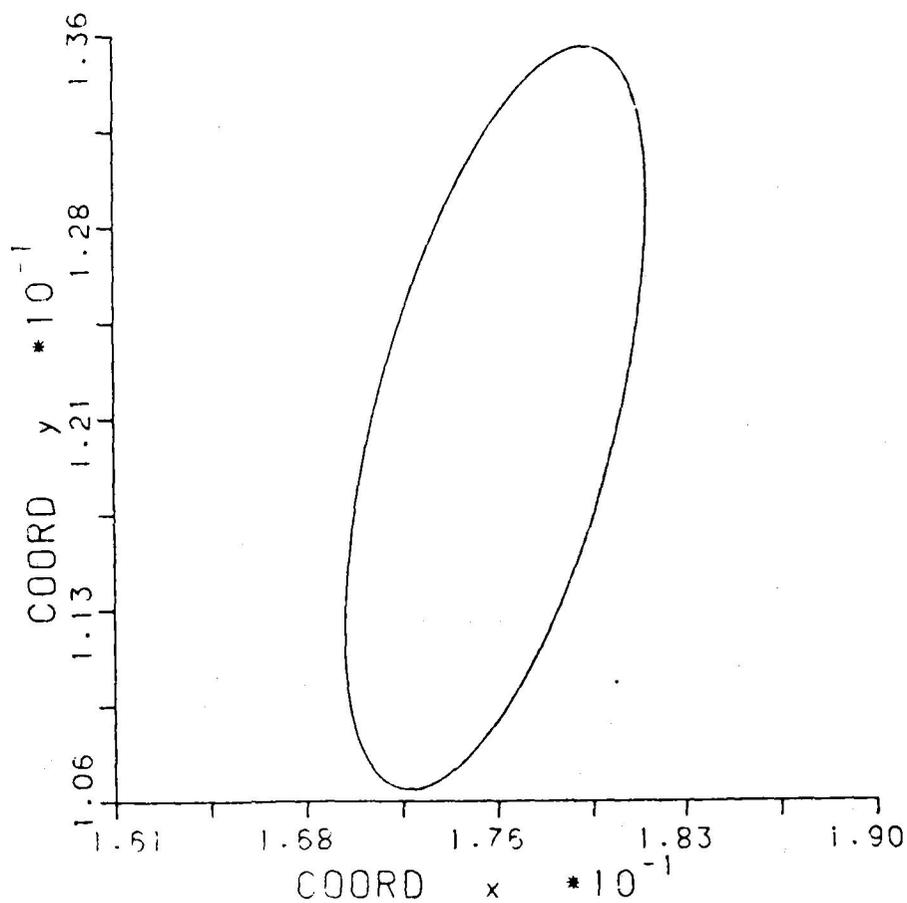


Figura 5.9: Resultados para el estímulo AZUL; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 45.46			
b* = -109.36			Area = 160.25
L = 63.29	532.78	-1.201	Orientación = 318.69
H = 292.59			Rel. Semiejes = .16
S = 1.87			

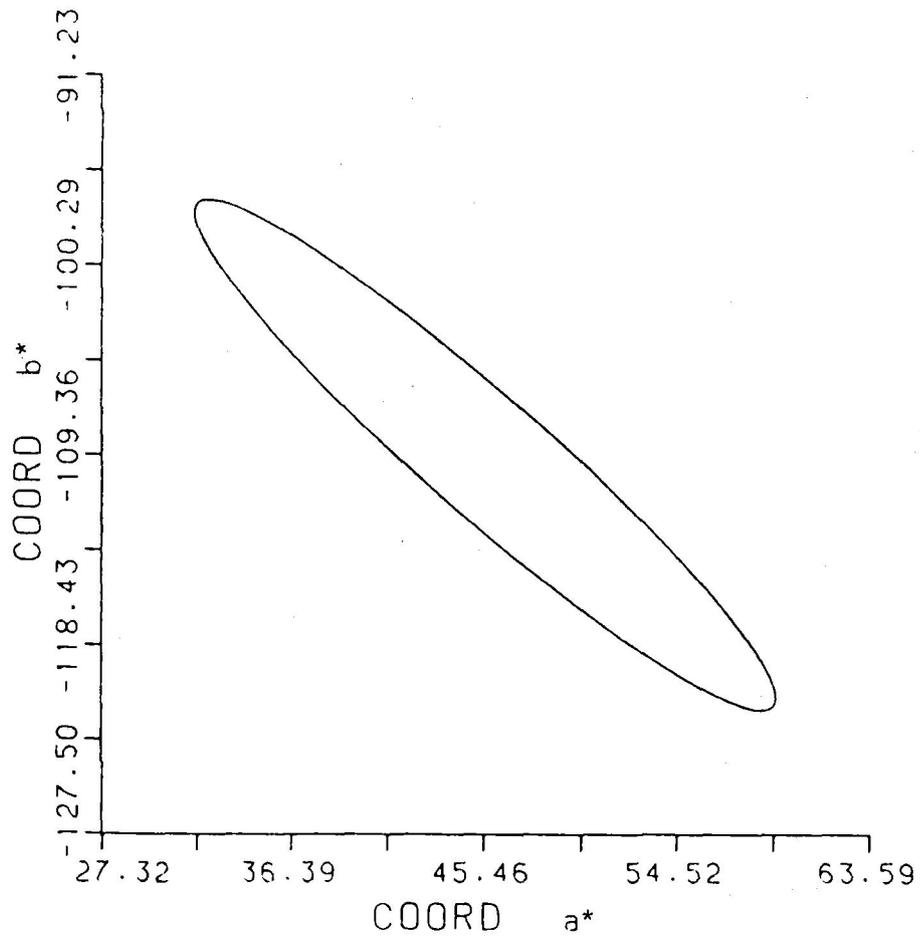


Figura 5.10: Resultados para el estímulo AZUL; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .176			Area ($\times 10^{-4}$) = 1.69
y = .120	1.79	-.717	Orientación = 77.69
Y = 9.537			Rel. Semiejes = .35

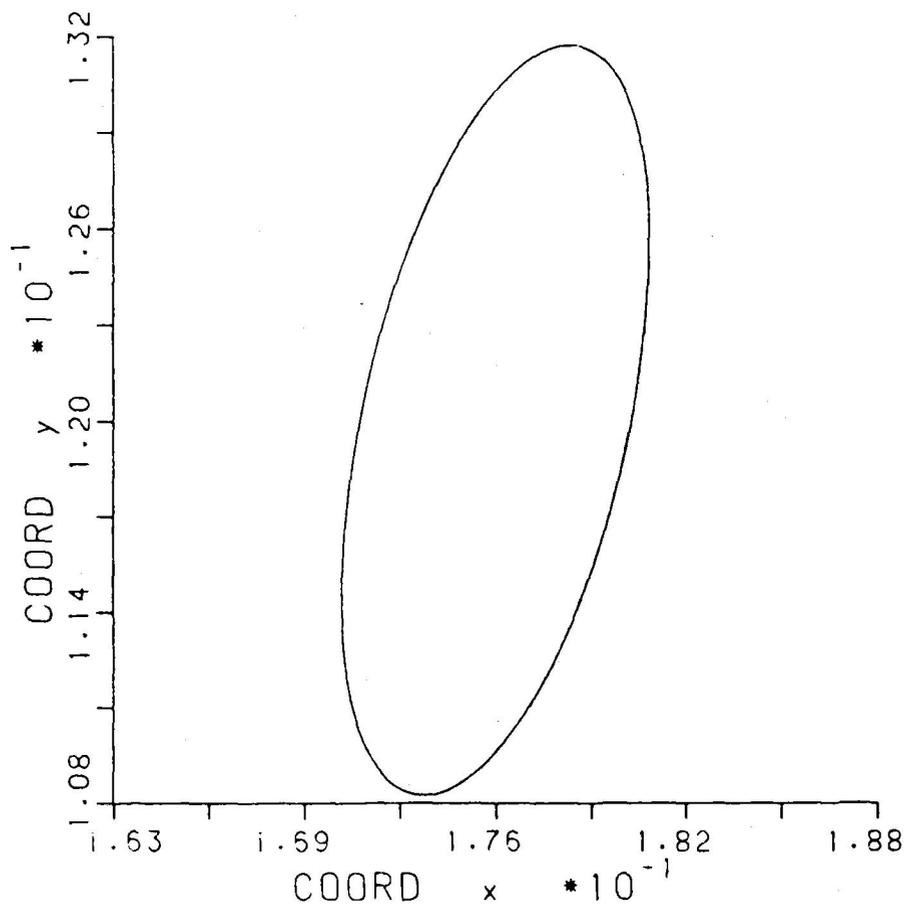


Figura 5.11: Resultados para el estímulo AZUL; observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 46.25			
b* = -109.73			Area = 120.19
L = 63.15	437.90	-1.208	Orientación = 319.99
H = 292.99			Rel. Semiejes = .16
S = 1.89			

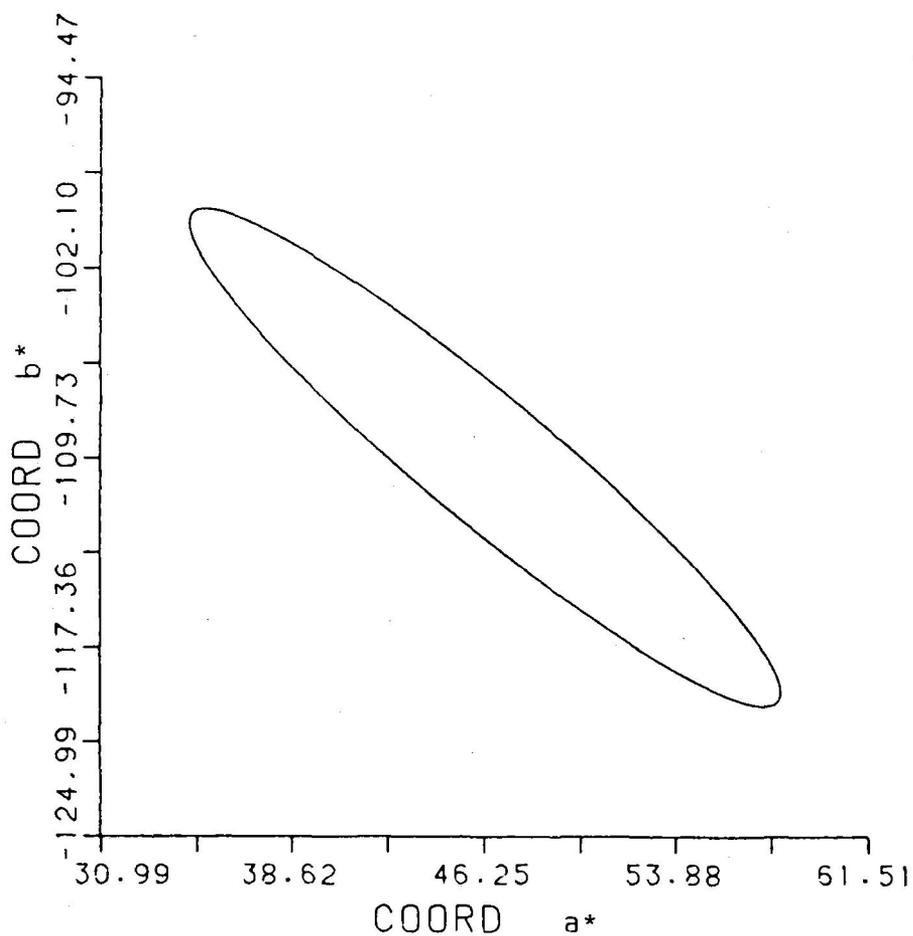


Figura 5.12: Resultados para el estímulo AZUL; observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .176			Area ($\times 10^{-4}$) = 4.88
y = .123	9.66	-.575	Orientación = 75.49
Y = 9.541			Rel. Semiejes = .36

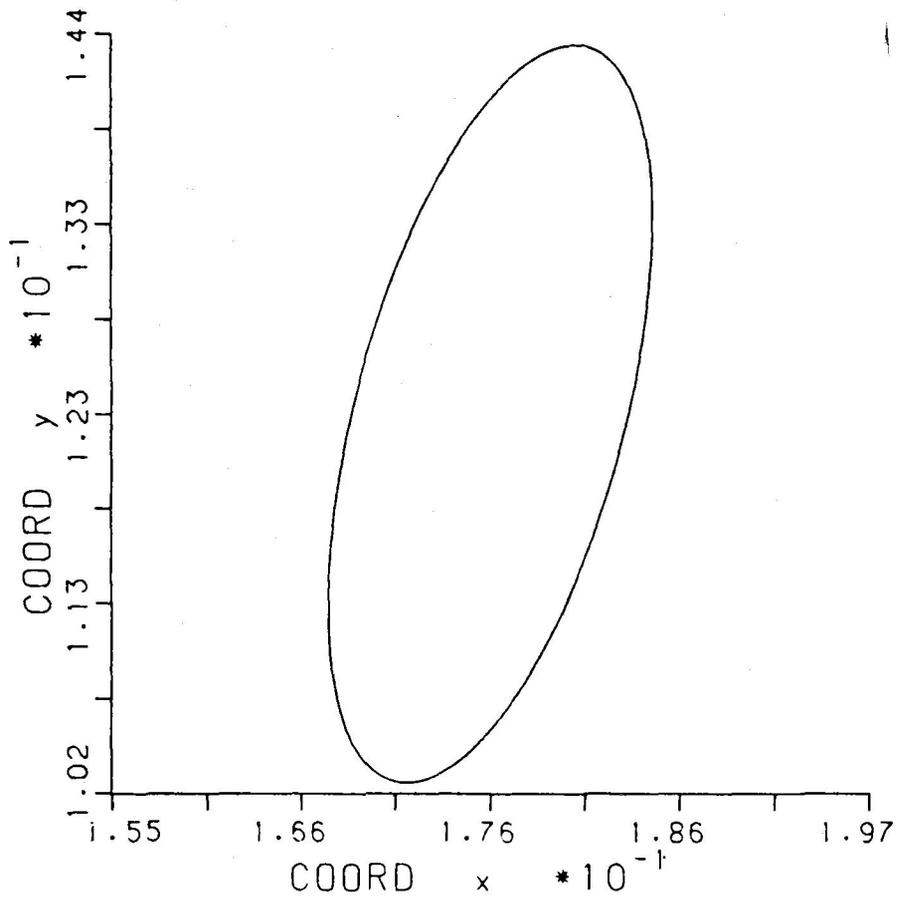


Figura 5.13: Resultados para el estímulo AZUL; observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 43.59			
b* = -107.54			Area = 330.14
L = 63.14	2022.53	-1.044	Orientación = 319.29
H = 292.19			Rel. Semiejes = .18
S = 1.84			

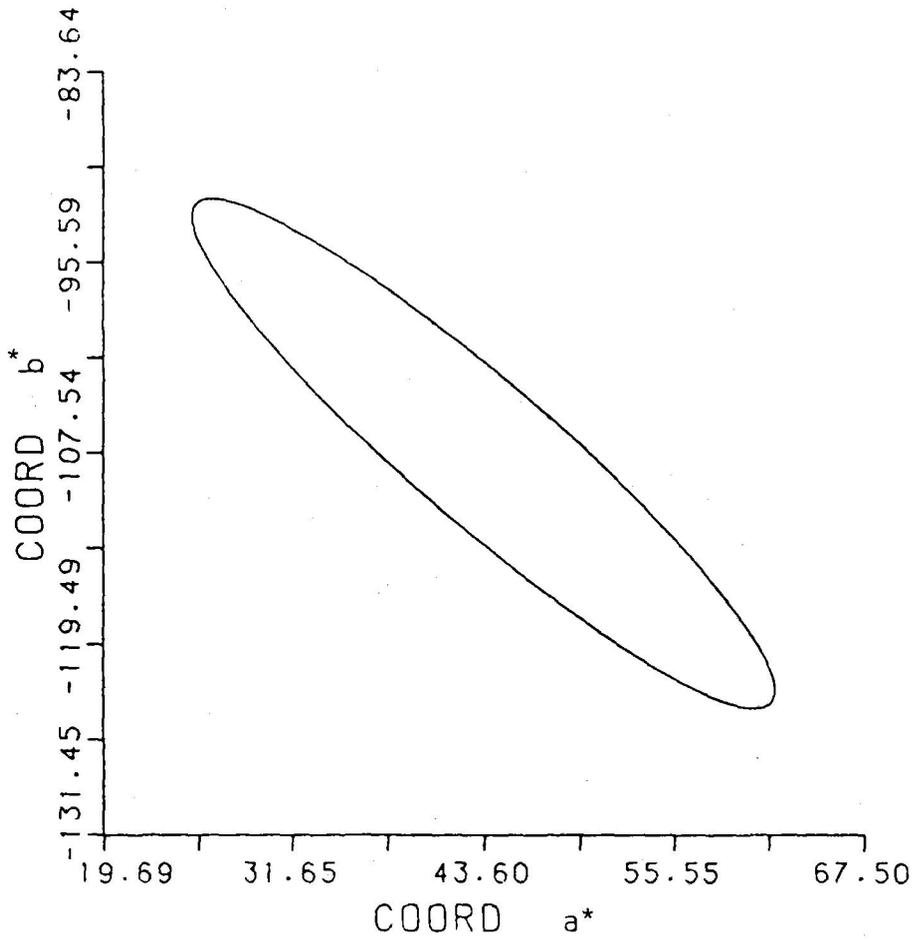


Figura 5.14: Resultados para el estímulo AZUL; observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .296			Area ($\times 10^{-4}$) = 41.60
y = .502	128.76	-.529	Orientación = 83.59
Y = 14.173			Rel. Semiejes = .57

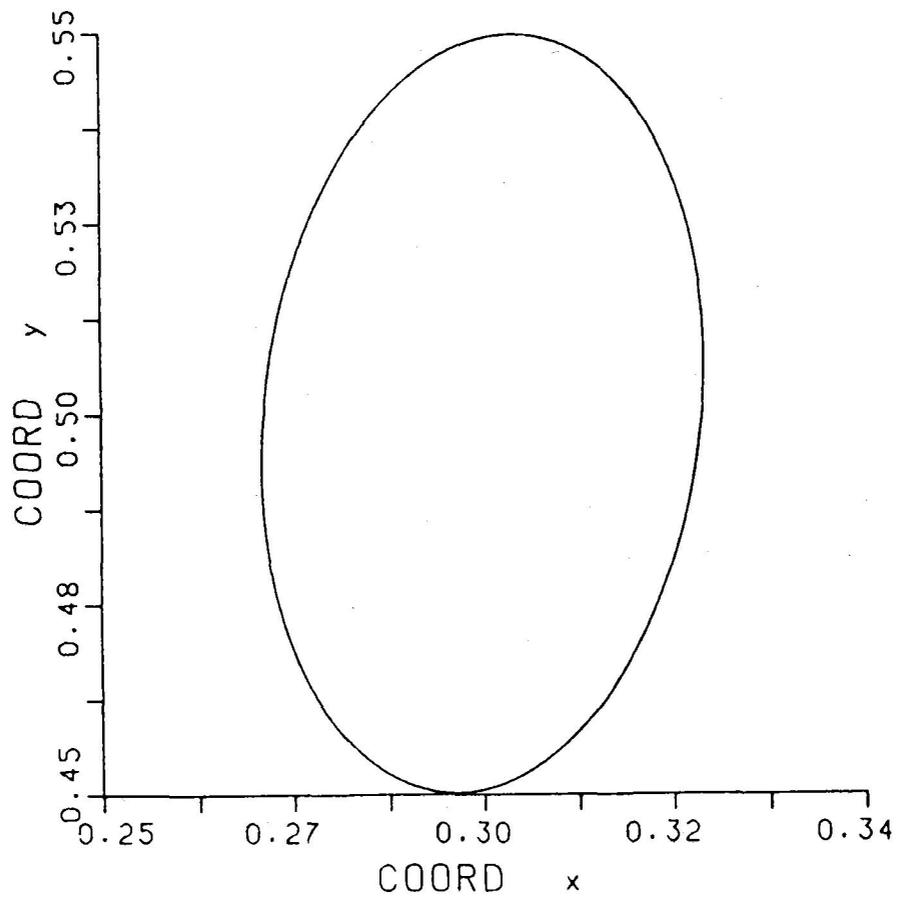


Figura 5.15: Resultados para el estímulo VERDE; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
$a^* = -62.68$			
$b^* = 40.80$			Area = 576,67
$L = 74.30$	3858,66	-0.973	Orientación = 129.79
$H = 146.99$			Rel. Semiejes = .69
$S = 1.01$			

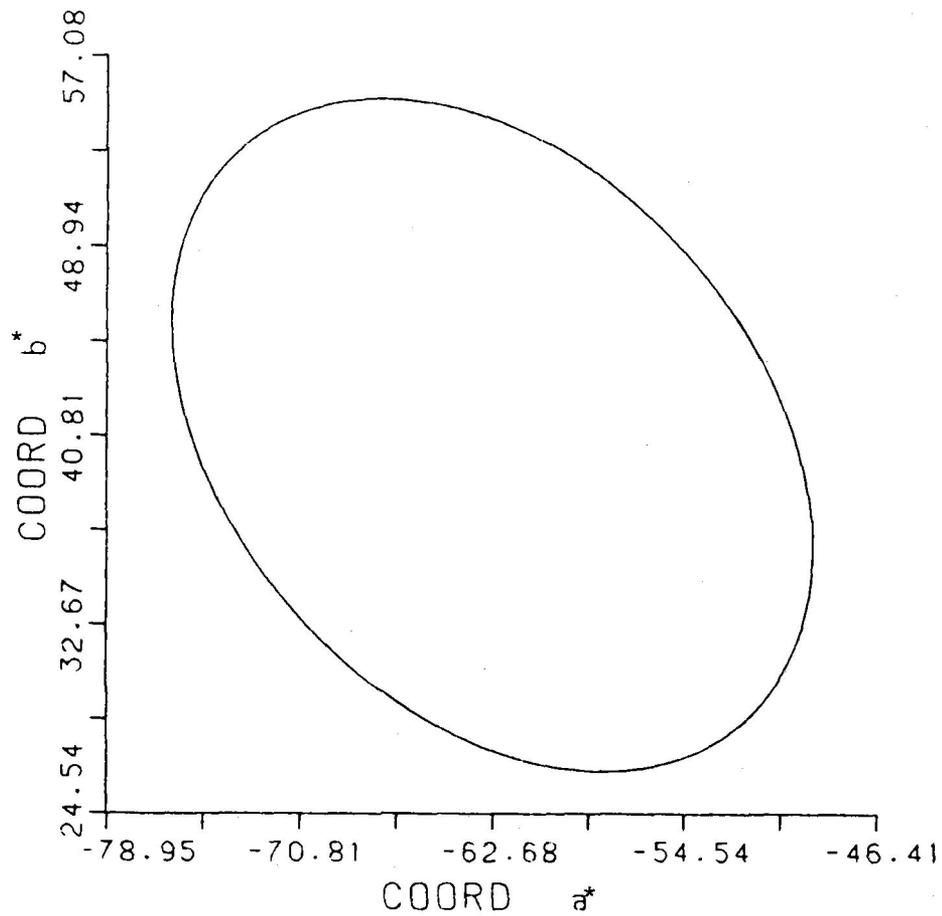


Figura 5.16: Resultados para el estímulo VERDE; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .296			Area ($\times 10^{-4}$) = 39.78
y = .493	110.21	-.529	Orientación = 77.29
Y = 13.975			Rel. Semiejes = .42

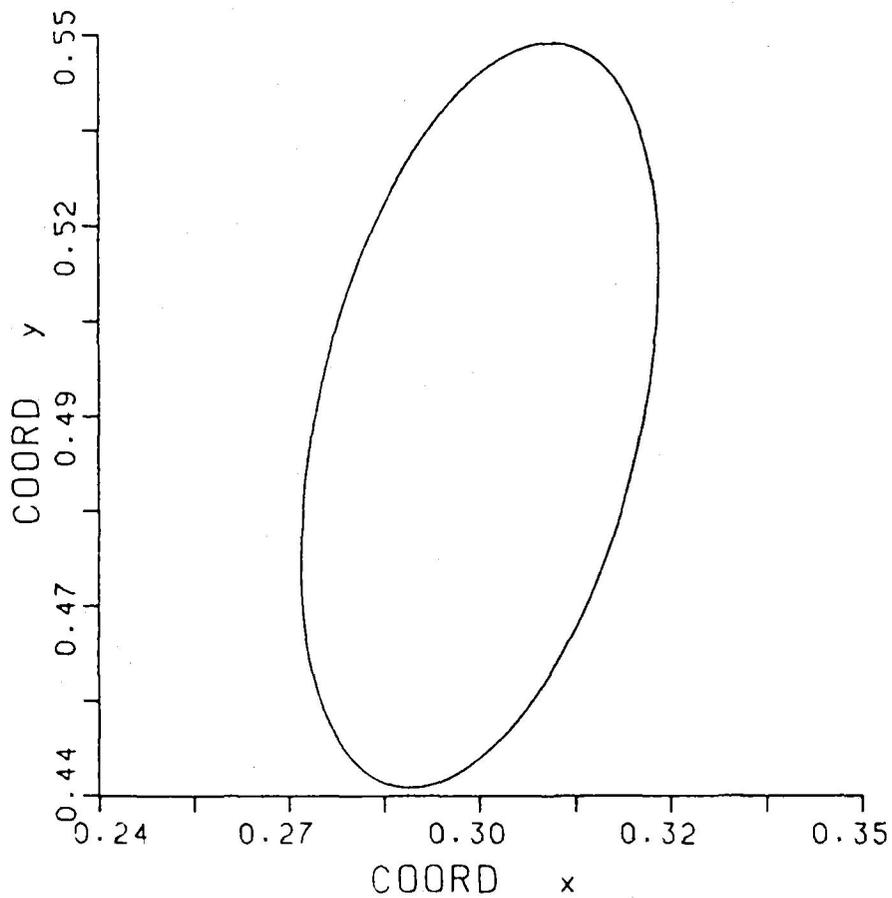


Figura 5.17: Resultados para el estímulo VERDE; observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = -60.47			
b* = 38.35			Area = 553.36
L = 73.89	3366.07	-.951	Orientación = 117.49
H = 147.62			Rel Semiejes = .54
S = .97			

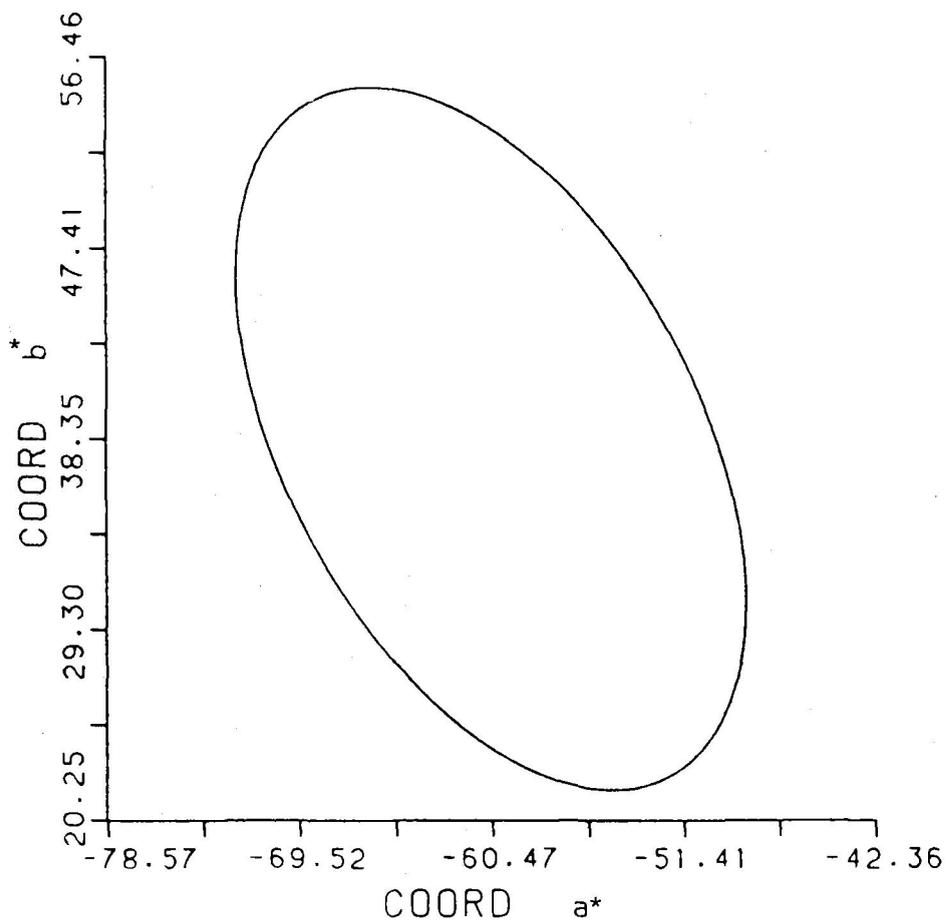


Figura 5.18: Resultados para el estímulo VERDE; observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .298			Area ($\times 10^{-4}$) = 27.76
y = .495	62.90	-.701	Orientación = 86.72
Y = 13.966			Rel. Semiejes = .50

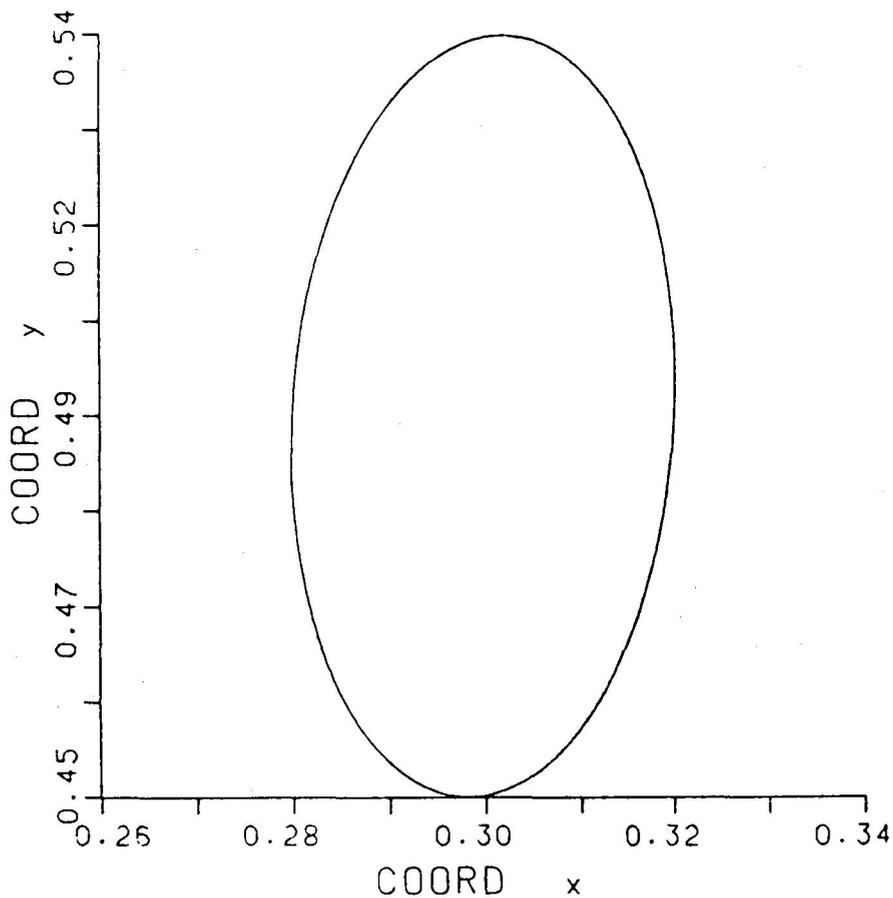


Figura 5.19: Resultados para el estímulo VERDE; observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección principal</u>
a* = -59.98			
b* = 39.08			Area = 383.55
L = 73.88	1891.65	-1.141	Orientación = 131.90
H = 146.90			Rel. Semiejes .58
S = .97			

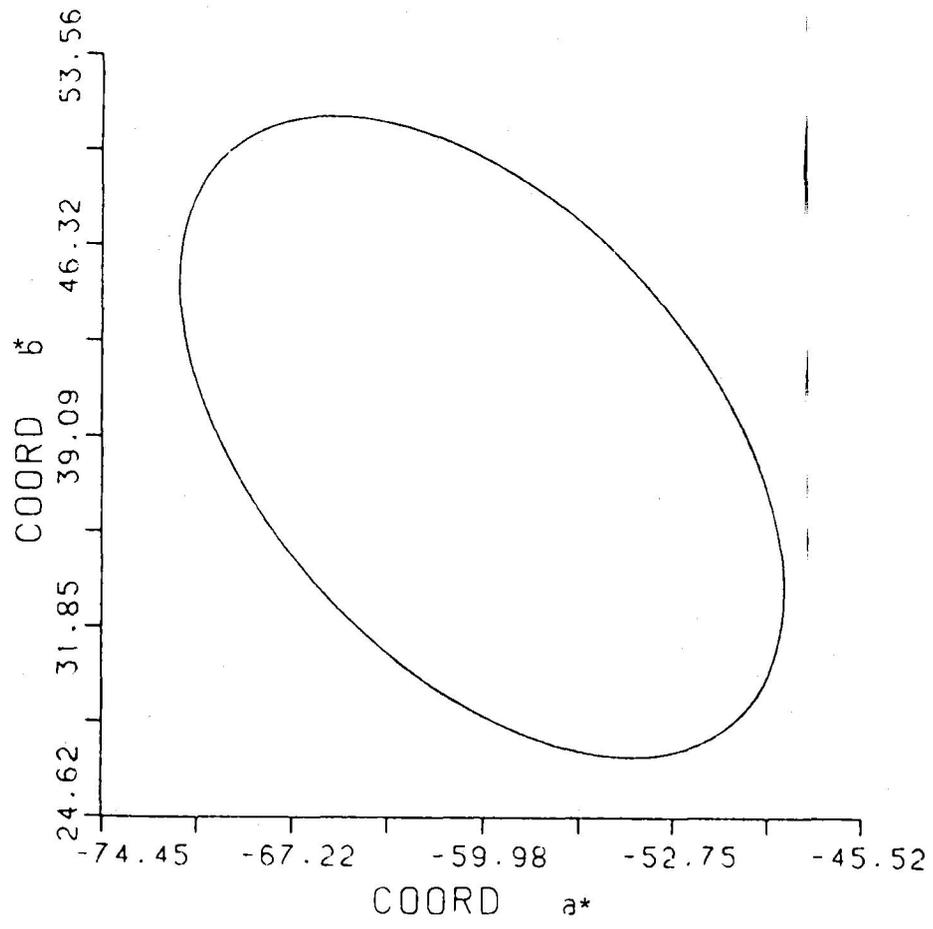


Figura 5.20: Resultados para el estímulo VERDE; observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .571			Area ($\times 10^{-4}$) = 10.60
y = .337	19.90	-.804	Orientación = 26.89
Y = 17.200			Rel. Semiejes = .33

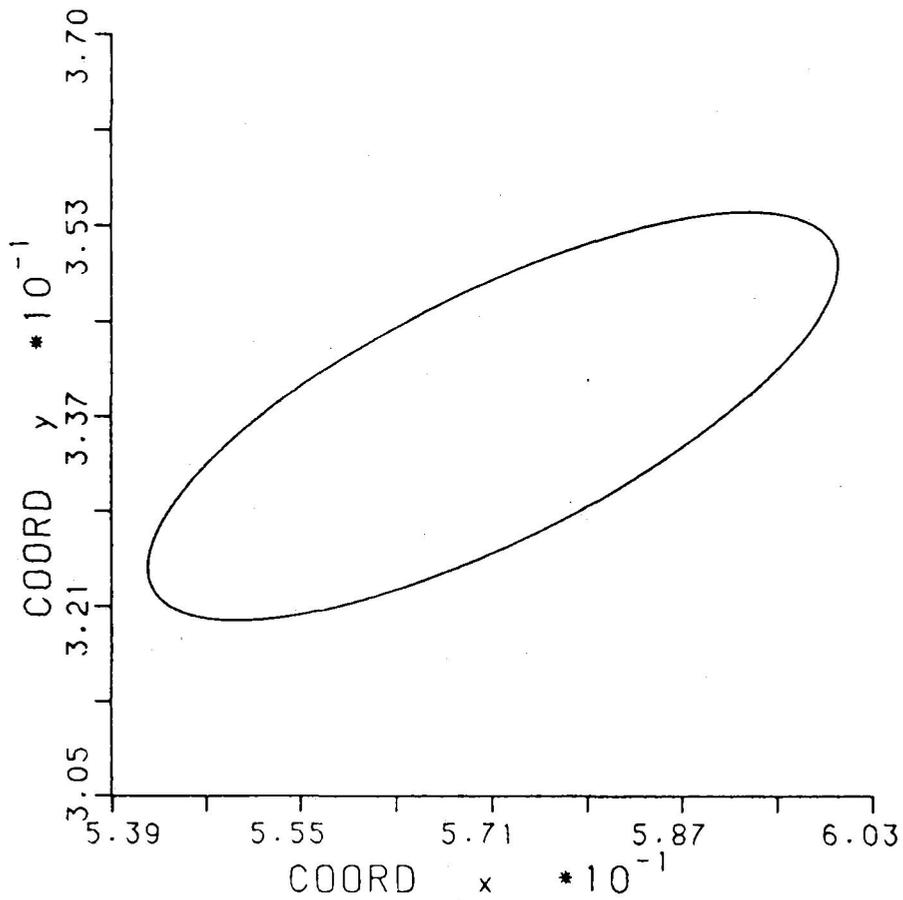


Figura 5.21: Resultados para el estímulo MAGENTA;
observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 79.67			
b* = 52.98			Area = 369.36
L = 80.35	1350.39	- 1.265	Orientación = 89.29
H = 36.59			Rel. Semiejes = .31
S = 1.23			

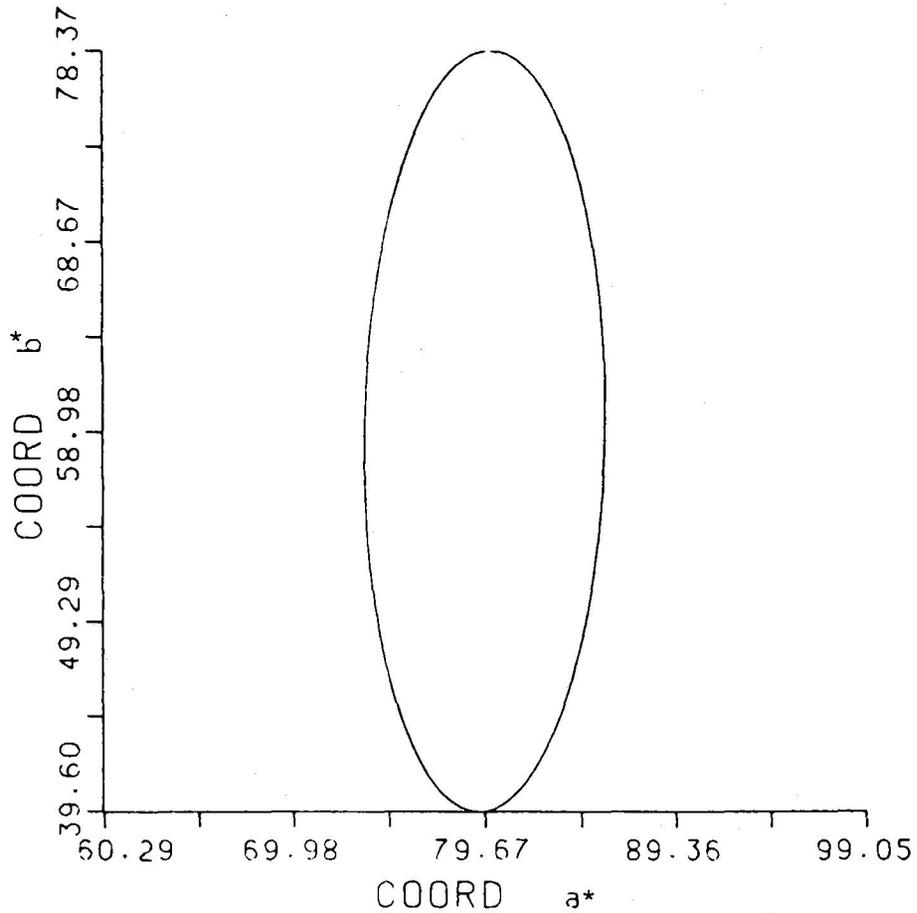


Figura 5.22: Resultados para el estímulo MAGENTA;
observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .569			Area ($\times 10^{-4}$) = 13.67
y = .334	28.67	-.731	Orientación = 30.29
Y = 17.383			Rel. Semiejes = .34

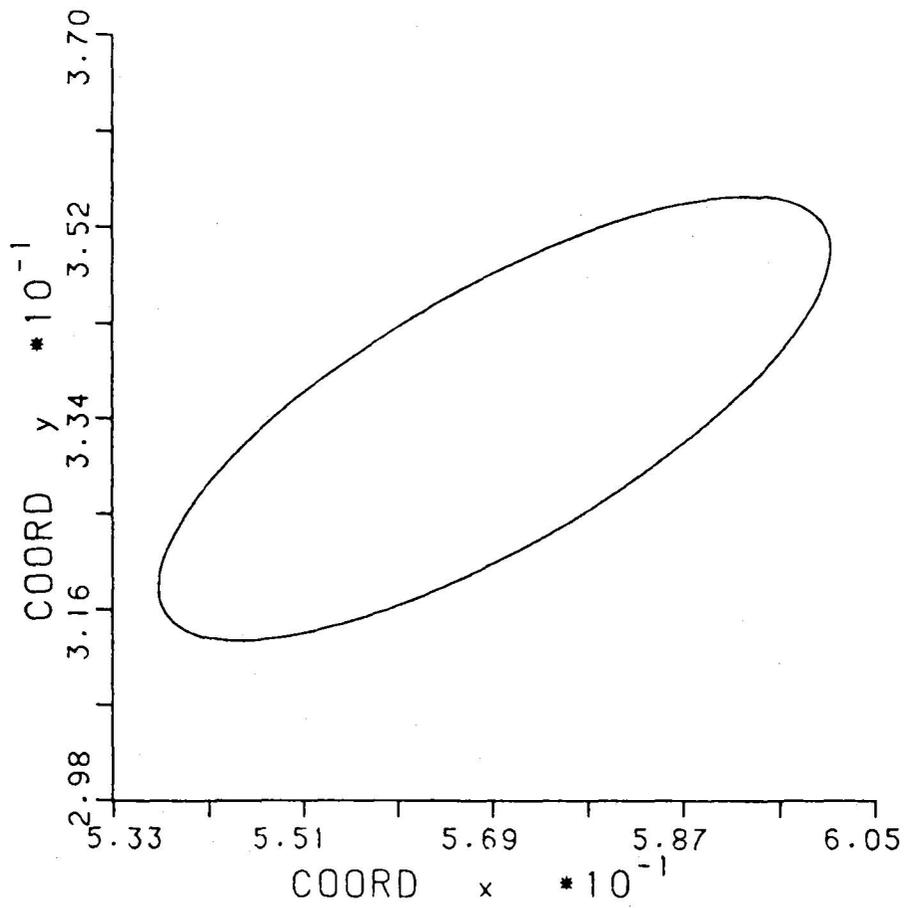


Figura 5.23: Resultados para el estímulo MAGENTA;
observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 81.05			
b* = 56.80			Area = 450.92
L = 80.69	1843.47	-1.188	Orientación = 92.60
H = 35.00			Rel. Semiejes = .33
S = 1.23			

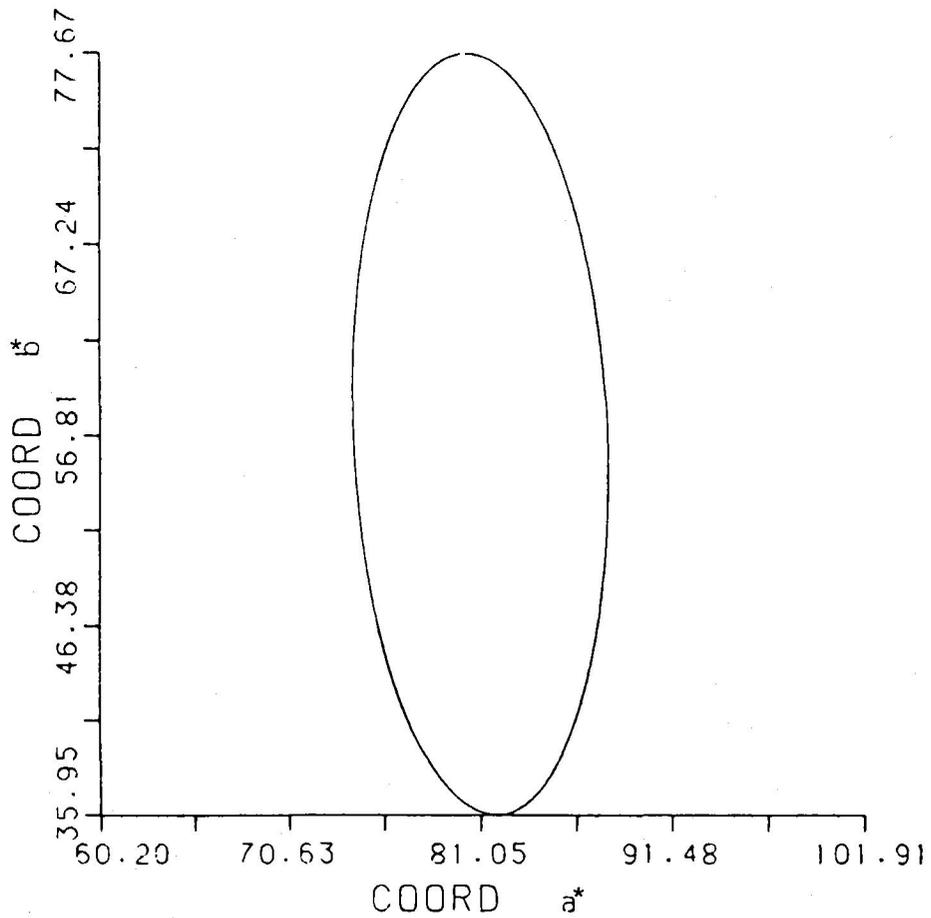


Figura 5.24: Resultados para el estímulo MAGENTA;
observador LJ

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .570			Area ($\times 10^{-4}$) = 15.09
y = .337	27.43	-.843	Orientación = 20.39
Y = 17.321			Rel. Semiejes = .52

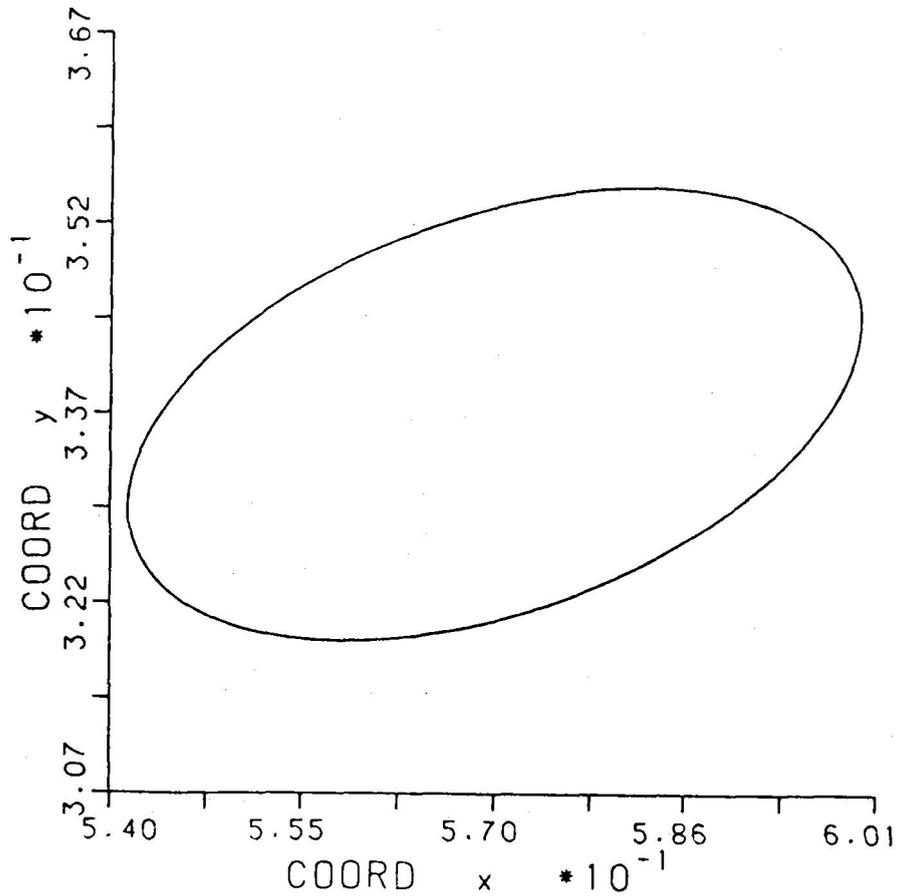


Figura 5.25: Resultados para el estímulo MAGENTA;
observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 79.77			
b* = 58.58			Area = 509.32
L = 80.58	1758.41	-1.213	Orientación = 89.19
H = 36.39			Rel. Semiejes = .54
S = 1.23			

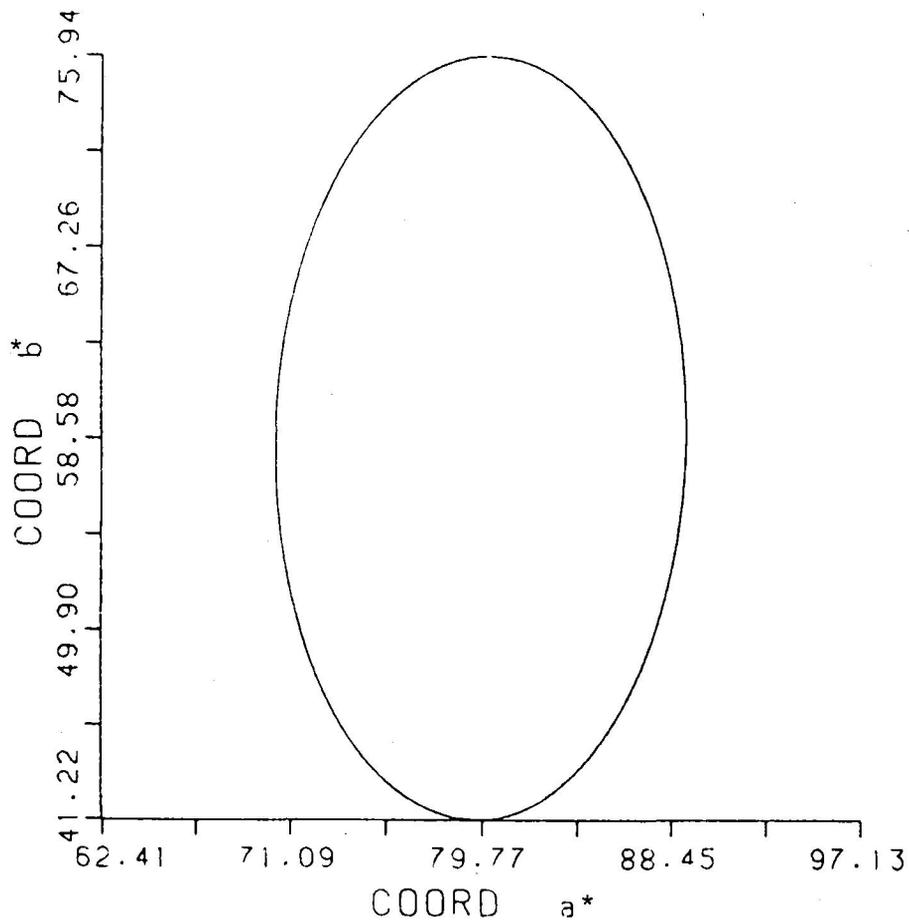


Figura 5.26: Resultados para el estímulo MAGENTA;
observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. (10^{-4})</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .496			Area ($\times 10^{-4}$) = 14.24
y = .435	18.76	-.881	Orientación = 48.29
Y = 15.200			Rel. Semiejes = .44

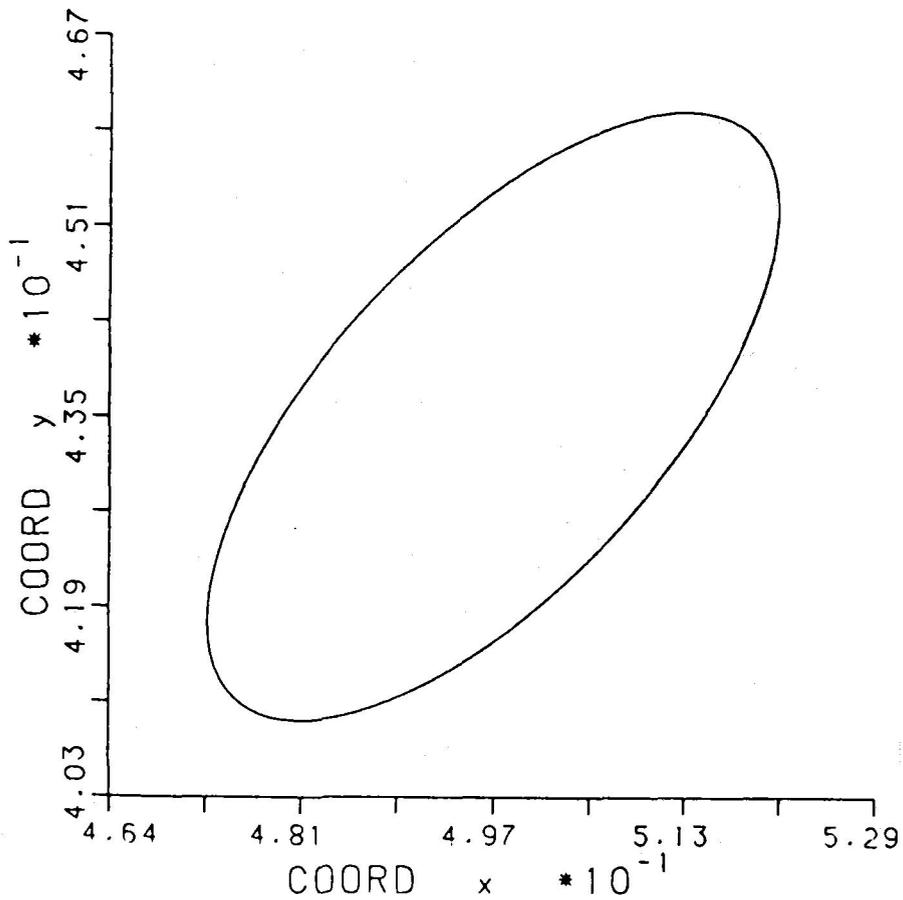


Figura 5.27: Resultados para el estímulo AMARILLO; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 17.89			
b* = 74.05			Area = 400.39
L = 76.47	1079.34	-1.278	Orientación = 94.99
H = 76.49			Rel. Semiejes = .27
S = 1.00			

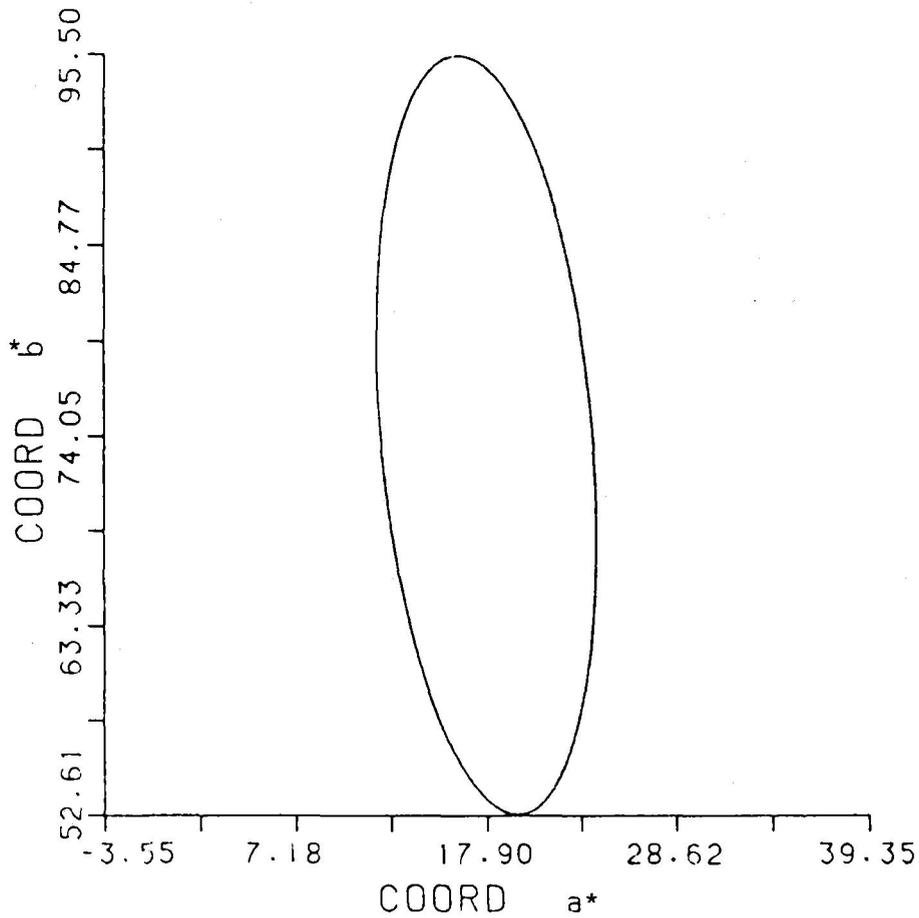


Figura 5.28: Resultados para el estímulo AMARILLO; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .495			Area ($\times 10^{-4}$) = 11.21
y = .429	12.88	-.928	Orientación = 49.79
Y = 14.800			Rel. Semiejes = .30

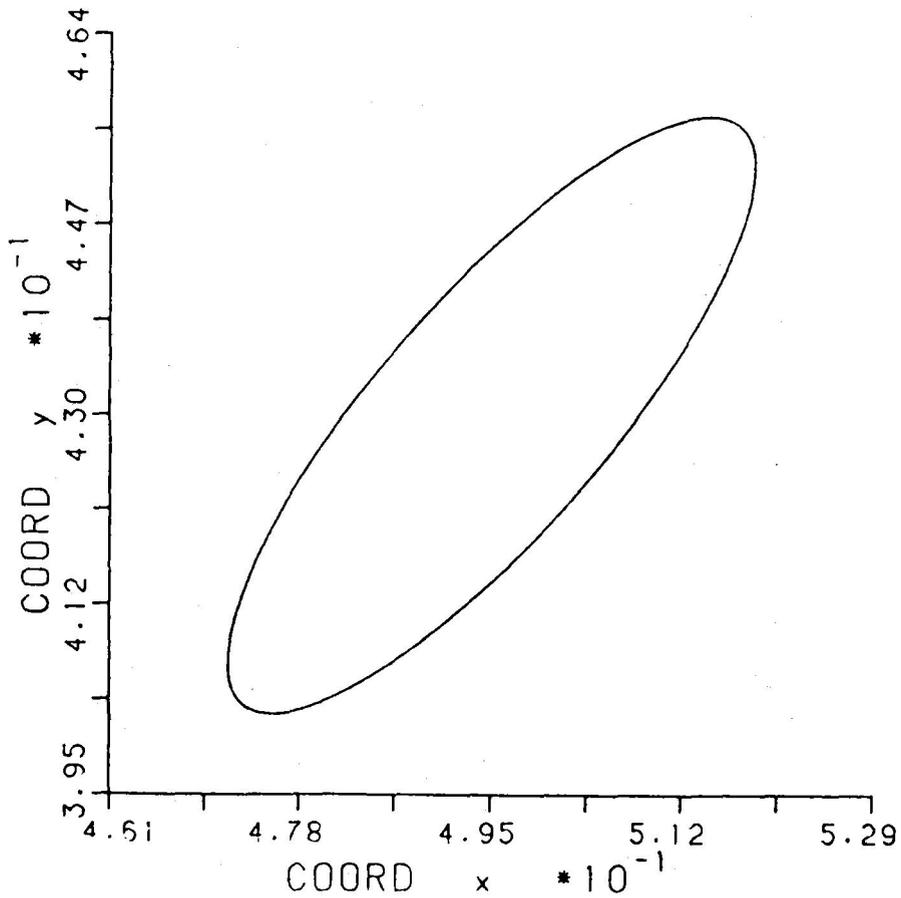


Figura 5.29: Resultados para el estímulo AMARILLO;
observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 19.19			
b* = 70.04			Area = 279.15
L = 75.65	673.75	-1.322	Orientación = 96.69
H = 74.79			Rel. Semiejes = .21
S = .96			

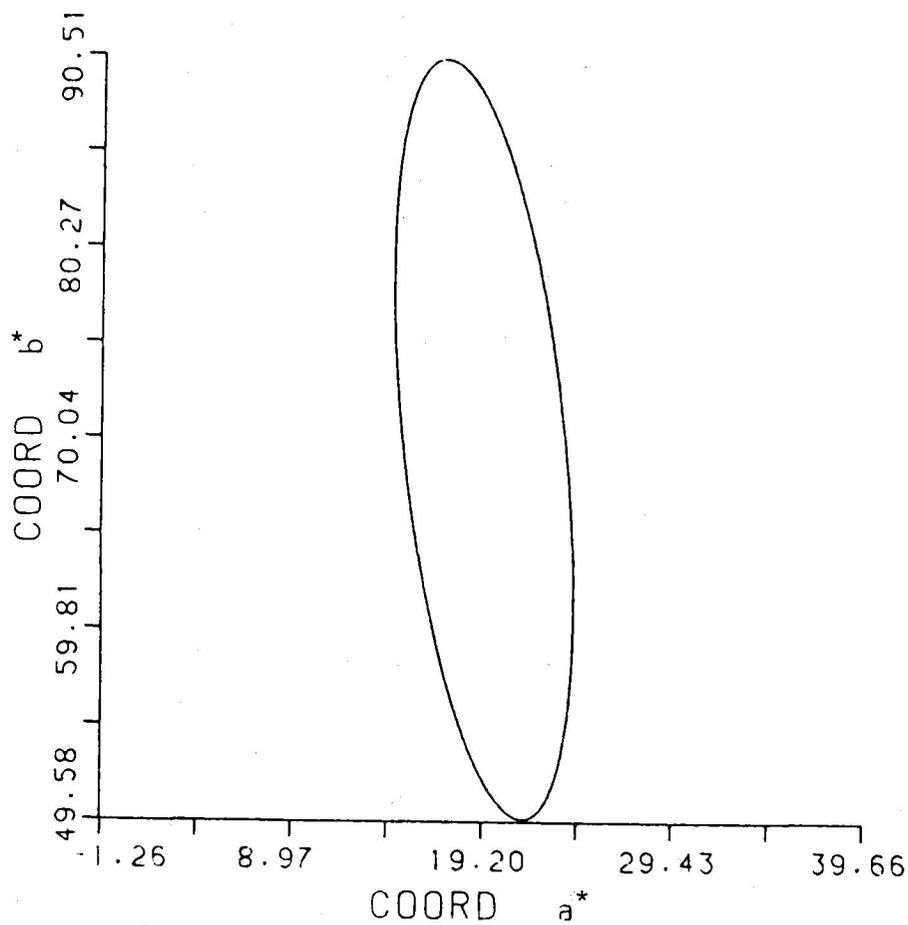


Figura 5.30: Resultados para el estímulo AMARILLO;
observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .495			Area ($\times 10^{-4}$) = 22.61
y = .434	42.85	-.726	Orientación = 53.19
Y = 15.070			Rel. Semiejes = .61

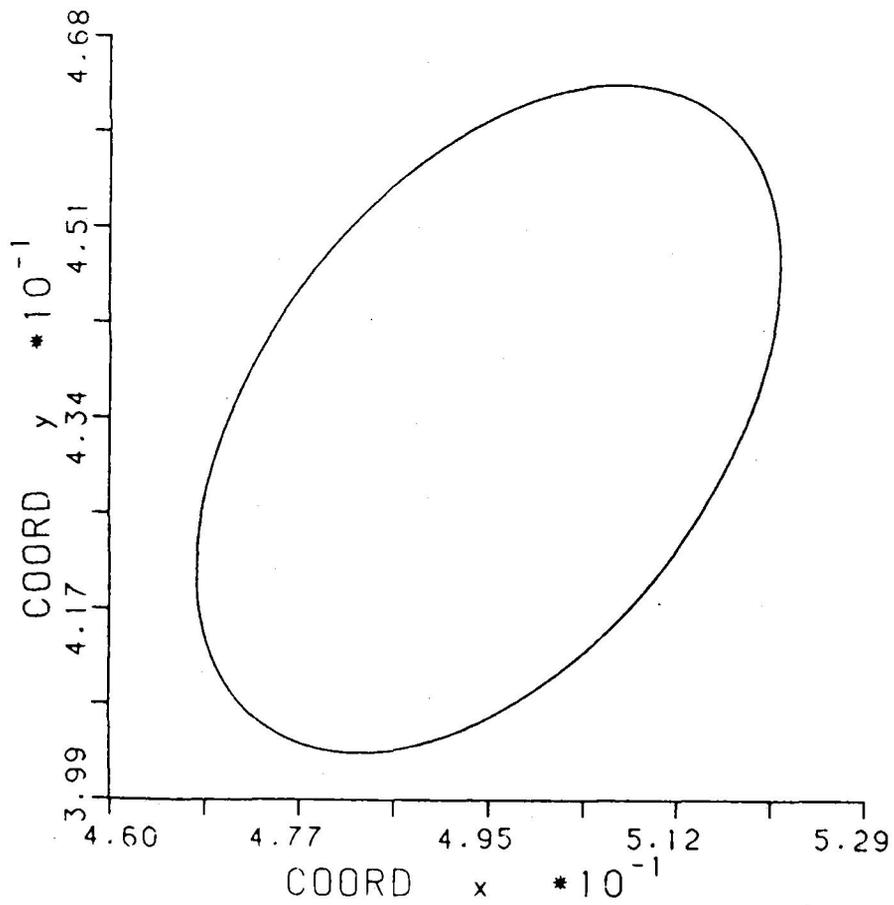


Figura 5.31: Resultados para el estímulo AMARILLO;
observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 17.82			
b* = 72.34			Area = 576.86
L = 76.27	2237.04	-1.120	Orientación = 98.7º
H = 76.29			Rel. Semiejes = .41
S = .98			

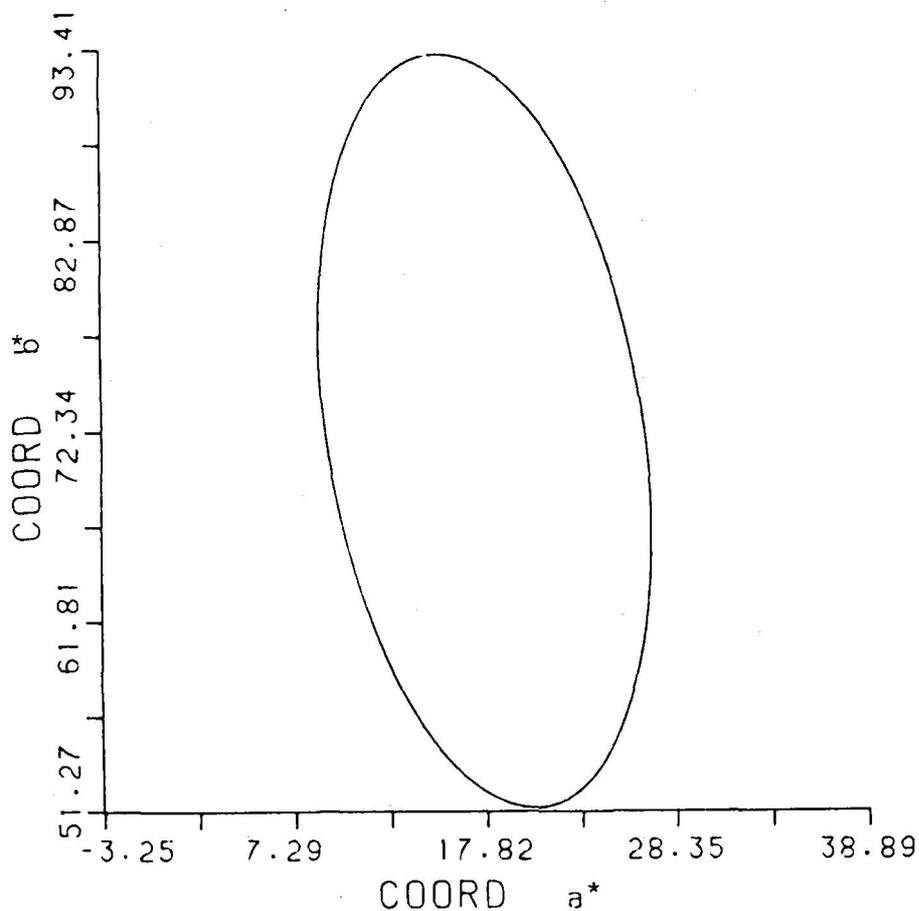


Figura 5.32: Resultados para el estímulo AMARILLO;
observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .338			Area ($\times 10^{-4}$) = 5.23
y = .156	9.65	-.737	Orientación = 32.00
Y = 15.651			Rel. Semiejes = .30

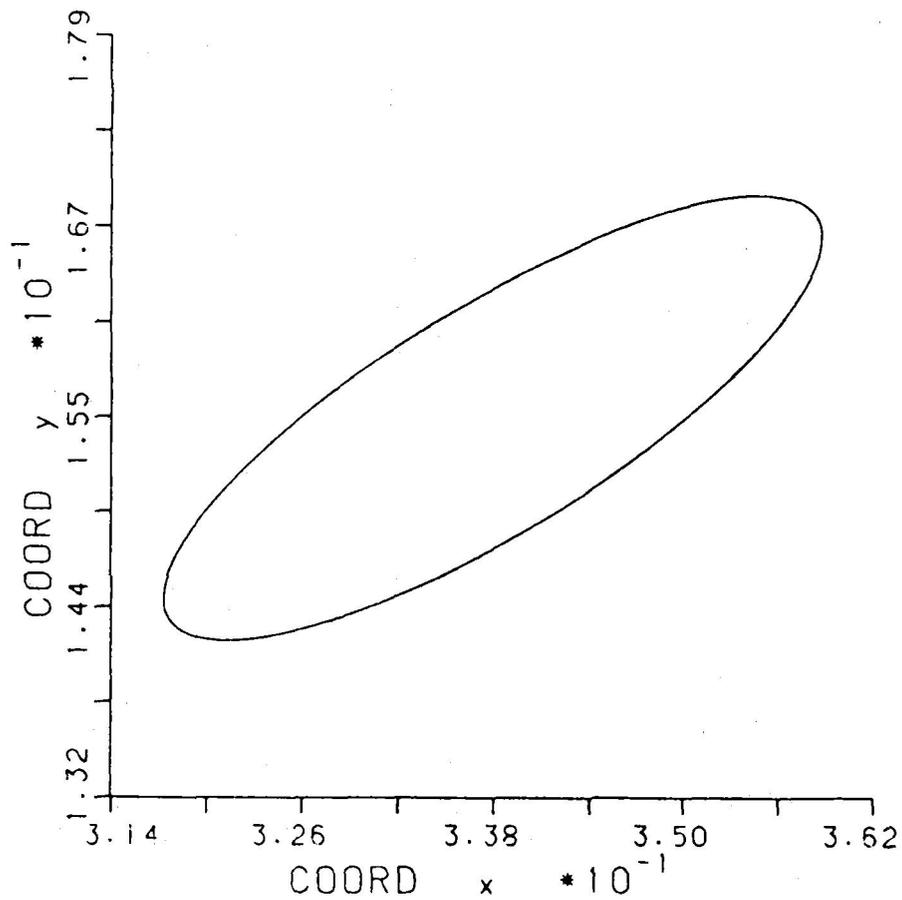


Figura 5.33: Resultados para el estímulo PURPURA;
observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 118.88			
b* = -77.72			Area = 272.51
L = 77.37	1142.87	-1.159	Orientación = 124.19
H = 326.89			Rel. Semiejes = .44
S = 1.84			

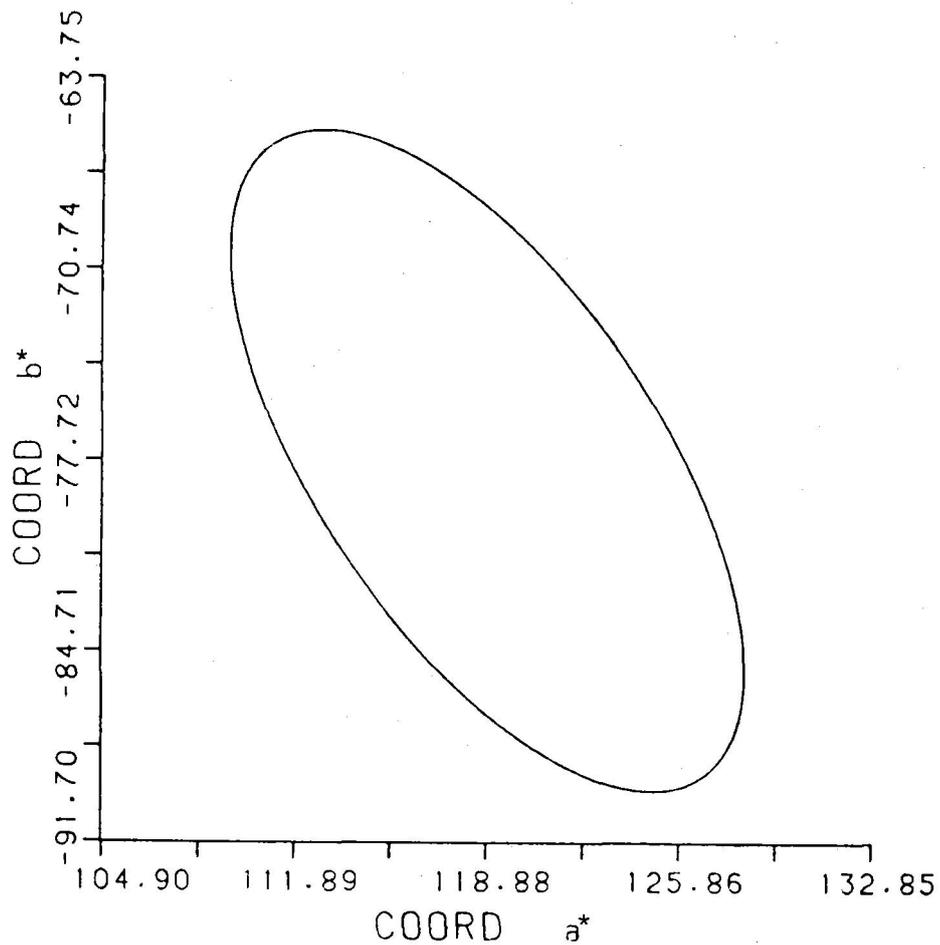


Figura 5.34: Resultados para el estímulo PURPURA; observador RM.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .340			Area ($\times 10^{-4}$) = 4.34
y = .155	8.29	-.691	Orientación = 35.59
Y = 15.255			Rel. Semiejes = .30

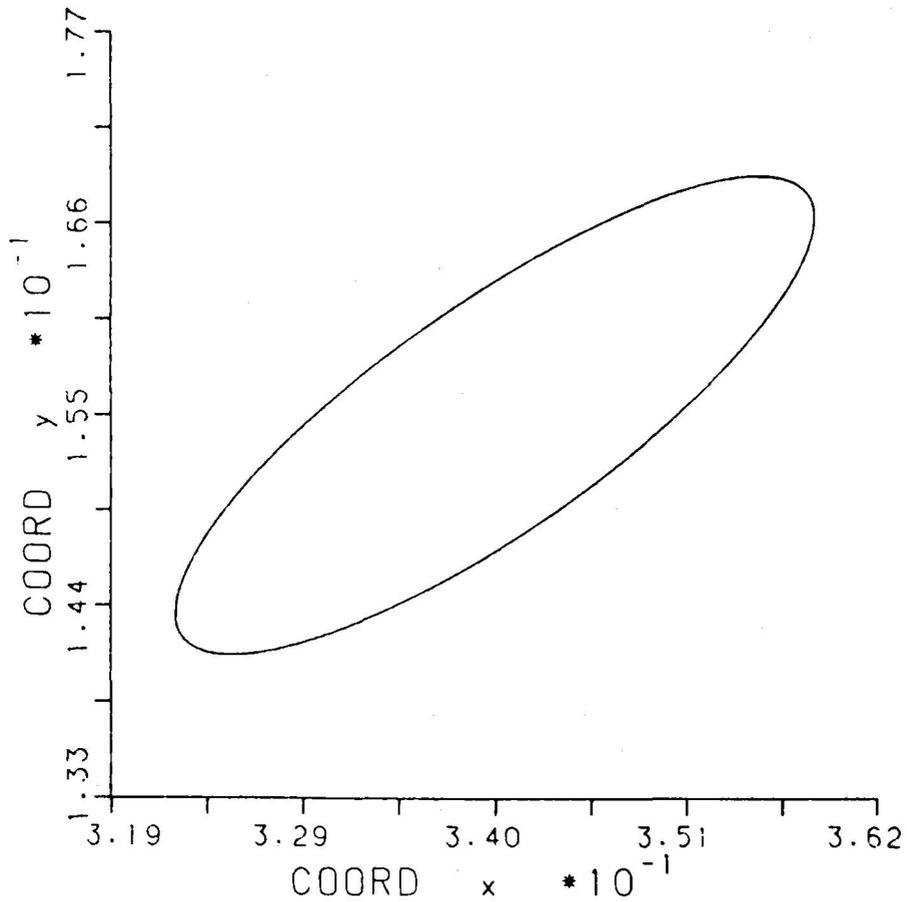


Figura 5.35: Resultados para el estímulo PURPURA;
observador LJ.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f.Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 119.80			
b* = -77.09			Area = 222.80
L = 76.57	1027.36	-1.114	Orientación = 126.62
H = 327.29			Rel. Semiejes = .38
S = 1.86			

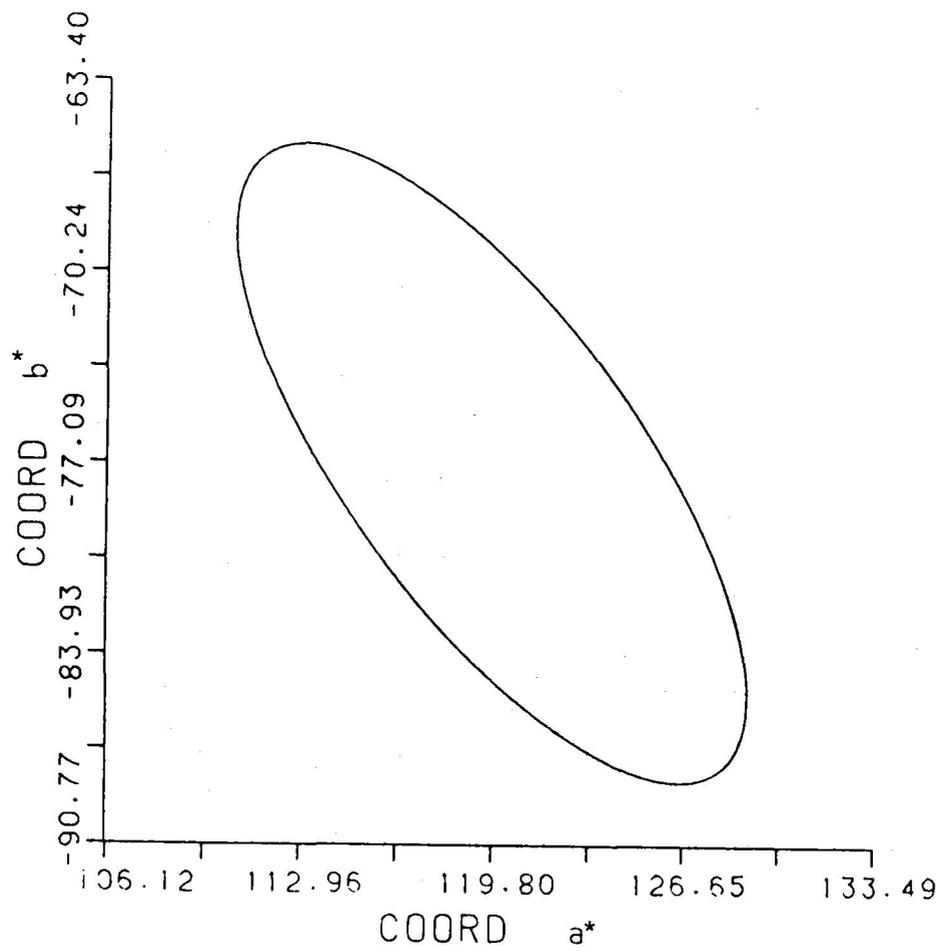


Figura 5.36: Resultados para el estímulo PURPURA; observador LJ.

<u>C- Elipsoide</u>	<u>Vol. ($\times 10^{-4}$)</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
x = .340			Area ($\times 10^{-4}$) = 5.26
y = .157	11.41	-.700	Orientación = 28.9º
Y = 15.692			Rel. Semiejes = .33

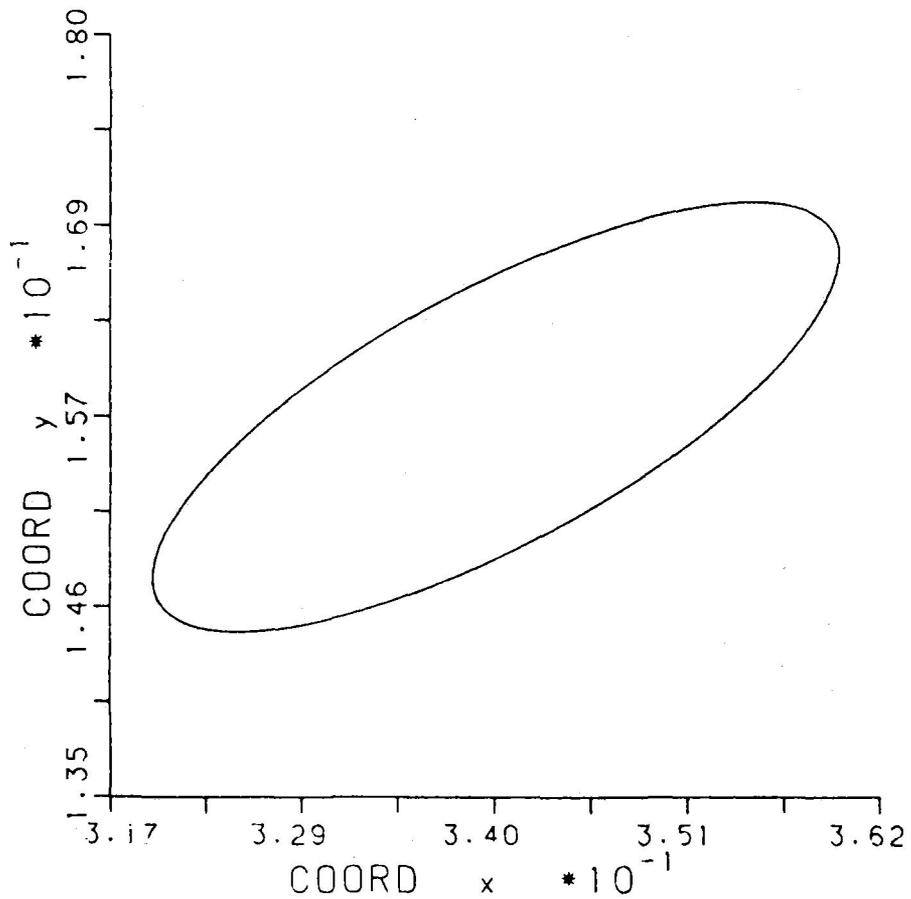


Figura 5.37: Resultados para el estímulo PURPURA;
observador JR.

<u>C. Elipsoide</u>	<u>Volumen</u>	<u>Lg f. Weber</u>	<u>Sección Principal</u>
a* = 117.78			
b* = -76.20			Area = 266.42
L = 77.44	1353.36	-1.063	Orientación = 127.19
H = 327.19			Rel. Semiejes = .54
S = 1.81			

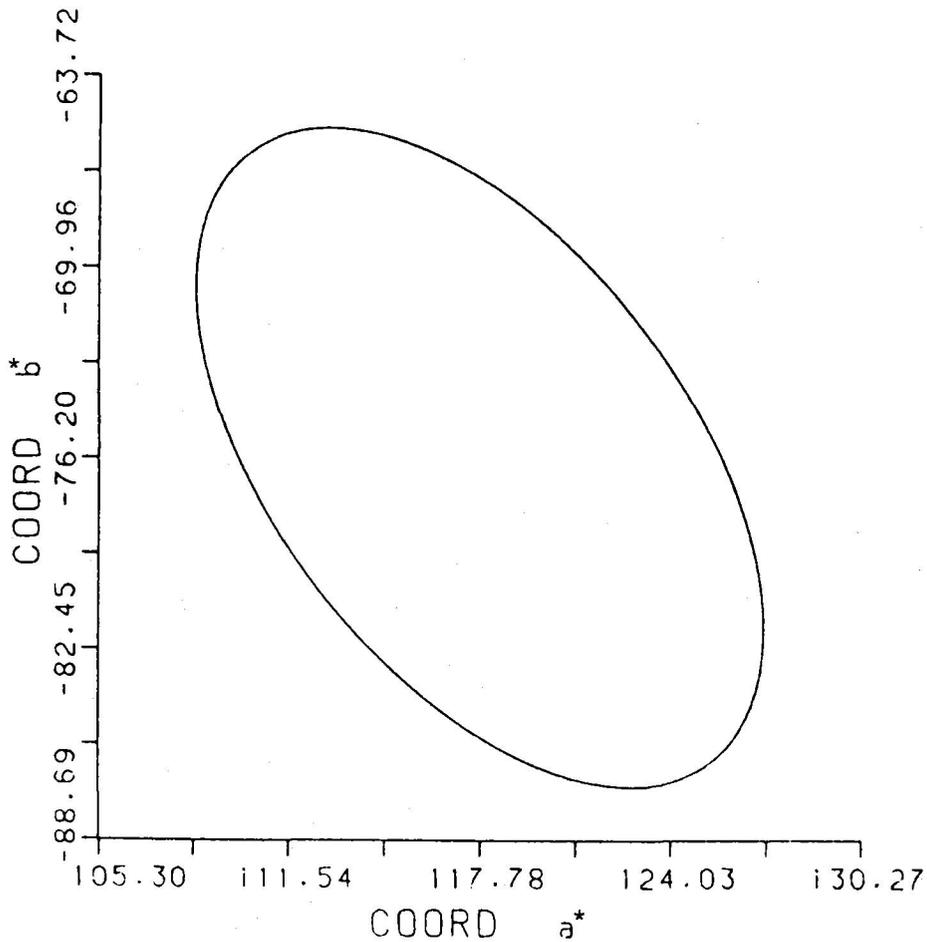


Figura 5.38: Resultados para el estímulo PURPURA;
observador JR.

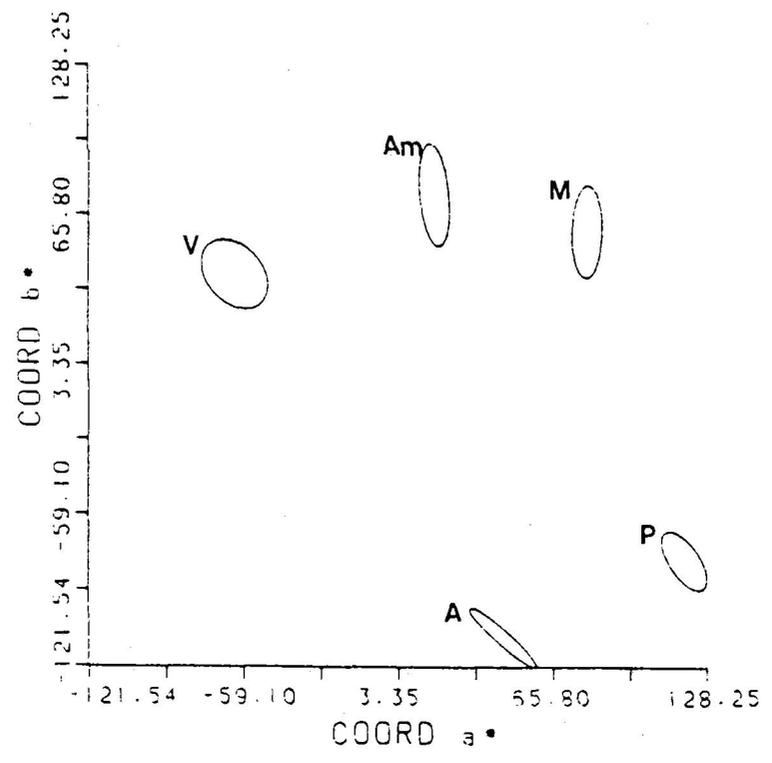
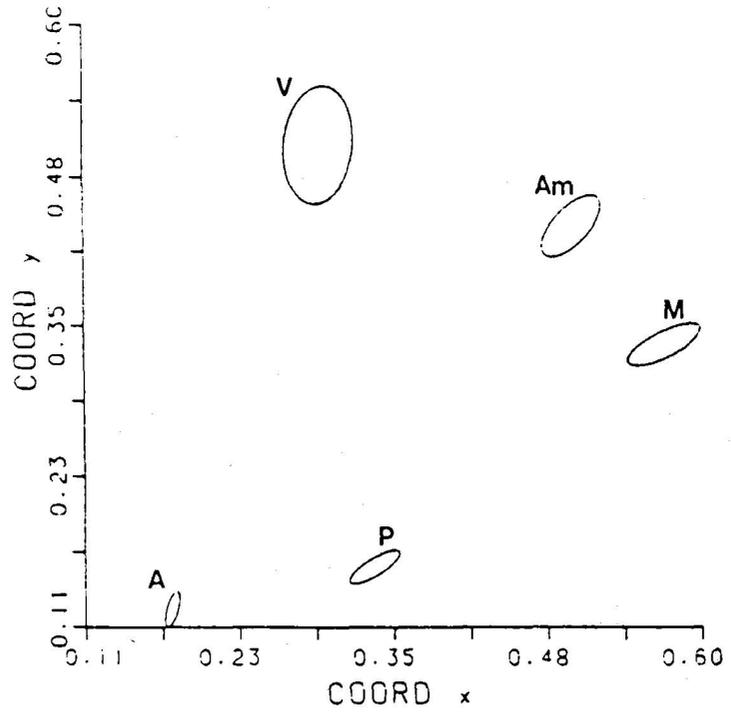


Figura 5.39: Resultados para el observador RM.

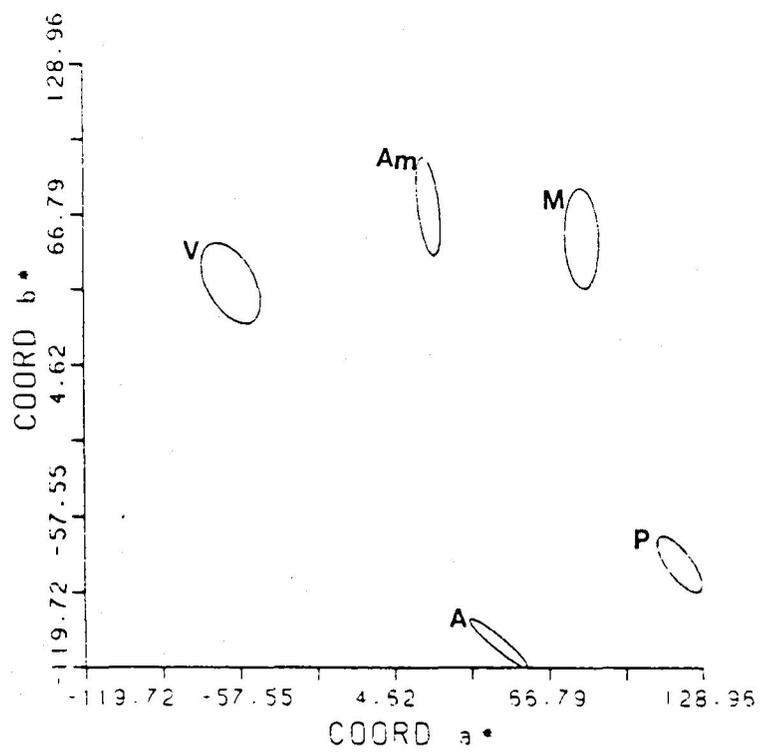
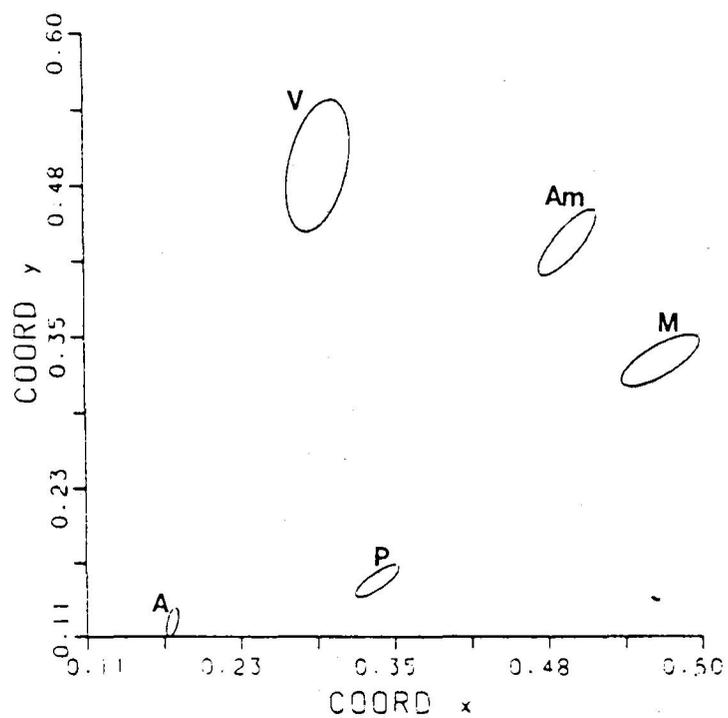


Figura 5.40: Resultados para el observador LJ.

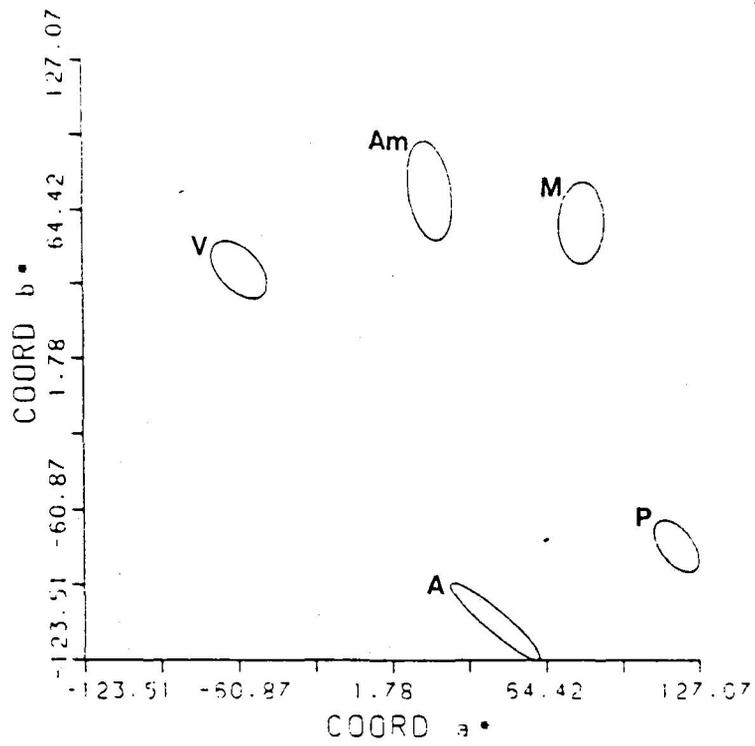
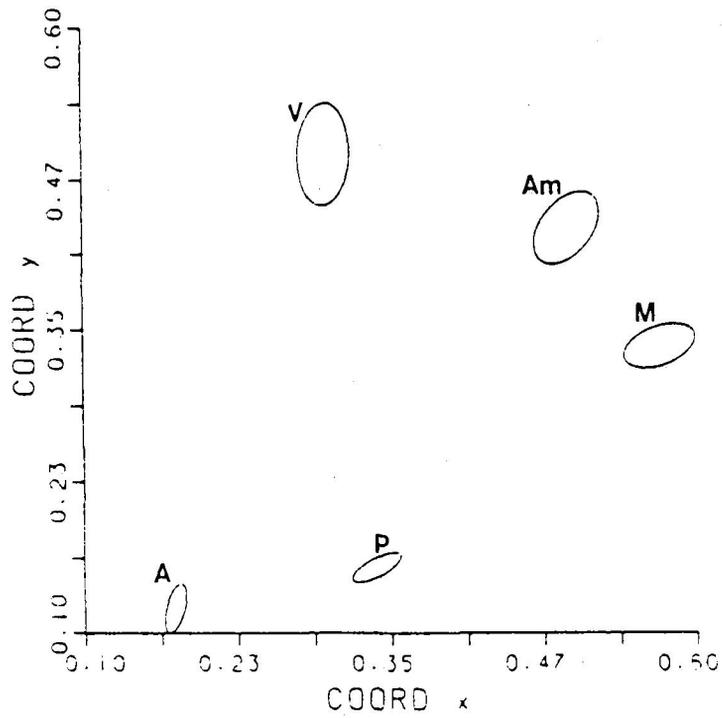


Figura 5.41: Resultados para el observador JR.

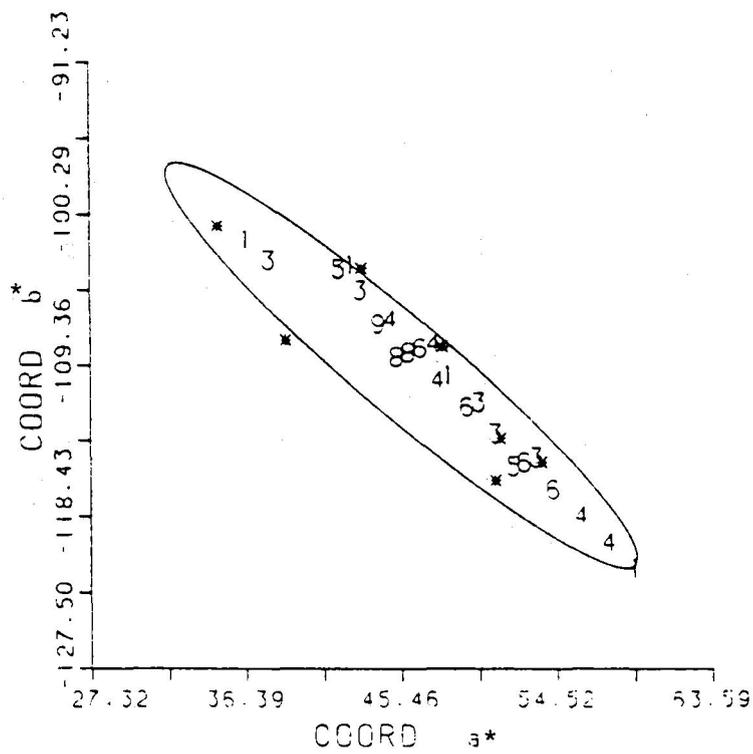
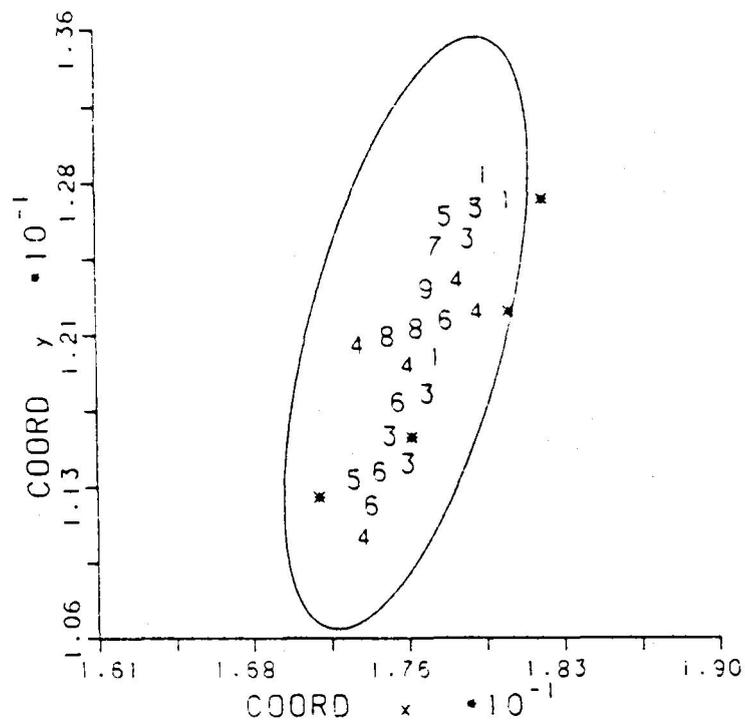


Figura 5.42: Distribución puntual; estímulo AZUL; observador RM.

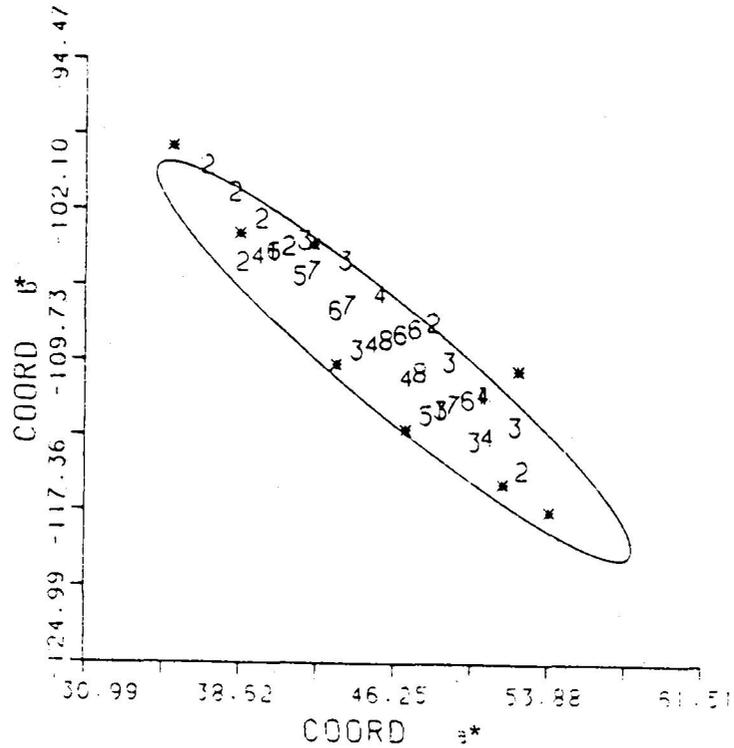
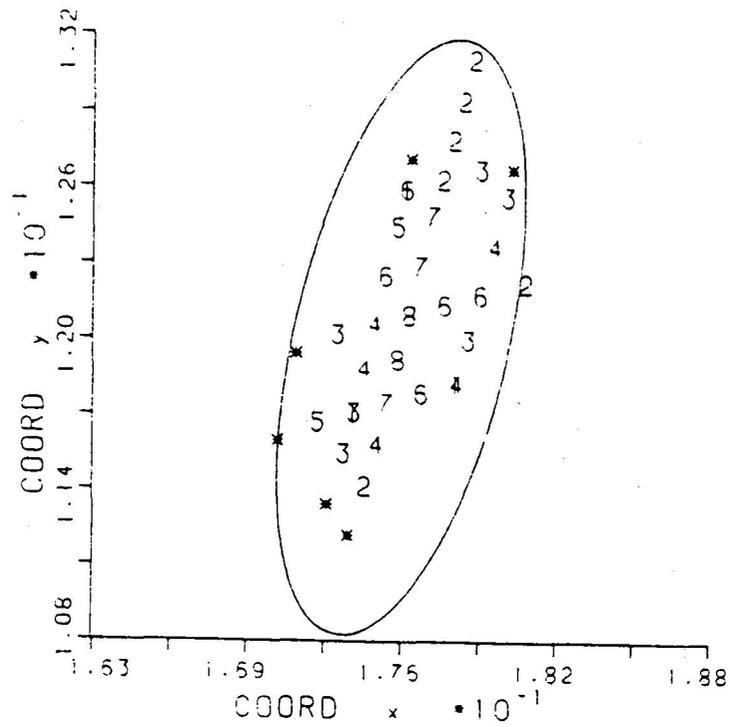


Figura 5.43: Distribución puntual; estímulo AZUL; observador LJ.

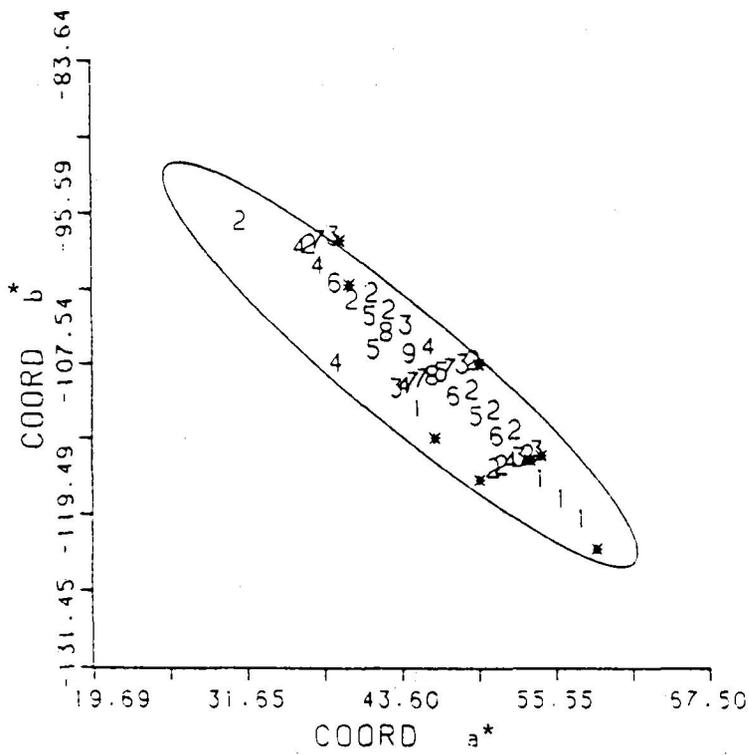
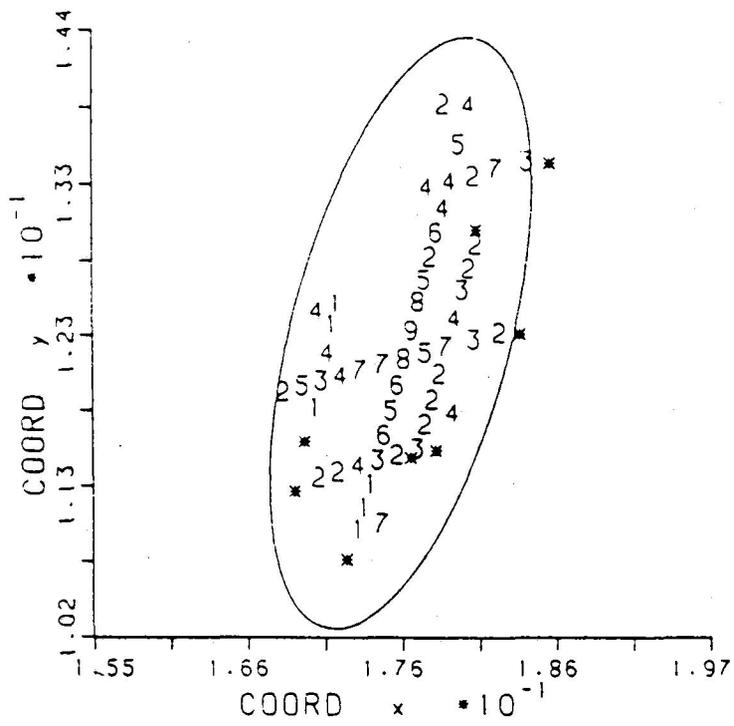


Figura 5.44: Distribución puntual; estímulo AZUL; observador JR.

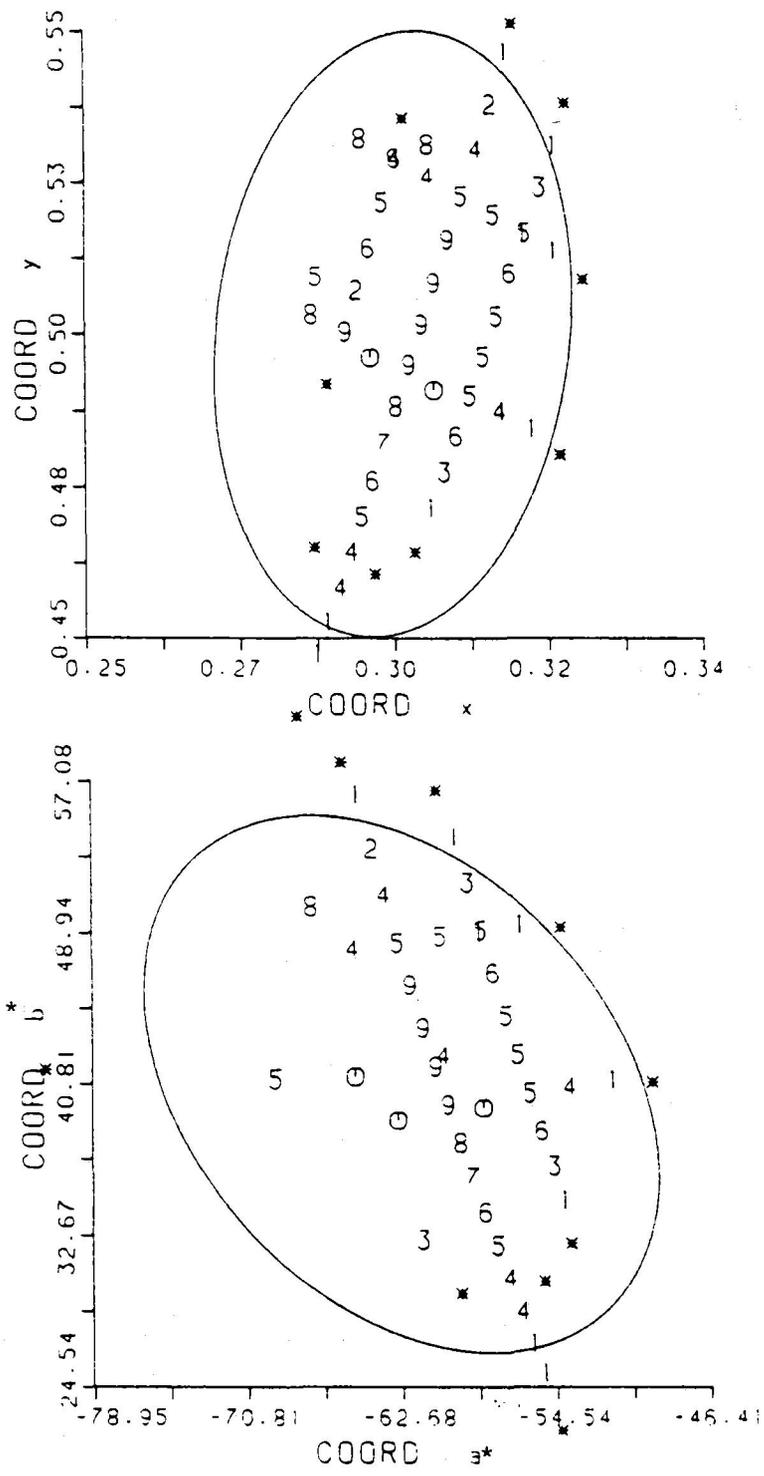


Figura 5.45: Distribución puntual; estímulo VERDE; observador RM.

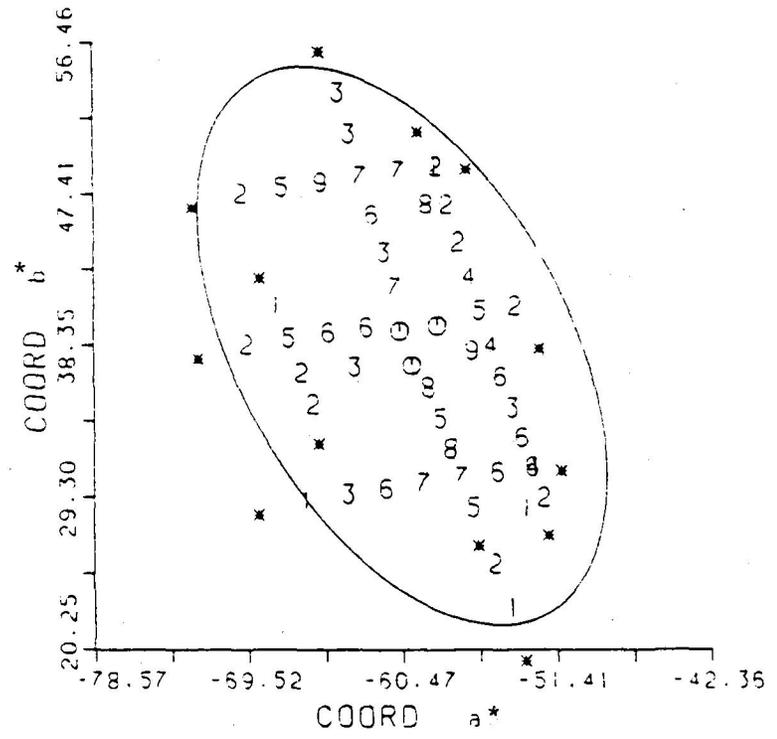
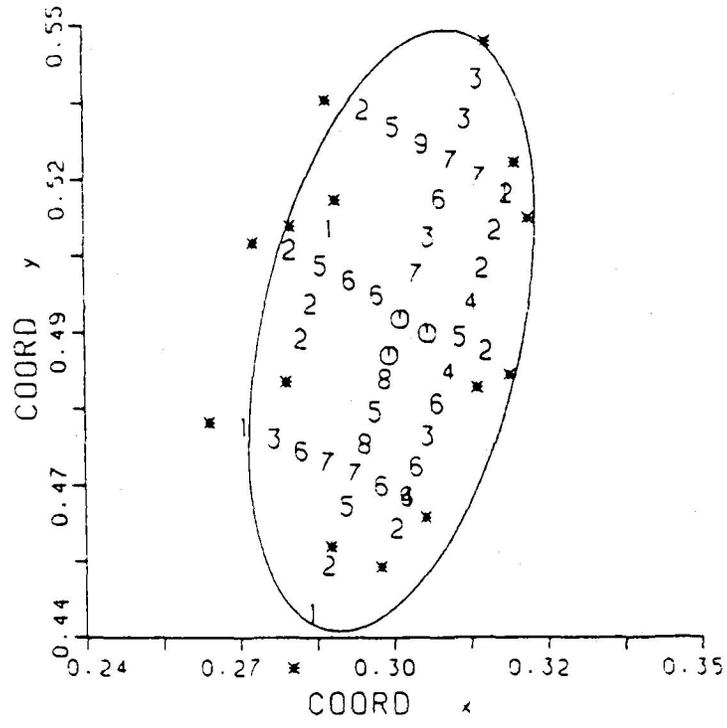


Figura 5.46: Distribución puntual; estímulo VERDE; observador LJ.

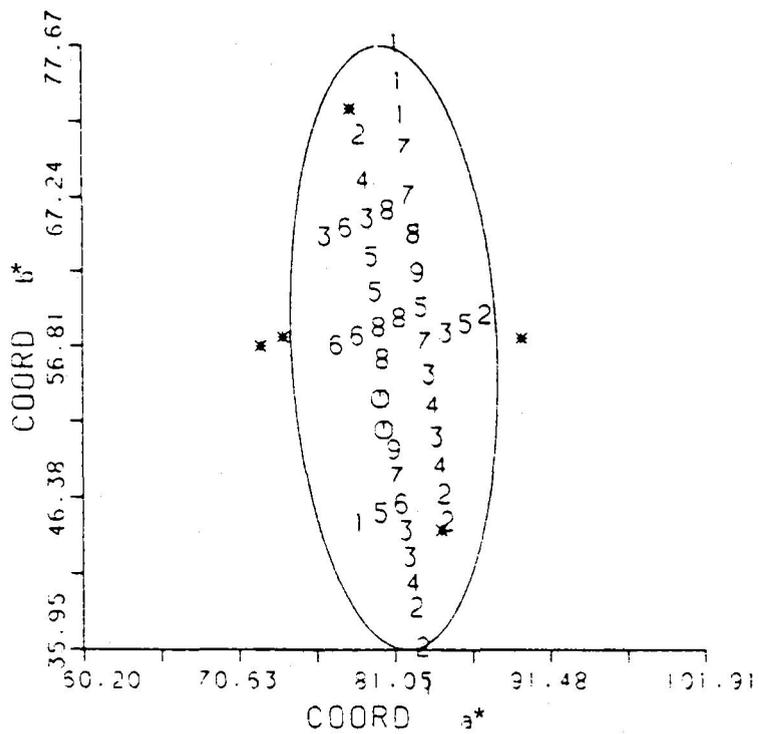
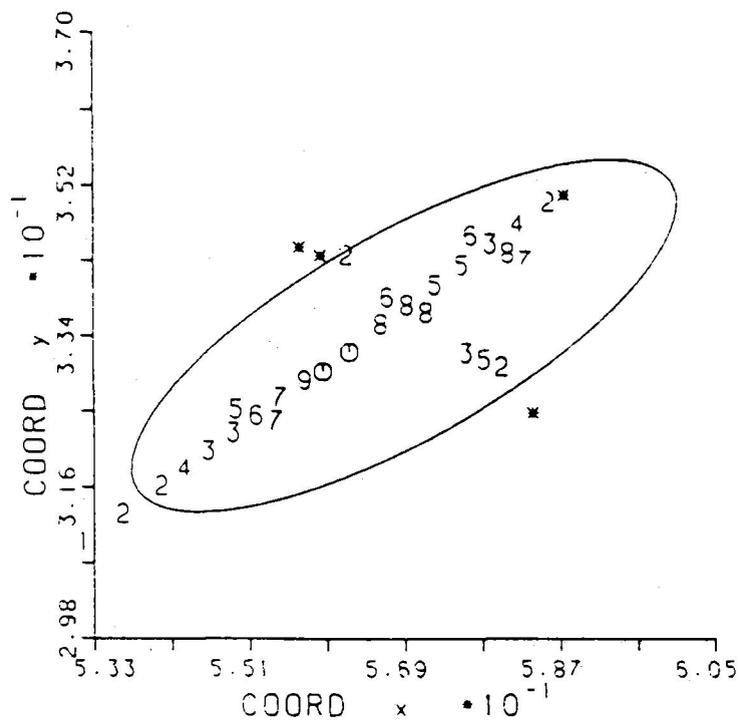


Figura 5.49: Distribución puntual; estímulo MAGENTA; observador LJ.

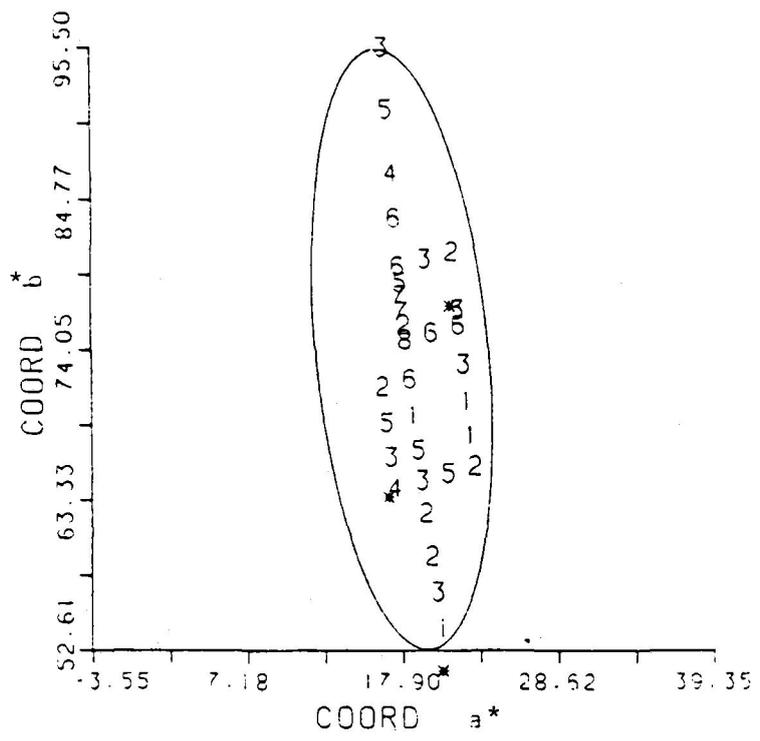
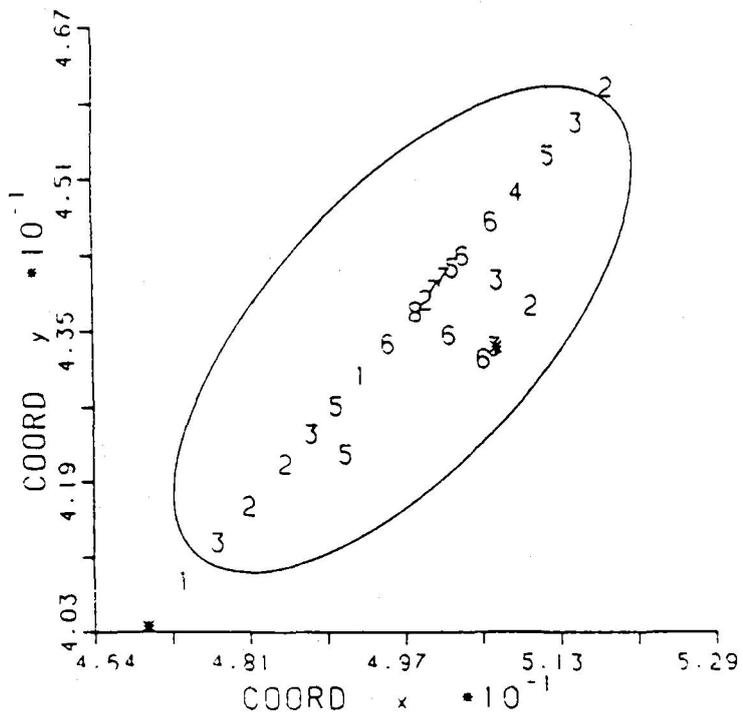


Figura 5.51: Distribución puntual; estímulo AMARILLO; observador RM.

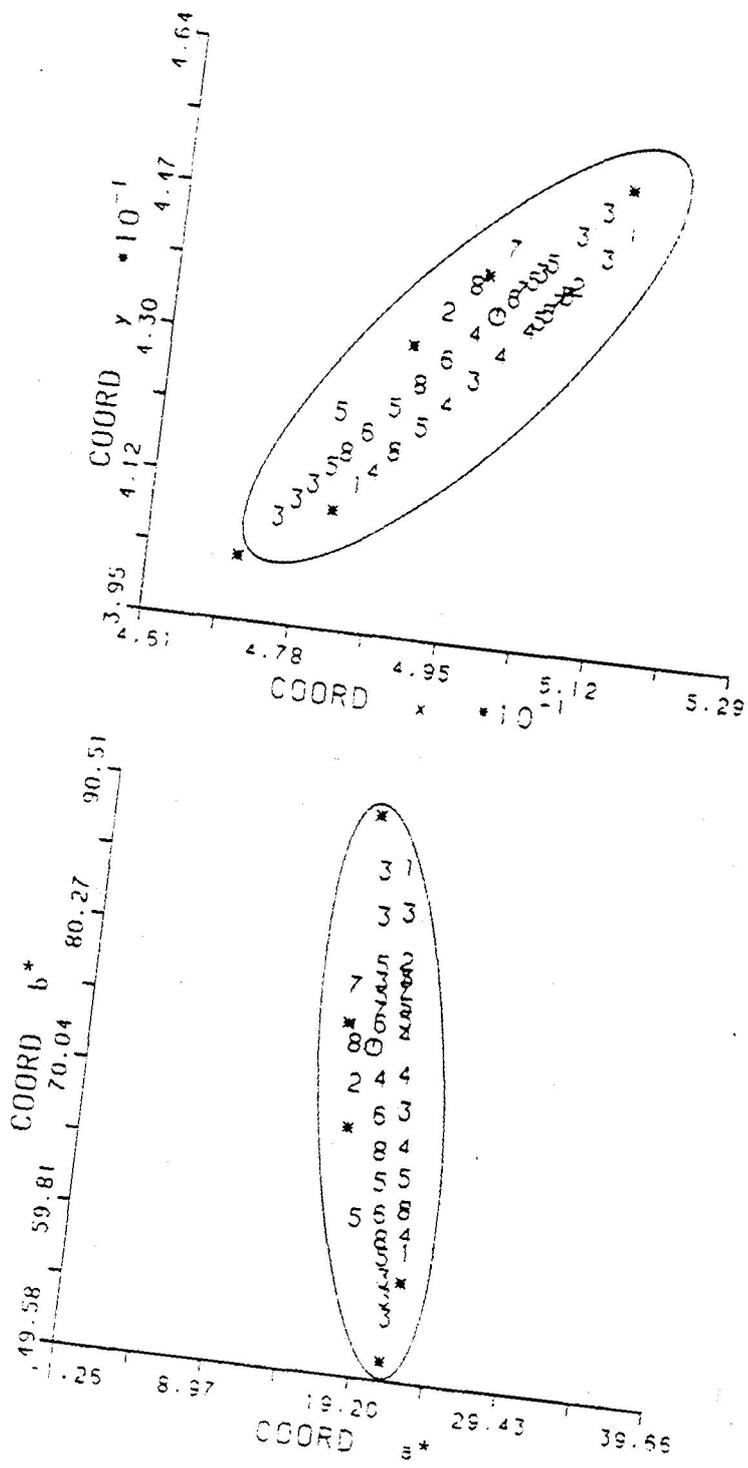


Figura 5.52: Distribución puntual; estímulo AMARILLO; observador LJ.

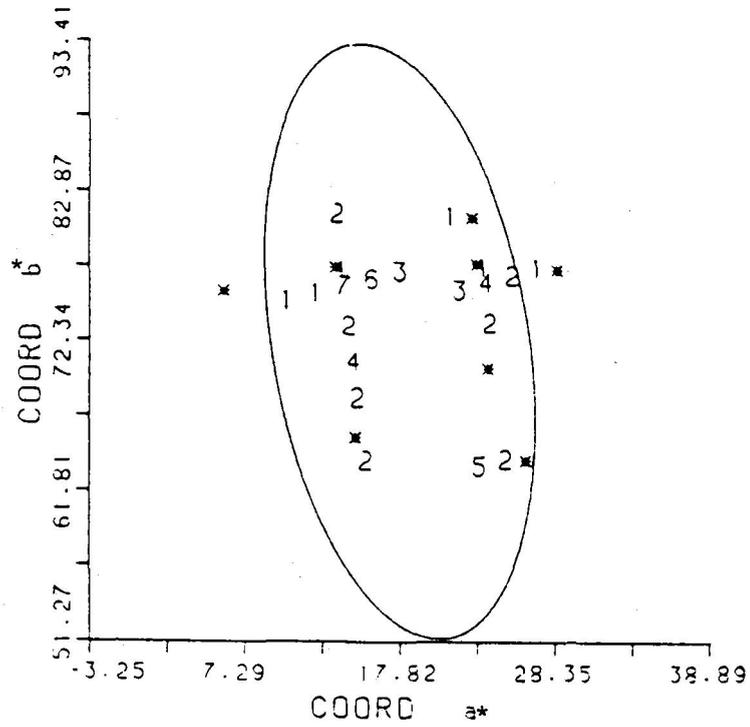
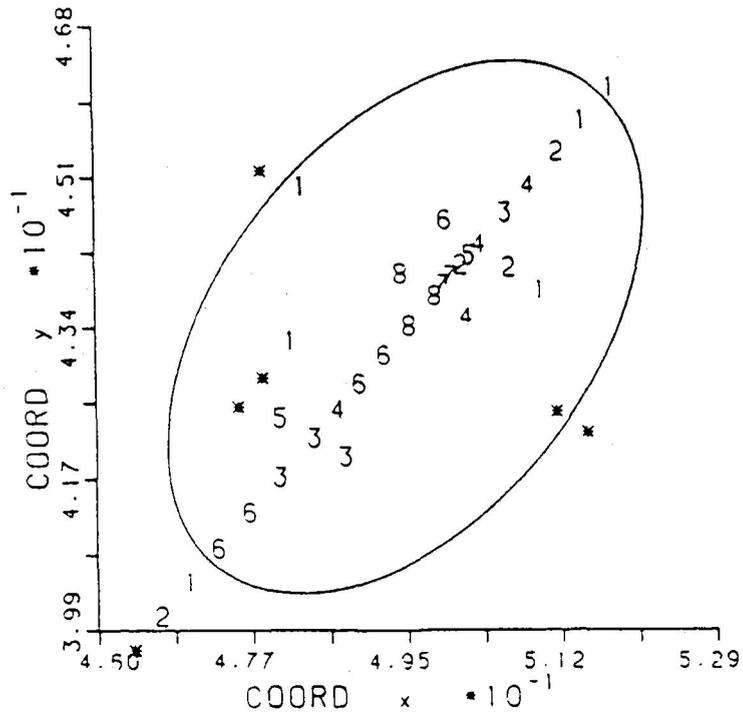


Figura 5.53: Distribución puntual; estímulo AMARILLO; observador JR.

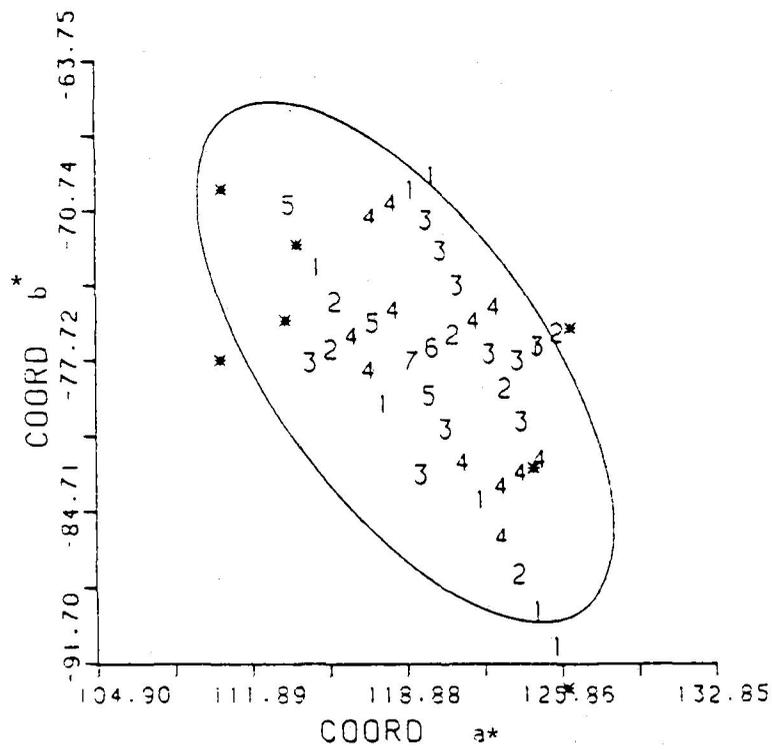
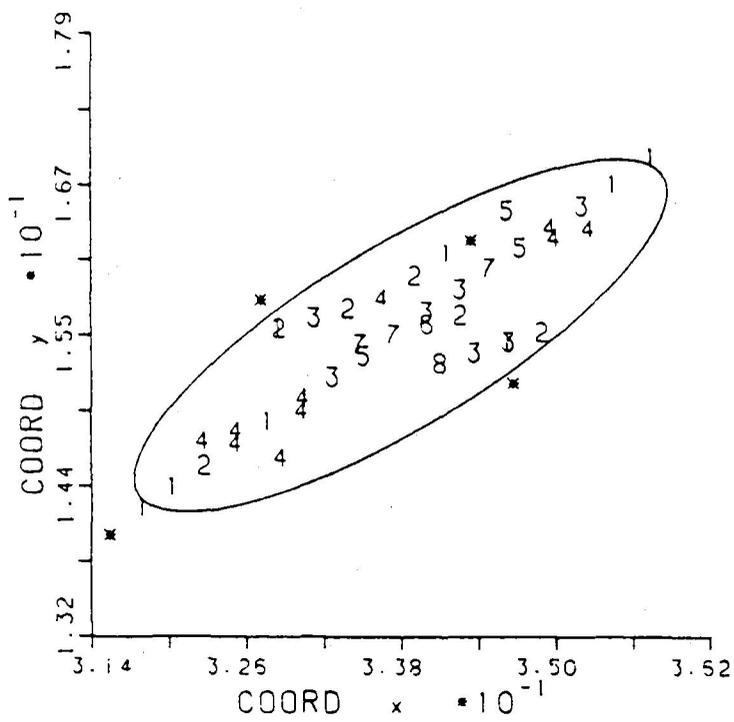


Figura 5.54: Distribución puntual; estímulo PURPURA; observador RM.

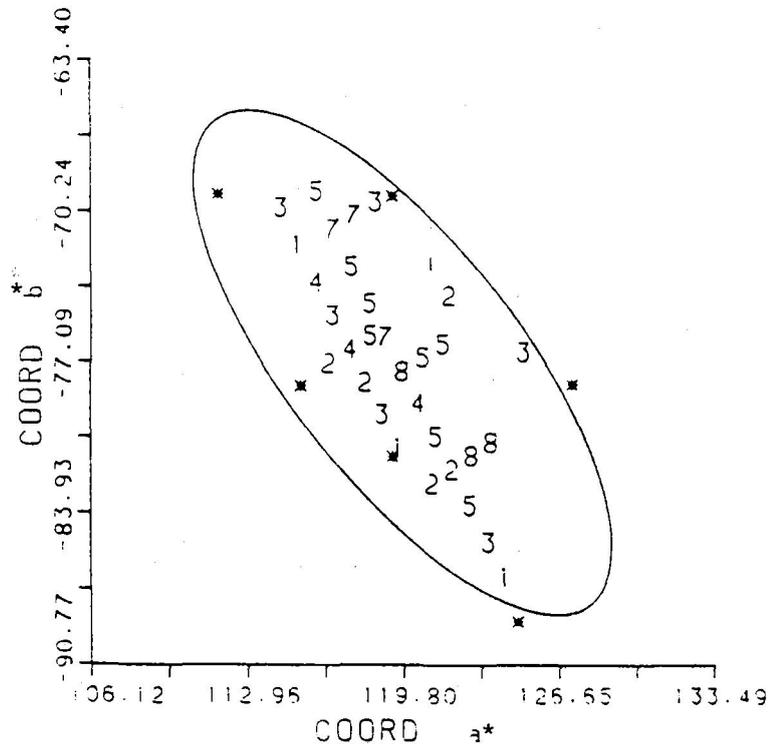
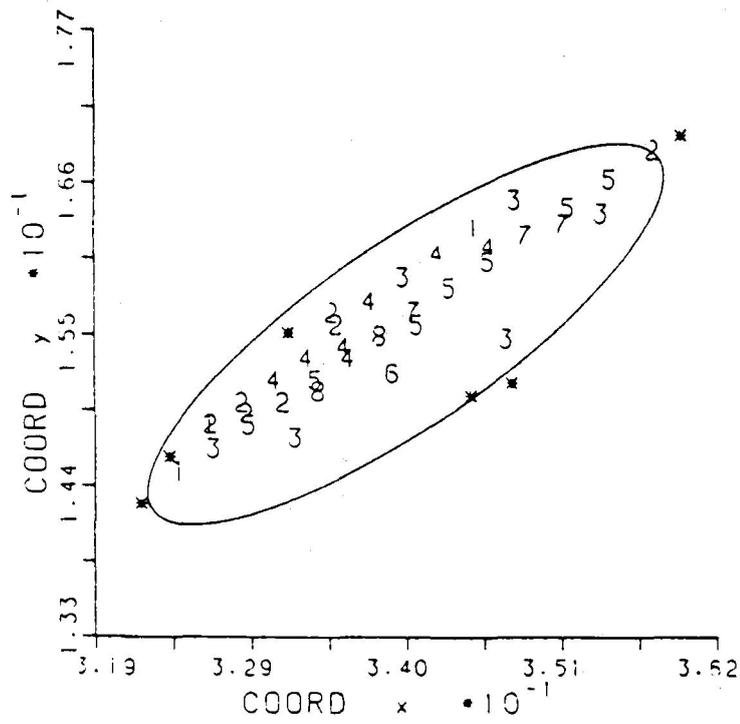


Figura 5.55: Distribución puntual; estímulo PURPURA; observador LJ.

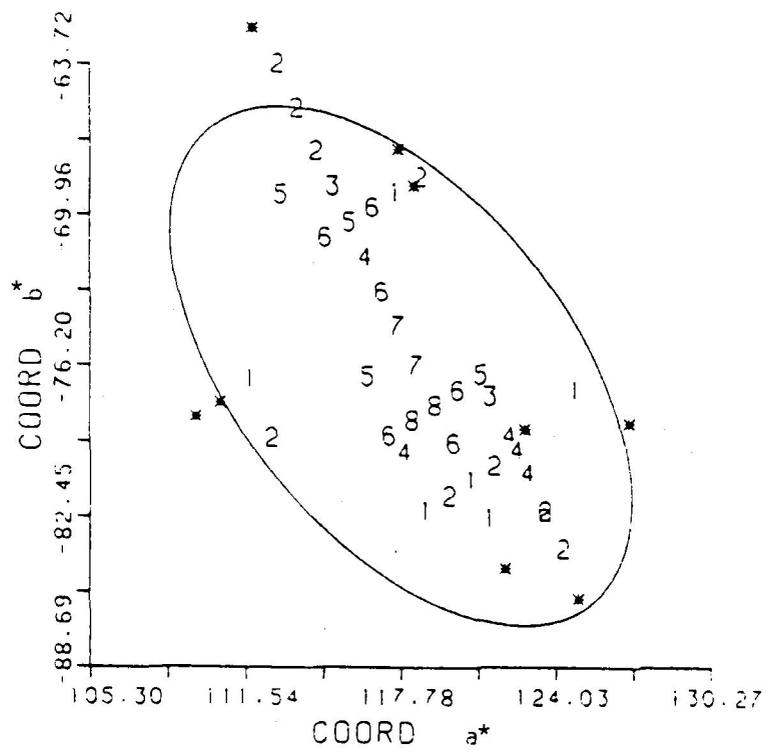
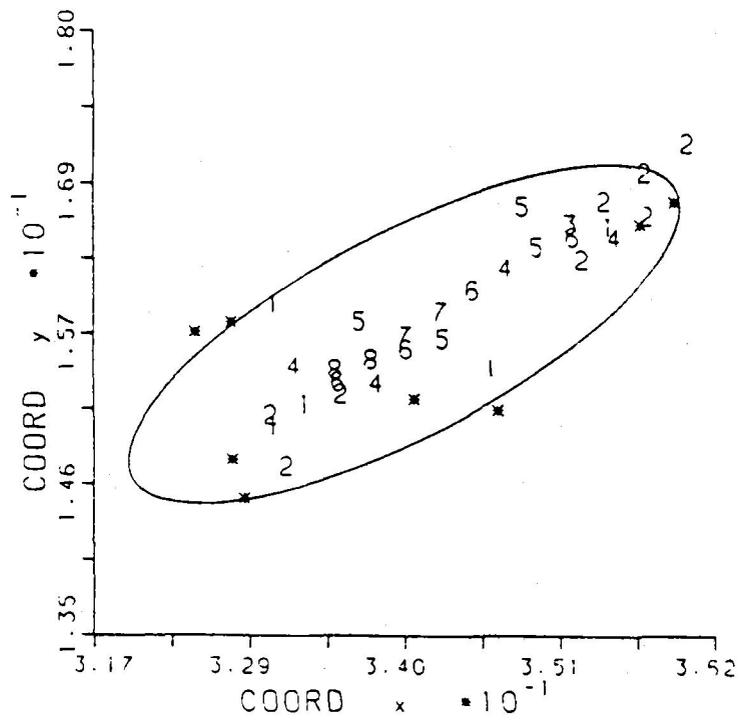


Figura 5.56: Distribución puntual; estímulo PURPURA; observador JR.

5.4.- Estudio Comparativo de Umbrales Diferenciales por Comparación Sucesiva con y sin Campo Adaptante.

Tratamos de analizar en este apartado la influencia que la adaptación a un estímulo acromático, del tipo del iluminante A, pueda tener en la discriminación cromática sucesiva en comparación con la adaptación a la oscuridad.

Se observa en la mayoría de los trabajos más significativos en colorimetría diferencial, una cierta variedad en el tipo de adaptación utilizada durante las experiencias, aun no siendo esta el objetivo inmediato de estudio. Trabajos como los de MacAdam (1942) son realizados bajo condiciones de adaptación a la oscuridad, lo que no ha implicado que muchos autores hayan adoptado condiciones experimentales en las se utilicen adaptaciones espaciales a campos concentricos con los estímulos que sirven de test o temporales a estímulos, generalmente, acromáticos.

Por otro lado y tal como se ha indicado en la revisión bibliográfica, son muchos los artículos publicados sobre la influencia del tipo de adaptación en los fenómenos de visión o, también, sobre la influencia que la cromaticidad de los estímulos adaptantes pueda tener en -- las características generales de los mecanismos de la visión del color. En ningún caso, sin embargo, aparece un estudio en el que la adaptación cromática haya sido evaluada con respecto a los métodos de presentación sucesiva de estímulos.

Desde el punto de vista del estudio de la influencia de la adaptación cromática sobre los umbrales diferenciales de color, si podemos considerar algunos trabajos realizados por comparación simultánea de estímulos. Estos son los ya citados de Cruz y Alvarez-Claro (1973), -- Wright (1941) y Rautian y Solovjeva (1955)

El primero se refiere al estudio de la adaptación cromática de tipo temporal y los restantes a la de tipo espacial. Todos estos autores analizan elipses de discriminación en el diagrama cromático, según hayan sido obtenidas bajo condiciones de adaptación a distintos estímu

los de color.

Los resultados varían de unos autores a otros y así, mientras -Cruz y Alvarez-Claro no deducen cambios significativos en las elipses de discriminación con la adaptación cromática, en el caso del análisis de la adaptación a campos circundantes, los distintos autores han apuntado a un cierto alargamiento de las elipses en las direcciones - que determinan los puntos correspondientes a los estímulos analizados con el adaptante, en el diagrama cromático CIE 1931.

En el caso que nos ocupa, no hemos pretendido realizar un estudio exhaustivo del fenómeno de la adaptación cromática en relación a los umbrales sucesivos de color, sino más bien una evaluación de las características que puedan presentarse cuando se introduce un determinado tipo de adaptación frente a la adaptación a la oscuridad. En este sentido, hemos elegido un estímulo acromático debido a que, como - se ha indicado, es usual en colorimetría el trabajo bajo este tipo de condiciones, y además a las características propias del iluminante A, es decir, en base a la importancia que este tipo de adaptación presenta en la vida ordinaria y por tanto en la industria y el comercio.

A la hora de la realización práctica de este estudio se ha dispuesto de tres observadores: RM, LJ, y JR, que han llevado a cabo experiencias con vistas a la determinación del umbral diferencial de color bajo ambas adaptaciones y para tres estímulos: azul, verde y magenta, cuyas coordenadas de cromaticidad aparecen en la tabla IV.I. - El método general utilizado ha sido ya ampliamente descrito, habiendo se evaluado, para los distintos casos, los parámetros del elipsoide de discriminación que caracterizan a los umbrales, ya sea desde el -- punto de vista cuantitativo como cualitativo.

Los resultados obtenidos se exponen de forma tal que una imediata comparación entre una y otra adaptación pueda ser realizada. Para ello, en las tablas V.VIII-XIII, se han especificado las relaciones y diferencias de distintos parámetros específicos del elipsoide de error ajustado.

En lo referente a los aspectos cuantitativos de la discrimina--

ción, se ha evaluado la relación de volúmenes, logaritmos de la fracción de Weber y áreas de la sección principal de ambos casos.

Por otra parte, se han determinado las diferencias en orientación y relación de semiejes de la sección elíptica principal con el fin de analizar los aspectos cualitativos que de los resultados pudieran derivarse. Es preciso apuntar que el criterio de signos adoptados en la diferencia de orientación ha sido tal que el valor de ésta fuera positivo cuando el giro necesario para pasar de la elipse obtenida para adaptación a la oscuridad a la referente a la adaptación al estímulo acromático se diera en el sentido contrario a las agujas del reloj.

Pasando al análisis de estos resultados, con respecto al volumen de los elipsoides de discriminación, considerados representativos del tamaño de los umbrales diferenciales de color, se puede observar, en la mayoría de los casos, un aumento del mismo cuando la adaptación se realiza al estímulo acromático frente a cuando es a la oscuridad. Sin embargo, este aumento que es claro en el caso del estímulo verde y en menor grado para el azul, no se puede considerar significativo en el estímulo magenta. En cualquier caso, las variaciones entre observadores son notables, apareciendo claros estos aumentos para el observador RM, mientras que para el observador JR sólo se puede considerar significativo en el caso del estímulo verde.

Las diferencias que se detectan en relación a los volúmenes de los elipsoides pueden ser analizadas atendiendo a los aspectos de la discriminación relacionados, de una parte con la luminancia, y de otra con la cromaticidad.

Para ello y en relación a la primera, se ha evaluado el logaritmo de la fracción de Weber, considerado representativo de la capacidad de discriminación en luminancia. Los resultados para este parámetro, en líneas generales, son similares a los encontrados en el caso del volumen del elipsoide. Se observa de nuevo un claro aumento para el estímulo verde, mientras que para el azul no existe y son muy ligeros para el magenta. El valor de este aumento es, en todos -

los casos, significativamente menor que los vistos anteriormente, -- siendo en algunos casos poco significativos, nulos o incluso de signo inverso, lo que nos hace suponer que no se puede aceptar como conclusión un aumento en el valor del umbral de luminancia al pasar de la adaptación a la oscuridad a la del estímulo acromático.

Con respecto al valor del área de la sección elíptica principal, las variaciones encontradas tampoco son tan significativas como en el caso de los volúmenes, sin embargo, las características que -- presentan los aumentos de tamaño son similares en el análisis individual por estímulos. Es de notar que prácticamente para todos los casos el área de la sección principal aumenta, a excepción del estímulo magenta en el que disminuye. Este hecho puede hacer pensar que el fenómeno mostrado pudiera sufrir una posible dependencia con la cromaticidad de los estímulos de referencia.

Desde este punto de vista, se hace preciso realizar un análisis de estos resultados en relación con los que se obtienen al estudiar la orientación y relación de semiejes de la sección elíptica principal. Si bien, para los resultados anteriormente analizados no se apreciandiferencias significativas entre uno y otro sistema de representación, con referencia a estos dos parámetros si se pueden apreciar discrepancias en algunos de los datos expuestos, lo que puede estar asociado a las características del sistema CIELAB. En cualquier caso, la mayoría de las conclusiones se pueden sostener en ambos sistemas de representación.

Pasando al análisis de estos datos y refiriéndonos en concreto al sistema CIE 1931, podemos observar dos hechos importantes. De una parte la aparición de giros, algunos significativos, en la orientación de las elipses, todos del mismo signo para un mismo estímulo. - De otra un aumento general de la relación de semiejes cuando se utiliza la adaptación a un estímulo acromático frente a la adaptación a la oscuridad.

Con respecto a lo primero, estos giros son en especial significativos para el observador RM, lo que sigue en la misma línea de lo antes visto para este observador, más sensible a la introducción de

un campo adaptante. De otro lado, estos giros se presentan de forma - más importante para los estímulos verde y magenta, sobre todo el primero, con lo que podría pensarse que estuviera ligado al aumento en - el área de la sección principal, lo que sin embargo no se soporta en base a los resultados obtenidos en el magenta, en el que el valor del área disminuye.

El sentido de estos giros es significativo destacar que se da - siempre en el sentido de alineamiento con las líneas definidas al unir el estímulo adaptante con el analizado en el plano de cromaticidad, - lo que parece indicar una pérdida en la capacidad de discriminación - en la dirección que define esa línea. Esto estaría de acuerdo con las teorías que soportan el fenómeno de la adaptación cromática sobre -- una disminución en la sensibilidad diferencial cromática a variacio-- nes proporcionales a la distribución espectral a la que se está adap-- tado, Bartleson (1977).

Esto mismo podía ayudar a explicar el segundo de los fenómenos apuntados, es decir, el aumento sistemático de la excentricidad de -- los estímulos con la adaptación a un estímulo acromático. A pesar de ello, una evaluación directa de ambos resultados no muestra una corre-- lación entre los giros en la orientación y las variaciones en la ex-- centricidad, lo que puede apuntar a que ambos fenómenos se deban a -- dos aspectos diferenciados de los mecanismos de la visión: uno que im-- plica un giro en las elipses de discriminación y otro que aumenta la relación de semiejes de los umbrales, o lo que es lo mismo, un mayor balance en la capacidad de discriminación cromática en las distintas direcciones del plano de cromaticidad.

Este último resultado parece estar de acuerdo con lo expresado por Wright (1941) y Rautian y Solovjeva (1955) acerca del alargamiento de las elipses en la dirección del estímulo adaptante. En cualquier caso, una ampliación a otras posibles adaptaciones cromáticas podría ser de utilidad a la hora de analizar este fenómeno. A pesar de ello, es interesante apuntar este aumento en la excentricidad con vistas a los estudios de la uniformidad del espacio de color, la que parece -

ligeramente aumentar cuando se utilizan campos de adaptación de tipo acromático.

Con el fin de visualizar mejor estos resultados se han añadido las figuras 5.57-60, donde se representan las elipses para cada observador en un sistema y otro, pudiendose observar directamente todo lo dicho.

Por último se han estudiado las coordenadas de cromaticidad de los centros de las elipses de discriminación. Para ello se han introducido las tablas V.XIV-XVI, donde se dan estos valores para uno y otro caso de adaptación. A la vista de estas tablas, pueden deducirse que practicamente no hay variaciones significativas en uno y otro caso experimental, lo que puede hacer suponer una constancia en las igualaciones, independientes por tanto del estado de adaptación.

TABLA V.VIII: Resultados para el estímulo AZUL; sistema CIE 1931.

<u>Acromat.</u>			
<u>Oscurid.</u>	<u>RM</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Volumen	1.9	2.6	0.8
Lg f. de Weber	1.0	1.0	0.8
Area sec. pr.	1.3	2.4	1.0

<u>Acromat. - Oscurid.</u>			
Orientación sec. pr.	- 43.19	- 3.59	- 1.39
Rel. semiejes sec. pr.	.56	.07	.12

TABLA V.IX: Resultados para el estímulo VERDE; sistema CIE 1931.

<u>Acromat.</u>			
<u>Oscurid.</u>	<u>RM</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Volumen	6.6	2.1	1.5
Lg f. de Weber	2.1	1.3	1.1
Area sec. pr.	2.7	1.4	1.4

<u>Acromat. - Oscurid.</u>			
Orientación sec. pr.	+62.79	+18.19	+19.39
Rel. semiejes sec. pr.	.09	.35	.21

TABLA V.X: Resultados para el estímulo MAGENTA; sistema CIE 1931.

<u>Acromat.</u>			
<u>Oscurid.</u>	<u>RM</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Volumen	1.2	1.0	1.0
Lg f. de Weber	1.2	1.1	1.2
Area sec. pr.	0.8	0.8	0.9
 <u>Acromat. - Oscurid.</u>			
Orientación sec. pr.	-17.7 ^o	-6.6 ^o	- 14.7 ^o
Rel. semiejes sec. pr.	.39	.28	.26

TABLA V.XI: Resultados para el estímulo AZUL; sistema CIELAB.

<u>Acromat.</u>			
<u>Oscurid.</u>	<u>RM</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Volumen	1.9	2.4	0.7
Lg f. de Weber	1.1	1.1	1.0
Area sec. pr.	1.3	2.4	1.1
 <u>Acromat. - Oscurid.</u>			
Orientación sec. pr.	+11.69	-0.59	+1.69
Rel semiejes sec. pr.	.23	0.04	0.06

TABLA V.XII: Resultados para el estímulo VERDE; sistema CIELAB.

<u>Acromat.</u>			
<u>Oscurid.</u>	<u>RM</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Volumen	6.5	2.1	1.4
Lg f. de Weber	1.4	1.2	0.9
Area sec. pr.	2.8	1.4	1.4
 <u>Acromat. - Oscurid.</u>			
Orientación sec. pr	+57.59	+36.49	+33.99
Rel. semiejes sec. pr.	-.16	.28	0.08

TABLA V.XIII: Resultados para el estímulo MAGENTA; sistema CIELAB.

<u>Acromat.</u>			
<u>Oscurid.</u>	<u>RM</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Volumen	1.1	1.1	1.1
Lg f. de Weber	1.1	1.1	1.1
Area sec. pr.	0.8	0.8	0.9
 <u>Acromat. - Oscurid.</u>			
Orientación	+3.49	+0.39	-2.69
Rel. semiejes sec. pr.	.41	.28	.27

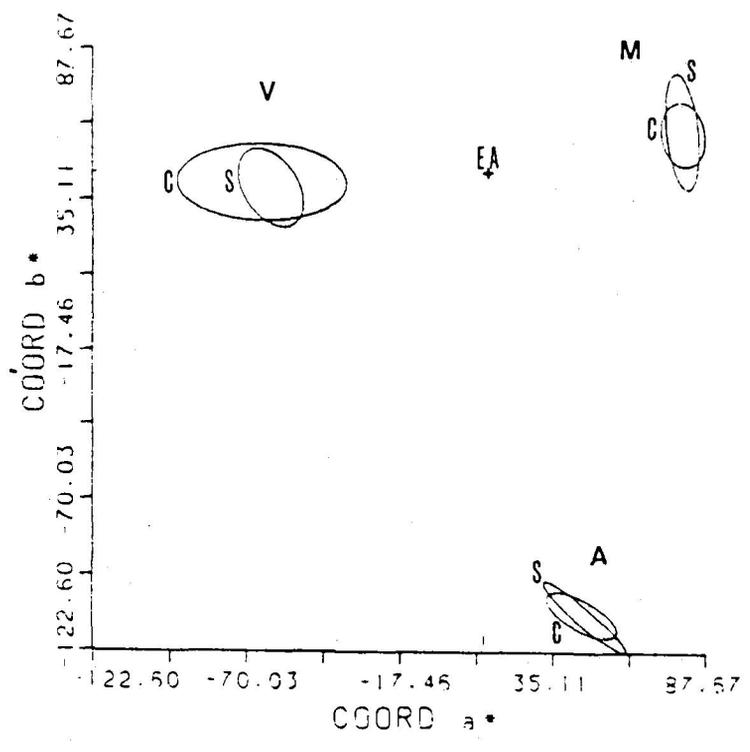
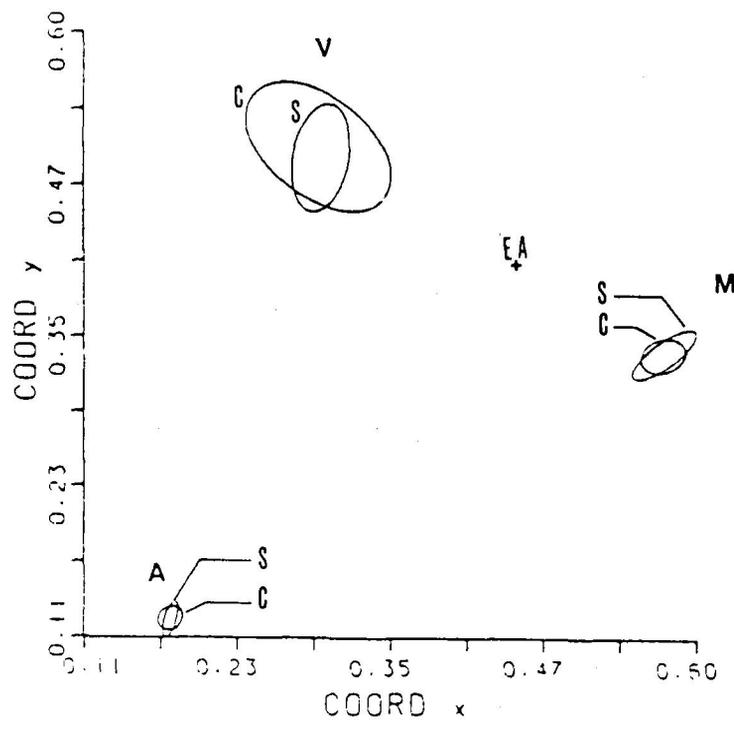


Figura 5.57: Resultados para el observador RM; S adaptación a la oscuridad; C adaptación al estímulo acromático; EA estímulo adaptante representado por el iluminante A.

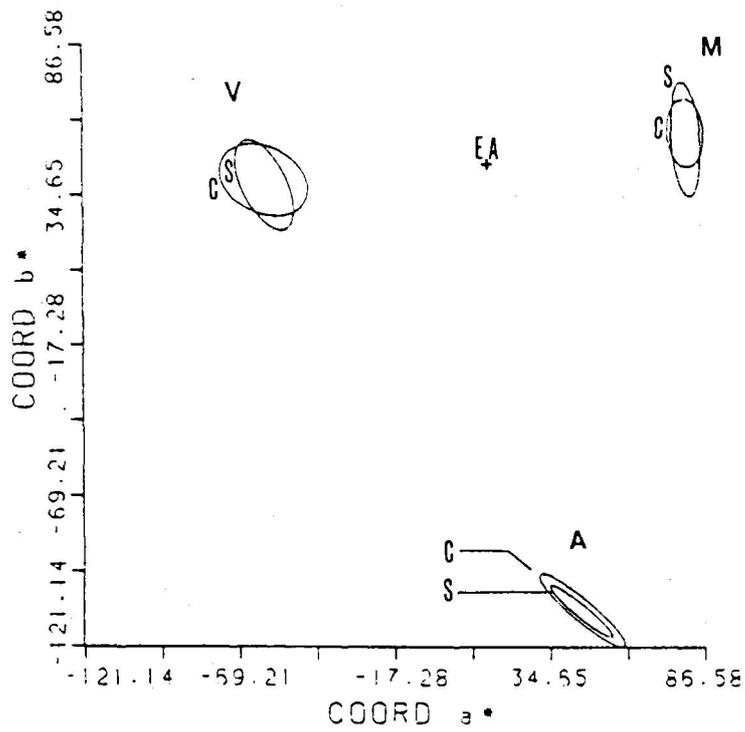
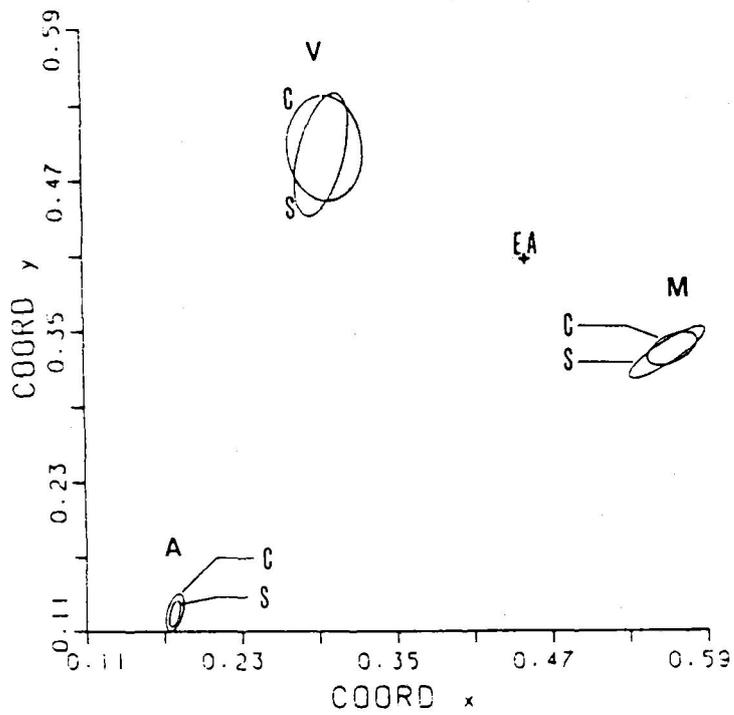


Figura 5.58: Resultados para el observador LJ; S adaptación a la oscuridad; C adaptación al estímulo acromático; EA estímulo adaptante representado por el iluminante A.

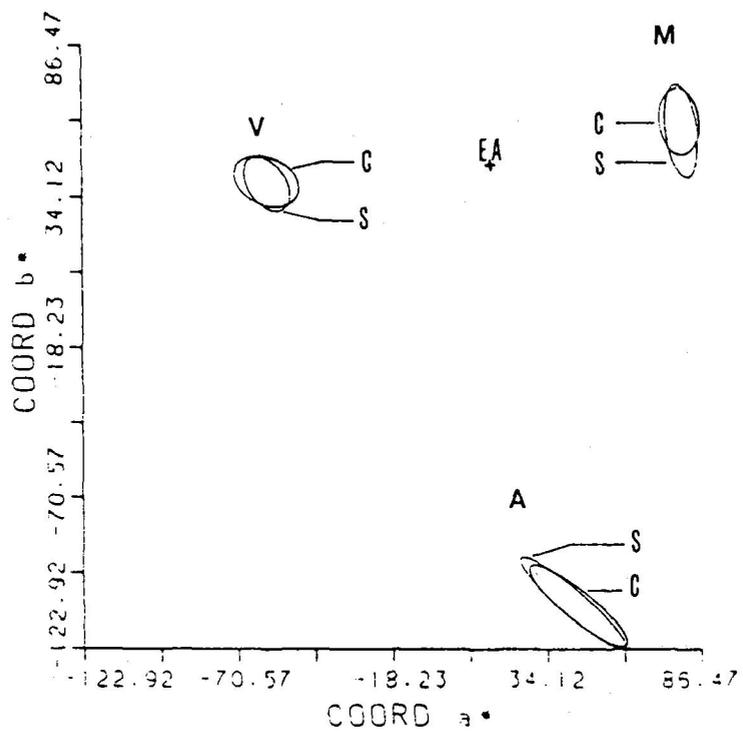
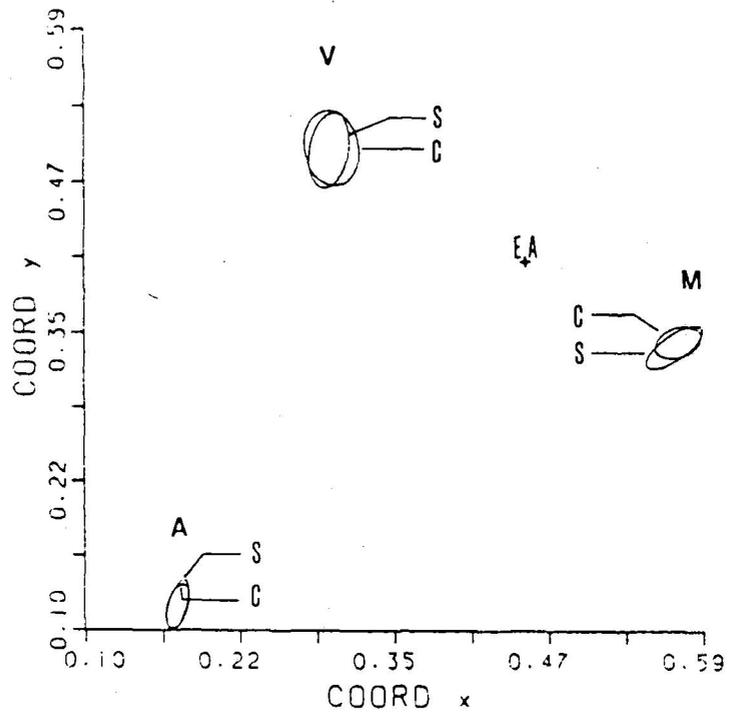


Figura 5.59: Resultados para el observador JR; S adaptación a la oscuridad; C adaptación al estímulo acromático; EA estímulo adaptante representado por el iluminante A.

TABLA V.XIV; Centros de las elipses representativas del umbral diferencial de cromaticidad; estímulo AZUL.

<u>Adaptación</u>	<u>RM</u>		<u>LJ</u>		<u>JR</u>	
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>
Oscuridad	.176	.121	.176	.120	.176	.123
Acromática	.175	.121	.177	.122	.176	.122

TABLA V.XV : Centros de las elipses representativas del umbral diferencial de cromaticidad; estímulo VERDE.

<u>Adaptación</u>	<u>RM</u>		<u>LJ</u>		<u>JR</u>	
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>
Oscuridad	.296	.502	.296	.493	.298	.495
Acromática	.294	.505	.299	.497	.299	.496

TABLA V.XVI; Centros de las elipses representativas del umbral diferencial de cromaticidad; estímulo MAGENTA.

<u>Adaptación</u>	<u>RM</u>		<u>LJ</u>		<u>JR</u>	
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>x</u>	<u>y</u>
Oscuridad	.571	.337	.569	.334	.570	.337
Acromática	.571	.337	.569	.335	.572	.339

5.5.- Estudio Comparativo de los Umbrales Diferenciales de Color por Comparación Simultánea y Sucesiva.

En el presente apartado nos ocuparemos de hacer un estudio comparativo entre los umbrales diferenciales de color obtenidos por comparación simultánea o sucesiva de estímulos. Se pretende comparar las características de la capacidad de discriminación bajo estas formas distintas de presentación, lo que puede presentar interés frente a problemas científicos y técnicos. Pensamos que muchos de los problemas que en la industria aparecen pueden resolverse con una acertada evaluación de las tolerancias de color, debiendo de tener en cuenta por tanto que muchos de los modos de comparación que se dan en la vida ordinaria se realizan mediante presentaciones sucesivas de estímulos en vez de hacerlo de modo simultáneo.

Derivado de esto y tomando en consideración que la mayor parte de los datos que en colorimetría industrial se utilizan provienen de estudios en comparación simultánea, consideramos que es preciso el análisis de la discriminación cromática bajo el punto de vista de las diferencias que puedan darse entre una y otra formas de presentación.

Para este apartado de la memoria se ha realizado la determinación de los umbrales diferenciales de color por comparación simultánea para dos de los observadores: LJ y JR, y cuatro de los estímulos analizados anteriormente: azul, verde, magenta y púrpura. El método experimental utilizado ha sido descrito ya ampliamente, por lo que sólo señalaremos como diferencias con lo mencionado para umbrales diferenciales sucesivos el que el tiempo de exposición de los estímulos a comparar fue fijado en 2 s, en base a la estabilización en la discriminación bajo estas condiciones experimentales a partir de alrededor de 1 s encontrada por Hita et al. (1982).

Los umbrales obtenidos bajo la forma de comparación simultánea han sido comparados con los obtenidos por comparación sucesiva para un tiempo intermedio de 8 s. De modo análogo al apartado anterior, mostramos los resultados obtenidos de la comparación de ambos casos en las tablas V.XVII-XXIV, para los dos sistemas de representación de

color utilizados.

Asimismo, en las figuras 5.60-61 se muestran las elipses de discriminación obtenidas para ambos observadores y los dos tipos de comparación. Las diferencias observadas en los centros de las elipses, no se deben a desplazamientos de estos respecto del estímulo de referencia, sino a las dificultades encontradas en algunos de los estímulos de reproducir de forma exacta las coordenadas de cromaticidad del estímulo de referencia en comparación sucesiva para el caso de la comparación simultánea, debido al propio dispositivo experimental.

En cualquier caso, las diferencias son mínimas en la mayoría de los casos y entendemos que la comparación es posible, a la vista de los resultados de otros autores que indican como los umbrales en el espacio de color no presentan cambios bruscos en su tamaño y forma en regiones tan próximas del espacio cromático.

Por otra parte, no se han observado, análogamente a lo sucedido en el caso de los umbrales sucesivos, cambios importantes en la cromaticidad del centro de los elipsoides respecto de los estímulos de referencia, lo que era de esperar Hita y Jiménez (1980).

Del análisis de las tablas y figuras expuestas podemos deducir dos conclusiones de carácter general. La primera es el aumento, observado en todos los casos, de los umbrales de cromaticidad y luminancia cuando la comparación es sucesiva frente a cuando es simultánea. La segunda, la similitud en la forma y orientación de las elipses en un caso u otro.

Con respecto a lo primero y con referencia al umbral de cromaticidad, representado por el área de la sección elíptica principal, se observa como el valor del aumento encontrado no es uniforme, dependiendo de una parte del estímulo analizado y de otra del observador. Para el observador JR las diferencias se muestran menores, salvo el caso del azul, que para el observador LJ, quien muestra para este estímulo diferencias mínimas. De otro lado, para el estímulo verde se presentan diferencias significativas para ambos observadores.

Esta variedad en el comportamiento de los umbrales, está de -- acuerdo con los resultados de otros autores que han realizado esta -- comparación, Newhall et al. (1957), Uchikawa(1983), cuyos resultados asimismo no muestran una dependencia definida del valor de la diferencia entre ambos tipos de comparación, con la cromaticidad de los estímulos.

De igual forma, las diferencias entre observadores están de acuerdo con los resultados de Uchikawa, lo que puede estar justificado en base a la posibilidad de que algunos mecanismos diferenciados se introduzcan en el proceso visual bajo cada una de las formas de presentación, pudiendo existir por tanto, diferencias selectivas entre observadores en base a la capacidad específica de cada uno de ellos -- respecto de estos mecanismos. Sin embargo, y a la vista de la segunda de las conclusiones apuntadas, no se puede considerar que estas diferencias afecten cualitativamente al umbral y por tanto a la capacidad de discriminación.

La relación de tamaños de los umbrales para uno y otro tipo de comparación se puede considerar en media, en el sistema CIE 1931, entre dos y tres veces mayor en el caso sucesivo frente al simultáneo. - Este resultado discrepa, en términos generales, de los resultados de Newhall et al., los que dan un aumento medio de seis veces en el tamaño de las elipses. Pensamos que pueden intervenir en este hecho, el - método experimental distinto empleado por estos autores, así como la evaluación del umbral que realiza.

Los resultados de Uchikawa e Ikeda (1981) y Uchikawa (1983), -- muestran un aumento del umbral en longitud de onda de aproximadamente el doble y el de pureza colorimétrica entre una vez y media y dos. Estos resultados son difícilmente comparables a los nuestros, debido a que estos autores han trabajado bajo condiciones experimentales distintas a las nuestras, a luminancia constante y no evaluando las diferencias a lo largo de todo el espacio de color, y a que nuestros resultados están deducidos a partir del umbral diferencial global. Sin embargo, consideramos que siguen la línea de los nuestros, en el sentido - de aumentos del valor del umbral, siempre significativos pero no espec

taculares, al pasar de la comparación simultánea a la sucesiva, evaluándose esta diferencia de manera individualizada entre observadores.

Cuando este análisis es realizado en el sistema CIELAB, no utilizado por los autores mencionados, la relación de tamaños aumenta para todos los casos, estableciéndose un rango medio entre tres y cuatro veces mayor el valor del umbral de un caso frente al otro. Por otra parte, se mantienen las variaciones relativas del análisis individualizado para el estudio realizado en el sistema CIE 1931.

Con referencia al umbral de luminancia, se encuentran asimismo aumentos sistemáticos en el valor del umbral cuando la comparación entre estímulos es sucesiva. Remontándonos al trabajo de Durup y Fessard (1938), este resultado daría la razón a los autores que preveían valores menores del umbral cuando la comparación era de tipo simultáneo y en contra por tanto, de aquellos que en base a razones de tipo psicológico, pronosticaban una mejora de los aspectos cuantitativos de la discriminación cuando ésta era de tipo sucesivo.

Independientemente de estas consideraciones, cabía esperar este resultado a la vista de las características generales de la discriminación sucesiva estudiadas hasta la fecha, si bien no hay referencias recientes de trabajos realizados en este sentido para luminancia.

El aumento en el valor del umbral de luminancia es, en términos generales, menor que el encontrado para cromaticidad, pero se debe tener en cuenta que en este caso la relación encontrada es entre magnitudes de tipo logarítmico y no de las diferencias directas como en el caso anterior. De cualquier forma, la relación media apunta entre 1.2 y 1.5 veces mayor el logaritmo de la fracción de Weber para el caso de la comparación sucesiva, dándose con respecto a este parámetro diferencias menos significativas en el sistema CIELAB que en el CIE 1931, lo que está ligado a las transformaciones que relacionan ambos sistemas de representación.

Por último y con relación a las diferencias en orientación y excentricidad de las elipses obtenidas bajo ambos tipos de comparación, se observa que estas no pueden ser en ningún caso consideradas signi-

ficativas, salvo casos aislados en el sistema CIELAB, lo que nos hace deducir que, de forma general, se considere que la orientación y forma de los umbrales permanezcan invariantes respecto del tipo de presentación, lo que está de acuerdo con los resultados de Newhall - et al. (1957).

Este resultado es, sin duda, interesante y nos hace suponer -- que las diferencias encontradas entre uno y otro método sean de tipo cuantitativo y no cualitativo. Por tanto, la discriminación según las direcciones del espacio parecen ser independientes del tipo de presentación utilizado, entendiéndose pues que el tipo de presentación sucesivo introduce incertidumbre en la discriminación, con relación al simultáneo, pero no varía las características generales de la misma.

TABLA V.XVII: Resultados para el AZUL; sistema CIE 1931.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	1.1	3.3
Log frac. de Weber	1.1	1.5
 <u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	+5.19	+1.99
Rel. semiejes sec. pr.	- .04	- .01

TABLA V.XVIII: Resultados para el VERDE; sistema CIE 1931

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	4.1	2.0
Log frac. de Weber	1.5	1.2
 <u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	-0.39	-10.09
Rel. semiejes sec. pr.	- .12	- .16

TABLA V.XIX: Resultados para el MAGENTA; Sistema CIE 1931.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	2.5	1.4
Log frac. de Weber	1.2	1.0
 <u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	+2.59	+1.49
Rel. semiejes sec. pr.	- .05	+ .08

TABLA V.XX: Resultados para el PURPURA; Sistema CIE 1931.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	3.3	1.7
Log frac. de Weber	1.5	1.4
 <u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	-5.09	-10.69
Rel. semiejes sec. pr.	+ .07	+ .07

TABLA V.XXI: Resultados para el AZUL; Sistema CIELAB.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	1.6	4.7
Log frac de Weber	1.0	1.2
<u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	+ .08 ^o	+ .04 ^o
Rel. semiejes sec. pr.	- .02	+ .02

TABLA V. XXII: Resultados para el VERDE; Sistema CIELAB.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	4.6	2.2
Log frac. de Weber	1.3	1.1
<u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	-3.5 ^o	-21.1 ^o
Rel. semiejes sec. pr.	- .13	- .09

TABLA V.XXIII: Resultados para el MAGENTA; Sistema CIELAB.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	2.3	1.5
Log frac. de Weber	1.1	1.1
<u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	+1.19	- .19
Rel. semiejes sec. pr.	- .04	+ .03

TABLA V. XXIV: Resultados para el PURPURA; Sistema CIELAB.

<u>Sucesiva</u>		
<u>Simultánea</u>	<u>LJ</u>	<u>JR</u>
Area sec. principal	5.0	2.4
Log frac. de Weber	1.3	1.2
<u>Sucesiva - Simultánea</u>		
Orientación sec. pr.	+1.79	-1.79
Rel. semiejes sec. pr.	+ .17	- .31

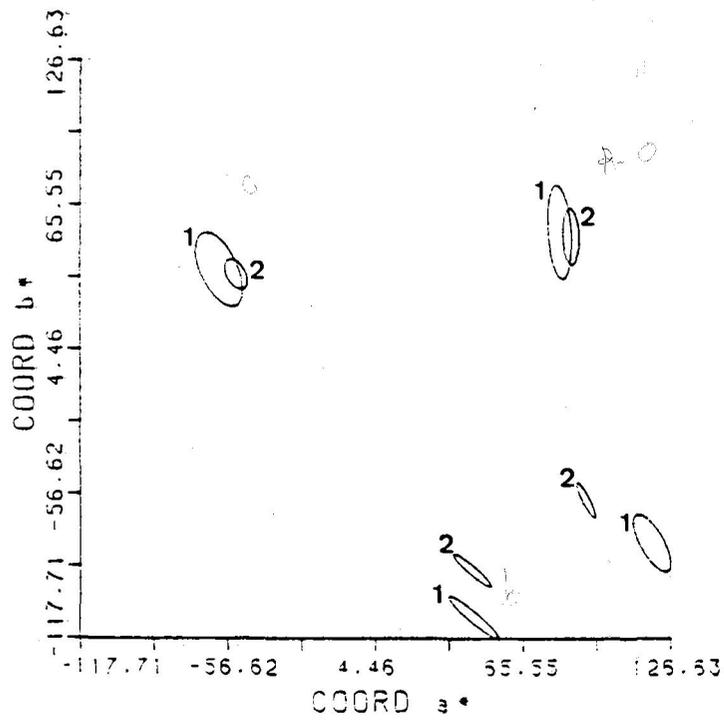
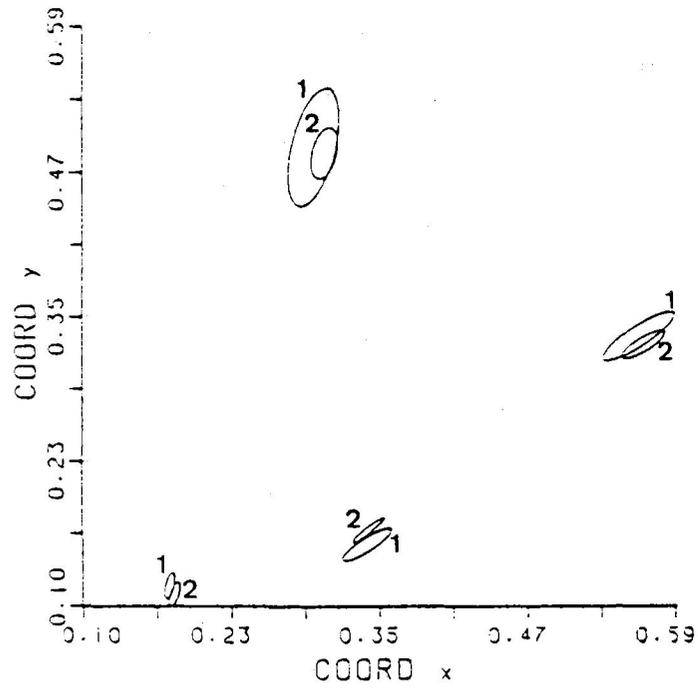


Figura 5.60: Resultados para el observador LJ;
 1: sucesiva; 2 : simultánea.

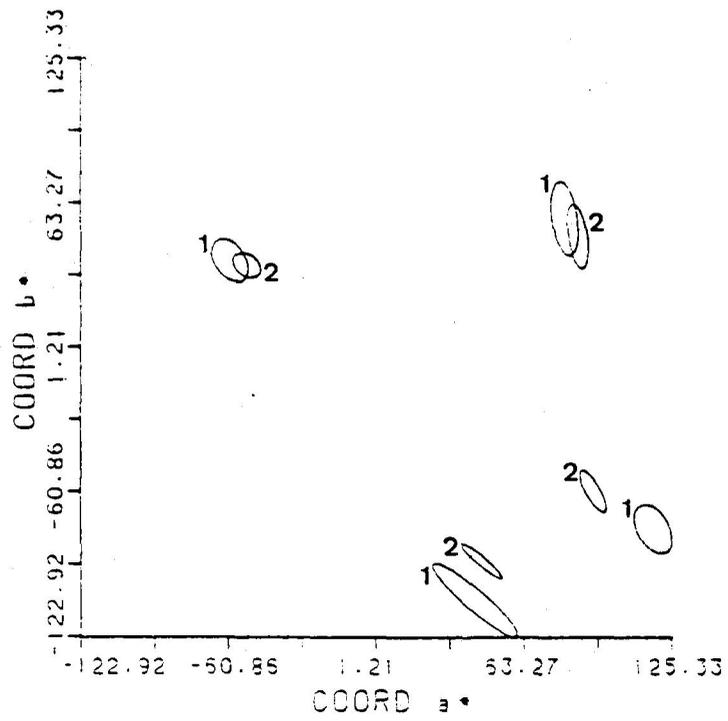
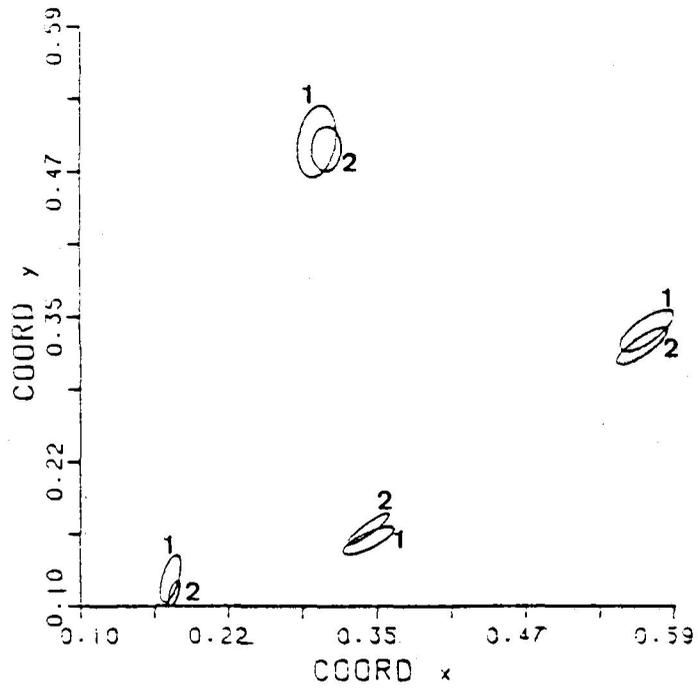


Figura 5.61: Resultados para el observador JR;
 1: sucesiva; 2: simultánea.

CAPITULO VI

VI.- CONCLUSIONES

Como resumen de las principales aportaciones y conclusiones que del trabajo realizado pueden extraerse, pasamos a detallar aquellas - que hemos considerado más significativas y representativas del mismo:

1.- A la vista de la escasez de trabajos publicados en el campo de la comparación sucesiva de estímulos dentro de la Ciencia del Color y justificada la importancia que los procesos derivados de la misma - en la Ciencia y la Técnica, pensamos necesaria, como soporte adecuado de la Colorimetría, la realización de trabajos encaminados al mejor - conocimiento de los aspectos sucesivos y de memoria, tanto de la discriminación cromática como de los mecanismos generales de la visión del color. En este sentido, nuestro trabajo trata de realizar un estudio - global de diferentes aspectos de la Colorimetría Diferencial por comparación sucesiva.

2.- El dispositivo experimental utilizado y el método general de sarrollado para la realización de las medidas concernientes a los distintos apartados que en la memoria se analizan, entendemos que son idóneos para el tipo de investigación que se plantea, asegurándose una alta objetividad y reproducibilidad en las medidas, imprescindibles cuando se llevan a cabo experiencias en el campo de la Óptica Fisiológica. Los resultados así lo confirman, si bien sujetos a las diferencias propias entre observadores. En este sentido, se considera que las experiencias en Colorimetría Diferencial deben encaminarse a conseguir que el ojo humano trabaje bajo condiciones lo más próximas a las de su funcionamiento habitual.

3.- Con relación al estudio de la influencia del tiempo intermedio entre presentaciones sobre el umbral diferencial de luminancia, se encuentra un aumento de éste cuando el tiempo intermedio aumenta, teniendo la capacidad de discriminación a una estabilización para tiempos superiores a 8 segundos. En muchos de los casos no aparecen variaciones en el valor del umbral para tiempos de hasta 3 segundos, aunque este fenómeno parece depender de la cromaticidad de los estímulos.

4.- En el tipo de presentación adoptado no se puede considerar que se presente un aumento sistemático de la luminancia media del umbral respecto de la del estímulo analizado, en el sentido que otros autores han apuntado, Newhall et al, (1957), Bartleson, (1961). Sí se pueden considerar situaciones particulares en las que esto sucede, - aunque no son significativas de forma generalizada las diferencias en contradas para todos los observadores.

5.- Al evaluar la evolución del umbral diferencial de cromaticidad en función del tiempo intermedio, se encuentra asimismo un crecimiento del valor de éste cuando el tiempo aumenta, llegándose a la estabilización para tiempos superiores a 8 segundos. En uno de los estímulos estudiados, amarillo, se observa esta misma estabilización en tiempos menores de tres segundos. A la vista de estos resultados se puede concluir que, en nuestras condiciones de trabajo, para los estímulos y observadores analizados en el mismo, en ningún caso se puede suponer la constancia en la capacidad de discriminación cromática a partir de tiempos de alrededor de 2 segundos, como ha sugerido Uchi-kawa (1983).

6.- No se detectan variaciones significativas en la cromaticidad media del umbral respecto del estímulo de referencia, lo que nos hace suponer que los resultados obtenidos acerca de la variación en la saturación de los estímulos en otros trabajos realizados por comparación sucesiva no sean extrapolables al método experimental aquí planteado y por lo tanto no generalizables.

7.- Los umbrales diferenciales de cromaticidad, obtenidos por comparación sucesiva de estímulos, muestran, en general, una alta similitud en lo referente a forma orientación y tamaños relativos, con los obtenidos por otros autores, como MacAdam, por comparación simultánea. Esta similitud es observada tanto en el sistema de representación CIE 1931 como en el CIELAB. El hecho de que el comportamiento para los tres observadores sea análogo, incluso en el tamaño de los umbrales, dentro de los límites de la variabilidad inherente a este tipo de experiencias, hace suponer que se puedan generalizar estas conclusiones.

8.- Realizado un estudio comparativo de los sistemas de representación CIE 1931 y CIELAB, con referencia a la uniformidad del espacio de color, no se observan ventajas de uno sobre otro al analizar la excentricidad de las elipses representativas de los umbrales, o lo que es igual, la uniformidad local del espacio. Sin embargo, al analizar la uniformidad global del espacio, a través del tamaño de los umbrales, se encuentra que el sistema CIELAB presenta menor dispersión en los valores de los mismos que el sistema CIE 1931, lo -- que supone ventajas particulares del primero sobre éste último.

9.-En el estudio realizado sobre la adecuación del elipsoide como representativo del umbral diferencial de color se encuentra, en la mayor parte de los casos, un buen ajuste del contorno elíptico a la nube de puntos que determina el umbral. Se considera, pues, a esta figura geométrica como una representación adecuada de la capacidad de discriminación cromática del ojo humano, si bien estimamos que revisiones mas profundas son necesarias cuando se pretende llegar a conclusiones en colorimetría diferencial sucesiva, sobre la estructuración métrica del espacio de color.

10.- Se observa un aumento selectivo del tamaño del umbral de cromaticidad cuando se introduce un estímulo acromático como adaptación, frente a cuando esta se lleva a cabo a la oscuridad. En el mismo sentido, aparecen giros de las elipses de discriminación hacia las direcciones que determinan los estímulos analizados con el adaptante, así como un aumento de la relación de semiejes de las -- elipses traducido en un alargamiento en las mencionadas direcciones. Se concluye que los cambios encontrados en el umbral siguen la línea de una disminución en la sensibilidad diferencial del observador cuando se introducen modificaciones en el estímulo analizado -- del tipo del adaptante.

11.- No se aprecian diferencias en los centros de los elipsoides de discriminación bajo las distintas condiciones de adaptación, lo que sugiere una constancia en las igualaciones, independientes por lo tanto del estado de adaptación del observador.

12.- Al realizar el estudio comparativo entre umbrales diferenciales de color obtenidos por comparación sucesiva y por comparación simultánea, para los mismos observadores, se observa un aumento sistemático de los primeros, tanto respecto del umbral de cromaticidad como del de luminancia. El valor de estas diferencias oscila según los observadores, estimándose en media entre el doble y el triple para el umbral de cromaticidad y entre 1.2 y 1.5 el de luminancia referido al logaritmo de la fracción de Weber, en el sistema CIE 1931.

13.- No se aprecian diferencias en la forma y orientación de los umbrales obtenidos bajo las formas de presentación simultánea y sucesiva. En el tipo de comparación aquí planteada, no parecen existir diferencias cualitativas en la discriminación cromática bajo una y otra formas de comparación, lo que está de acuerdo con lo encontrado por otros autores, Newhall et al. (1957), bajo condiciones y método experimental muy distintos.

14.- Parece existir una dependencia de las diferencias en la capacidad de discriminación en color bajo uno y otro tipo de comparación y la cromaticidad del estímulo analizado. No obstante, no se encuentran relaciones sencillas entre ambos parámetros y se hace necesario un estudio más exhaustivo en tal sentido si se pretende encontrar relaciones específicas cuantitativas.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- AVERBACH, E. y CORIELL, A.S., "Short-term memory in vision" Bell Syst. techn. I., 40, 309-328 (1961)
- BARTLESON, C.J., "Memory colors of familiar objects" J. Opt. Soc. Am., 50, 73-77 (1960)
- BARTLESON, C.J., "Color in memory in relation to photographic reproduction" Photogr. Sci. Engng., 5, 327-331 (1961)
- BARTLESON, C.J., "A review of chromatic adaptation" Proc. Intern. Color Congr. "Color 77" Troy (Bristol: Adam Hilger 1977) 63-96
- BARTLESON, C.J. y WOODBURY, W.W., "Pshychophysical methods for evaluating the quality of color transparencies. III. Effect of number of categories, anchors, and types of instructions on quality ratings" Photogr. Sci. Engng., 9, 323-330 (1965)
- BEDFORD, R.E. y WYZSECKI, G., "Wavelength discrimination for point sources" J. Opt. Soc. Am., 48, 129-135 (1958)
- BOUMAN, M.A. y WALRAVEN, P.L., "Color discrimination data" Handbook of Sensory Physiology. Vol. VII/4. Visual Phychophysics (Berlin: Springer Verlag 1972)
- BROWN, W.R.J., "The influence of luminance level on visual sensitivities to colour 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. y MacAdam, D.L., "Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences" *J. Opt. Soc. Am.*, 39, 808-834 (1949)
- CRAWFORD, B.H., "Just perceptible chromaticity shifts" *Proc. Intern. Color Congr. "Color 69" Stockholm (Gottingen: Musterschidt 1970)* 302-311
- CRUZ, A. y ALVAREZ-CLARO, M., "Conservación del metamerismo en los cambios de adaptación cromática" *Opt. Pur. Apl.*, 6, 143-150 (1973)
- DREW, C.G., "The variation of sensory threshold with the rate of application of the stimulus. III. The differential threshold for intensity of light" *Br. J. of Ps.*, 27 297-302 (1937)
- DURUP, G. y FESSARD, A., "Revue critique des seuils différentiels "successifs" et présentation d'un appareil a plage unique" *Anne Psychol*, 39, 227-251 (1938)
- FLUGEL, J.C. y McDOUGALL, W., "Further observations on the variation of the intensity of visual sensation with the duration of the stimulus" *Br. J. of Ps.*, 3, 178-207 (1909)
- FONDOR, K. y HAPPISCH, L., "Die bedeutung der zeit zwischen zwei vergleichsreizen bei bestimmung von unterschiedsschwellen" *Pfl. Ar.*, 201, 369-375 (1923)
- GUILD, J., "The colorimetric properties of the spectrum" *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, A230, 149-187 (1931)
- HANES, R.M. y RHOADES, M.V. "Color identification as a function of extended practice" *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 1060-1064 (1959)

- HEINZ, M. y LIPPAY, F., "Über die beziehungen zwischen der unterschiedsempfindlichekeit und zahl der erregten sinneselemente" Arch. ges. Physiol., 218, 437-447 (1928)
- HELMHOLTZ, H. von, Handbuch der Physiologischen. Optik, 2. (Hamburg: Voss 1896)
- HELSON, H., JUDD, D.B. y WARREN, M.H., "Object-color changes from daylight to incandescent filament illumination" Illum. Engng., 47, 221-233 (1952)
- HELLMING, E., "Versuche uber das farberinnerungsvermogen" Farbe, 7, 65-91 (1958)
- HITA, E., "Influencia de las condiciones experimentales en los umbrales diferenciales de color" Tesis doctoral, Universidad de Granada. 1975.
- HITA, E. y JIMENEZ, E., "Differential thresholds of color from isomeric matching" Atti Fond. Giorgio Ronchi, 35, 511-526 (1980)
- HITA, E. y 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., ALVAREZ-CLARO, M. y GUERRERO, M., "Differential thresholds representation of color" Atti Fond. Giorgio Ronchi, 32, 882-893 (1977)
- HITA, E., GONZALEZ-CABALLERO, F y CERVANTES, A., "On the geometric structure of color discrimination thresholds" Farbe, 30, 55-64 (1982 b)
- HITA, E., JIMENEZ, E. y ALVAREZ-CLARO, M., "Color discrimination from isomeric matching and different types of primaries fusion" Atti Fond. Giorgio Ronchi, 34, 718-727 (1979)

- HITA, E., ALVAREZ-CLARO, M., PARDO, G. y JIMENEZ, E., "Influencia del metamerismo y el tipo de fusión de primarios en los umbrales diferenciales de color" *Opt. Pur. Apl.*, 9, 53-60 (1976)
- HITA, E., JIMENEZ DEL BARCO, L., MARTINEZ, R. y JIMENEZ, E., "Variación de los umbrales diferenciales de luminancia con el tiempo de exposición" *Opt. Pur. Apl.*, 13, 91-96 (1980)
- HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L. y MARTINEZ, R., "Temporal aspects of color discrimination" *J. Opt. Soc. Am.*, 72, 578-582 (1982)
- HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO y CARRILLO, A., "Experimental study of color specification systems" En prensa (1984)
- IKEDA, M. y SHIMOZONO, H., "Luminous efficiency functions determined by successive brightness matching" *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 1767-1771 (1979)
- IKEDA, M. y UCHIKAWA, K., "Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode" *Vision Res.*, 18, 1565-1571 (1978)
- INDOW, T. y MATSUSHIMA, K., "On the trainability of visual assessment of color differences " *Farbe*, 23, 279-290 (1974)
- IVANOFF, A., "Sur la discrimination de l'intensite d'un source ponctuelle" *Rev. d'Opt.*, 25, 88-113 (1946)
- JAMESON, D. y HURVICH, L., "Opponent chromatic induction and wavelength discrimination" *The Visual System: Neurophysiology and Psychophysics* (Berlin: Springer Verlag 1961)

- JUAN, J., "Variación de la transmitancia espectral y del color de vidrios al cambiar la temperatura" *Opt. Pur. Apl.*, 7, 55-59 (1974)
- JUDD, D.B., "Saturation scale for yellow colors" *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 35-40 (1933)
- JUDD, D.B., "Hue, saturation and lightness of surface colors with chromatic illumination" *J. Opt. Soc. Am.*, 30, 2-32 (1940)
- JUDD, D.B., *Problemas actuales del color* (Madrid: Instituto de Optica "Daza de Valdés" 1954)
- JUDD, D.B., "Some color demonstration I have shown" *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 322-328 (1959)
- KEITZ, H.A.E., *Light calculation and measurement*, (Eindhoven: Philips T. Library. 1955)
- KINNEY, J. A.S., "Changes in appearance of colored stimuli with exposure duration" *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 738-739 (1965)
- KRIES, J.VON, *Handbuch der Physiologischen. Optik*, 2. (Hamburg: Voss 1911)
- KRYSTEK, M., "Calculation of tristimulus values from spectral data with regard to measurement uncertainties" *Optik*, 62, 49-58 (1982)
- KRYSTEK, M. y ERB, W., "Transformation of the tristimulus space into the uniform color space" *Optik*, 57, 191-198 (1980)
- KRUIHOF, A.A., "Chromatic adaptation with near white backgrounds" *Farbe*, 4, 147-158 (1955)

- KUEHNI, R.G., "Advances in color-difference formulas" Color Res. Appl., 7, 19-23 (1982)
- LE GRAND, Y., "Théories sur la métrique de l'espace des couleurs" Proc. Intern. Color Congr. "Color 69" Stockholm (Göttingen: Musterschmidt 1970) 257-265
- LE GRAND, Y., *Optique Physiologique* (Paris: Masson et Cie 1972)
- LOZANO, R.D., *El color y su Medición* (Buenos Aires: America Lee 1978)
- LOZANO, R.D., PRIU, J.R. y YASAN, E.D., "Estudio sobre diferentes cabezales fotométricos. I. Precisión" Opt. Pur. Apl. 7, 15-20 (1974)
- MACADAM, D.L., "Visual sensitivities to color differences in daylight" J. Opt. Soc. Am., 32, 247-274 (1942)
- MACADAM, D.L., "Specification of small chromaticity differences in daylight" J. Opt. Soc. Am., 33, 18-26 (1943)
- MACADAM, D.L., "On the geometry of colour space" J. Franklin Inst., 238, 195-210 (1944)
- MACDONALD, P.A. y ALLEN, J.F., "The psychophysical law. I. The sense of vision" Phil. Mag. 9, 817-827 (1930)
- MCCREE, K.J. "Small field tritanopia and the effects of voluntary fixation" Optica Acta, 7, 317-323 (1960)
- MCDUGALL, W., "The variation of the intensity of visual sensation with the duration of the stimulus" Br. J. of Ps., 1, 151-189 (1904)
- NEWHALL, S.M., BURNHAM, R.W. y CLARK, J.R., "Comparison of successive with simultaneous color matching" J. Opt. Soc. Am. 47, 43-56 (1957)

- 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
1970) 727-733
- PLAZA, L., "La colorimetría y los observadores psicofísicos"
Libro Homenaje Dr. Durán (Madrid: Universidad Complu-
tense 1983)
- POINTER, M.R., "A comparison of the CIE 1976 color spaces" Color
Res. Appl., 6, 108-118 (1981)
- PRIEST, I.G. y BRICKWEDDE, F., "Minimum perceptible colorimetric
purity as a function of dominant wavelength" J. Opt.
Soc. Am., 28, 133-139 (1938)
- RAUTIAN, G.N. y SOLOVJEVA, V.P., (1954) citado en: MacAdam, D.L.,
"Rautian on color discrimination" J. Opt. Soc. Am.,
45, 1065-1071 (1955)
- RONCHI, L. y FERRARA MORI, G., "On the characteristics of observers
employed in visual research" Atti Fond. Giorgio Ron-
chi, 18, 203-219 (1963)
- SCHROEDINGER, E., "Grundlinien einer theorien der farbemmetrik in
tagessehen" Ann. Physik, 63, 481-520 (1920)
- SEVE, R., "Erreurs systématiques liées a l'emploi des colorimetres
trichromatiques" Information Couleur, Nr. 14-18,
10-16 (1982)
- SIEGEL, M.H., "Color discrimination as a function of exposure time"
J. Opt. Soc. Am., 55, 566-568 (1965)
- SIEGEL, M.H., "Color discrimination and luminance" Perc. Psycho-
phys., 66, 163-166 (1969)

- STILES, W.S., "A modified Helmholtz line element in brightness-colour space" Proc. Phys. Soc. (London), 58, 41-65 (1946)
- UCHIKAWA, K., "Purity discrimination: successive vs simultaneous comparison method" Vision Res., 23, 53-58 (1983)
- UCHIKAWA, K. e IKEDA, M., "Temporal deterioration of wavelength discrimination with successive comparison method" Vision Res., 21, 591-595 (1981)
- VOS, J.J. y WALRAVEN, P.L., "An analitical description of the line element in the zone fluctuation model of colour vision" Report No. IZF 1970-5 (Soesterberg: Institute for Perception RVO-INO 1970)
- WALRAVEN, P.L., "On the mechanism of colour vision" Tesis doctoral. Universidad de Utrech. 1962
- WRIGHT, W.D., "A re-determination of thrichromatic coefficients of the spectral colors" Trans. Opt. Soc. (London), 30, 141 (1928-29)
- WRIGHT, W.D., "The sensitivity of the eye to small colour differences" Proc. Phys. Soc. (London), 53, 93-112 (1941)
- WRIGHT, W.D. y PITT, F.G.H., "Hue discrimination in normal color vision" Proc. Phys. Soc. (London), 46, 459-473 (1934)
- 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., General discussion. III. Colour Metrics (Soesterberg Vos, Friele y Walraven 1972 b) 330-338

WYSZECK, G. y FIELDER, G.M., "New color matching ellipses" J. Opt.
Soc. Am., 61, 1135-1152 (1971)

WYSZECKI, G. y STILES, W.S., Color Science (Nueva York: John Wiley
1967)

ZAIDEL, A.N., OSTROVSKAYA, G.V. y OSTROVSKI, Y.I., Técnica y prácti-
ca de Espectroscopía (Moscú: Mir 1974)