



UNIVERSIDAD DE GRANADA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE OPTICA

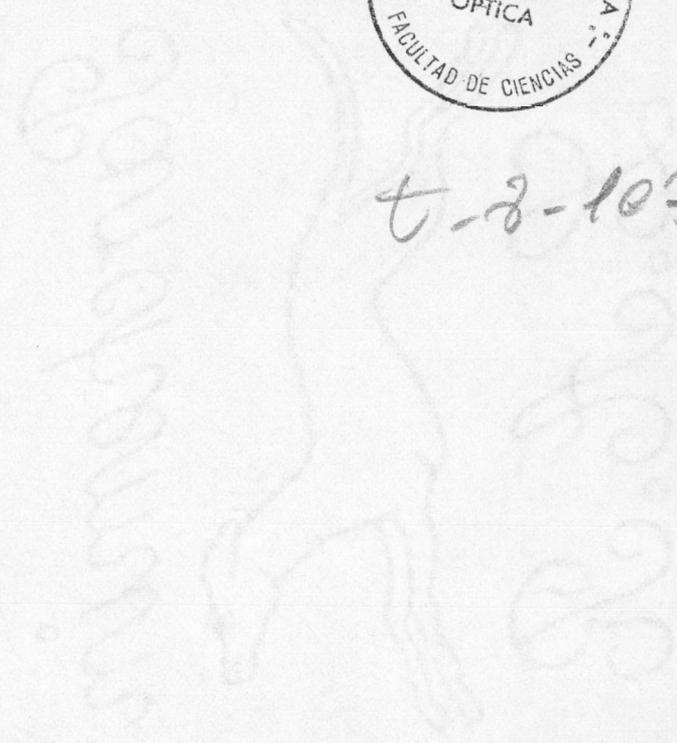
**COLORIMETRÍA DIFERENCIAL EN
IGUALACIONES METÁMERAS**

TESIS DOCTORAL
LUIS M. JIMENEZ DEL BARCO JALDO

Proo. T. 583

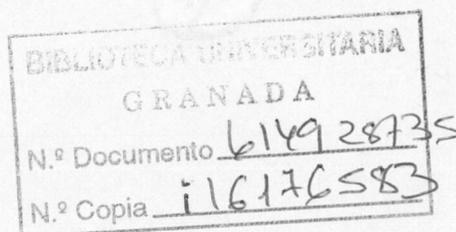


t-2-107



UNIVERSIDAD DE GRANADA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE OPTICA

COLORIMETRIA DIFERENCIAL EN
IGUALACIONES METAMERAS



POR:
LUIS M. JIMENEZ DEL BARCO JALDO

Tesis Doctoral dirigida por el Dr. D. Enrique F. Hita Villaverde, Profesor Titular de Optica de la Universidad de Granada. Fué defendida el 15 de Diciembre de 1984, ante el tribunal constituido por:

Presidente: *Dr. D. Gerardo Pardo Sánchez.
Catedrático de Termología de la Universidad de Granada.*

Vocales: *Dra. D^a. María Josefa Yzuel Giménez.
Catedrático de Optica de la Universidad Autónoma de Barcelona.*

*Dr. D. Antonio de la Cruz Castillo.
Profesor de Investigación del Instituto de Optica "Daza de Valdés" (C.S.I.C.), Madrid.*

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

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

Profesor

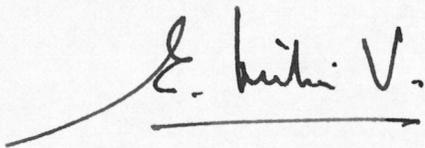
Invitado: *Dr. D. Antonio Corrons Rodríguez.
Director del Instituto de Optica "Daza de Valdés" (C.S.I.C.), Madrid.*

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

COLORIMETRIA DIFERENCIAL EN
IGUALACIONES METAMERAS

Visado en Granada, a 9
de Noviembre 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

DOCTOR EN CIENCIAS.



Luis M. Jiménez del Barco
Jaldo,
Licenciado en Ciencias
(Sección Físicas).

Quiero manifestar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible, de una u otra manera, la realización de este trabajo.

La eficaz dirección y constante estímulo del profesor Hita Villaverde, tanto en las tareas y medidas de laboratorio, como en la realización de la memoria que se presenta, han sido factores decisivos en el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, quiero destacar la valiosa colaboración del profesor y compañero Javier Romero Mora durante la realización de la misma.

Mención especial quiero hacer en estos agradecimientos a las sugerencias e interés demostrado por los profesores del C.S.I.C. D. Antonio de la Cruz y D. Lorenzo Plaza, así como a la Sección de Radiometría del Instituto de Óptica "Dáza de Valdés" por su desinteresada colaboración en algunos de los calibrados.

He de resaltar la valiosa colaboración de D. Miguel Cabrerizo Muñoz por la precisa y esmerada elaboración mecánica con que ha realizado parte del dispositivo experimental.

El permanente apoyo de mi esposa y compañera Mari Carmen Carrión ha sido primordial en el desarrollo de esta memoria.

Y en general a todos aquellos compañeros cuyo constante estímulo ha supuesto una valiosa ayuda moral en la tarea diaria.

I N D I C E

<u>CAPITULO 1</u>	<u>PAG.</u>
INTRODUCCION	1
1.1 INTRODUCCION GENERAL	1
1.2 CONCEPTOS GENERALES Y FUNDAMENTOS TEORICOS ,	4
1.2.1 COORDENADAS DE CROMATICIDAD	5
1.2.2 ESTABLECIMIENTO DE OBSERVADORES PATRON SICOFISICOS, OBSERVADOR CIE-1931	8
1.2.3 IGUALACIONES DE COLOR	15
1.3 COLORIMETRIA DIFERENCIAL	18
<u>CAPITULO 2</u>	
PLANTEAMIENTO GENERAL	27
2.1 METAMERISMO	27
2.2 INDICES DE METAMERISMO	33
2.3 PLANTEAMIENTO	39
<u>CAPITULO 3</u>	
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	45
3.1 DESCRIPCION GENERAL	45
3.1.1 SISTEMA DE PRODUCCION DEL ESTIMULO VARIABLE ,	47
3.1.2 SISTEMA DE PRODUCCION DEL ESTIMULO DE REFERENCIA	51
3.1.3 SISTEMA DE YUXTAPOSICION DE ESTIMULOS	54
3.1.4 SISTEMA DE OBSERVACION	54
3.1.5 SISTEMA DE CALIBRADO	56
3.2 PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO	57
3.3 REALIZACION DE CALIBRADOS	60

<u>CAPITULO 4</u>	<u>PAG.</u>
CONDICIONES EXPERIMENTALES	67
4.1 PARAMETROS EXPERIMENTALES	67
4.2 SELECCION COLORIMETRICA DE PRIMARIOS	76
<u>CAPITULO 5</u>	
METODOLOGIA GENERAL	94
5.1 METODO GENERAL DE MEDIDA Y DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS	94
5.2 ELABORACION DE DATOS Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS	97
<u>CAPITULO 6</u>	
RESULTADOS	100
6.1 GRADO DE METAMERISMO DE LAS IGUALACIONES ,	100
6.2 UMBRALES DIFERENCIALES DE CROMATICIDAD , ..	125
6.3 UMBRALES DIFERENCIALES DE COLOR Y LUMINANCIA	181
<u>CAPITULO 7</u>	
ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	184
<u>CAPITULO 8</u>	
CONCLUSIONES	200
<u>CAPITULO 9</u>	
BIBLIOGRAFIA	204

1. INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION GENERAL

El estudio realizado en la presente memoria se enmarca dentro del área de la Ciencia del Color y en concreto bajo la disciplina conocida como Colorimetría Diferencial.

Los resultados obtenidos en este aspecto de la Colorimetría se basan fundamentalmente en la determinación de los umbrales diferenciales de color, a partir de procesos de discriminación cromática, y que tienen su origen en la limitación que posee el ojo humano en cuanto a la percepción de diferencias cromáticas entre un conjunto finito de estímulos de color (entendiendo por tales la energía radiante, de intensidad y composición espectral dada, que produce una sensación de color al estimular la retina del observador).

La importancia del estudio de los umbrales diferenciales de color cabe analizarla en dos vertientes diferentes, una teórica y otra práctica. La primera tiene por objeto el establecimiento del elemento de línea ds , asociado a la métrica del

espacio de color, que permita la predicción de las diferencias mínimas perceptibles, para las distintas tonalidades del mismo, en un sistema de representación que las especifique.

En el aspecto práctico es evidente que los umbrales diferenciales de color constituyen la base científica del establecimiento técnico de las tolerancias en color.

De otra parte, indudable interés ofrecen las técnicas experimentales en que se basa esta disciplina y cuyos resultados suponen una buena base de datos que contribuyen al conocimiento general de los procesos que rigen la visión del color, y desde luego al establecimiento de un modelo visual completo que explique satisfactoriamente su comportamiento.

El análisis de los resultados experimentales obtenidos por diversos investigadores confirma la influencia que sobre las características de los umbrales tienen algunos factores experimentales. Este es el marco de la línea de investigación que sobre discriminación cromática viene desarrollando el Departamento de Optica de la Universidad de Granada y que tiene como objetivos inmediatos el estudio y determinación experimental de las dependencias de los umbrales diferenciales de color con los parámetros que intervienen en el proceso de discriminación.

En este sentido pueden considerarse tres grupos diferentes:

- a) Los relacionados con las características físicas del estímulo que excita el sistema visual, como son la intensidad y composición espectral de la energía radiante.
- b) Aquellos otros factores que influyen en la respuesta del sistema visual para un mismo estímulo físico (tamaño

y localización de la zona retiniana excitada, estado previo de adaptación, tiempo de exposición, tipo de comparación, etc.,).

c) Los que se refieren al propio observador.

Sin duda alguna, fijados los parámetros englobados en el segundo grupo, serán las características de la radiación visible las que determinen la respuesta de un determinado observador. Aquí cabe plantearse dos posibilidades en cuanto al tipo de igualaciones del que se parta para la comparación de estímulos de color en el proceso de discriminación: isómeras o metámeras.

El estudio realizado en la presente memoria se basa en la determinación de las posibles influencias que, sobre los umbrales diferenciales de color, pueda tener el carácter metámero de la igualación de partida.

El interés de la investigación radica en primer lugar en el escaso número de estudios encontrados en la literatura científica bajo estas condiciones experimentales, pues prácticamente la totalidad de los mismos se han desarrollado con igualaciones isómeras o cuasi-isómeras en colorímetros visuales. Esto último debido en gran parte a los problemas asociados al metamerismo y que se comentan en la memoria. En segundo lugar, estudios previos realizados en este Departamento han puesto de manifiesto la posibilidad de existir ciertas dependencias con el carácter de la igualación colorimétrica visual. Y lo que es más importante radica en el hecho de que la mayoría de los problemas colorimétricos que se presentan en la práctica obedecen a las condiciones experimentales objeto de estudio, en cuanto a metamerismo se refiere, y que en parte fundamentan la propia Colorimetría.

1.2 CONCEPTOS GENERALES Y FUNDAMENTOS TEORICOS

El objetivo fundamental de la Colorimetría es la medida del color y como consecuencia directa de ello la especificación del mismo en sistemas de representación que permitan la solución de algunos de los problemas básicos que se plantean en este campo.

Punto de partida es la propia definición de color, entendiéndose éste como:

"Aquellas características de la luz distintas de sus inhomogeneidades espaciales y temporales, siendo la luz el aspecto de la energía radiante que el observador humano es capaz de percibir por la estimulación que produce en su retina." (OSA, 1944).

Esta definición no se ha visto exenta de críticas ya que en ella no se contemplan las situaciones relacionadas con su percepción y condiciones de observación, Lozano (1978). En este sentido cabe desglosar el concepto de color en los diferentes aspectos que engloba y se entiende por "color físico" aquellas características del estímulo, energía radiante, que determinan los distintos colores percibidos por observadores reales. Por "color percibido" (color síquico) se entiende el atributo de la respuesta, luz percibida, de un observador real al estimular su sistema visual la energía radiante. Por último, uno de los conceptos que ha permitido un gran avance, en cuanto al desarrollo de la Ciencia del Color como tal, es el englobado bajo el término "color sicofísico" o respuesta al estímulo por observadores modelo, realizables teórica o experimentalmente, que tratan de simular a los observadores reales.

La Comisión Internacional de Iluminación (C.I.E.) ha propuesto una serie de observadores patrón sicofísicos, establecidos para

diferentes condiciones experimentales de observación, de manera que es posible referir los resultados obtenidos por observadores reales, bajo determinadas condiciones experimentales, a la respuesta que se obtendría con la utilización de dichos observadores patrón. Este es el caso de los observadores CIE-1931 y CIE-1964, cuya utilización internacional permite la comparación de los resultados obtenidos por diferentes autores.

No obstante, en Colorimetría el concepto de observador no se limita al observador humano, sino que engloba también las respuestas de los instrumentos utilizados en la medida del color, como es el caso de los colorímetros fotoeléctricos, desarrollándose actualmente una amplia línea de investigación tecnológica en base a conseguir igualar la respuesta de éstos con los observadores patrón sicofísicos.

1.2.1 COORDENADAS DE CROMATICIDAD

El establecimiento de las leyes de Grassmann (1853) y su formulación matemática, basadas en la propiedad tricromática según la cual el sistema visual es trivariante, evaluando éste su respuesta en función de tres parámetros, ha posibilitado el desarrollo de la Colorimetría a partir de las propiedades de aditividad y proporcionalidad que implican tales leyes, si bien su riguroso cumplimiento presenta ciertas limitaciones en condiciones extremas no usuales, Bezold (1873), Purdy (1930-1931), Clarke (1963), Nimeroff (1963).

Estas leyes hacen posible establecer para un color Q la expresión algebraica:

$$Q = RR + GG + BB$$

según la cual el color Q se iguala con una mezcla aditiva de

las cantidades R, G, B (valores triestímulo) de los respectivos primarios R, G y B.

Cualquier color Q, cuyo correspondiente estímulo tiene una distribución energética espectral $L_{e\lambda}$ puede ser obtenido como mezcla aditiva de colores Q_λ , siendo los correspondientes estímulos las componentes monocromáticas del estímulo original. Si llamamos R_λ , G_λ y B_λ a los valores triestímulo del color Q_λ , se cumplirá:

$$Q_\lambda = R_\lambda R + G_\lambda G + B_\lambda B$$

Como

$$Q = \int Q_\lambda d\lambda$$

$$Q = \int R_\lambda d\lambda R + \int G_\lambda d\lambda G + \int B_\lambda d\lambda B$$

Luego podremos expresar para los valores triestímulo del color Q:

$$R = \int R_\lambda d\lambda$$

$$G = \int G_\lambda d\lambda$$

$$B = \int B_\lambda d\lambda$$

Si denominamos q_λ al color espectral cuyos correspondientes estímulos son monocromáticos y de radiancia unidad, y por \bar{r}_λ , \bar{g}_λ y \bar{b}_λ los valores triestímulo correspondientes a dichos colores, entonces:

como

$$\begin{aligned} Q &= \int L_{e\lambda} q_\lambda d\lambda = \int L_{e\lambda} (\bar{r}_\lambda R + \bar{g}_\lambda G + \bar{b}_\lambda B) d\lambda = \\ &= \int L_{e\lambda} \bar{r}_\lambda R d\lambda + \int L_{e\lambda} \bar{g}_\lambda G d\lambda + \int L_{e\lambda} \bar{b}_\lambda B d\lambda \end{aligned}$$

luego

$$R = \int L_{e\lambda} \bar{r}_\lambda d\lambda$$

$$G = \int L_{e\lambda} \bar{g}_\lambda d\lambda$$

$$B = \int L_{e\lambda} \bar{b}_\lambda d\lambda$$

Se definen las coordenadas de cromaticidad del color Q en el sistema R,G,B como:

$$r = \frac{R}{R + G + B}$$

$$g = \frac{G}{R + G + B}$$

$$b = \frac{B}{R + G + B}$$

Verificándose, naturalmente: $r + g + b = 1$

lo cual indica la independencia de solamente dos de las coordenadas de cromaticidad. Esta última ecuación corresponde a una plano cuya proyección oblicua en el diedro (r,g,b) sobre el plano (r,g) constituye el diagrama cromático que permite la especificación del color en un sistema referido a los primarios R,G,B.

A las funciones \bar{r}_λ , \bar{g}_λ y \bar{b}_λ se las denomina funciones de mezcla ó coeficientes de distribución y representan las cantidades de estímulos de referencia necesarios para igualar la unidad de flujo de radiación espectral. Por tanto, se puede establecer que las propiedades de un observador normal en lo que se refiere a igualaciones de color, y siempre que se cumpla la aditividad y proporcionalidad de tales igualaciones, quedan especificadas por las mencionadas funciones de mezcla.

1.2.2 ESTABLECIMIENTO DE OBSERVADORES PATRON SICOFISICOS.

OBSERVADOR CIE-1931

La medida de las coordenadas de cromaticidad supone el conocimiento de las funciones de mezcla referidas anteriormente, las cuales toman valores ligeramente diferentes para cada individuo normal en la visión del color, incluso para uno mismo dependen de las condiciones experimentales de medida y suministran información de las responsabilidades de los mecanismos de la visión del color frente a la energía radiante.

Ello hace necesario el establecimiento de criterios y normas internacionales que permitan referir los resultados de las medidas realizadas, en ciertas condiciones experimentales, a un mismo observador teórico propuesto como resultado promedio de los datos experimentales obtenidos por diversos observadores, quedando así normalizados los mismos y siendo posible, dentro de ciertos límites, su comparación.

Las primeras medidas realizadas en este sentido corresponden a los resultados obtenidos por Wright (1928-29) y Guild (1931), empleando cada uno de ellos diez y siete observadores respectivamente para la medida de las coordenadas de cromaticidad de colores espectrales. Sus resultados se muestran en las figuras 11.a y 11.b; a partir de ellos se obtuvieron las funciones de mezcla de ambos conjuntos de observadores, refiriéndolas posteriormente a las condiciones experimentales establecidas por la CIE con objeto de hacer posible su comparación, ya que ambos autores emplearon diferentes conjuntos de primarios en su determinación. Ello es posible mediante combinaciones lineales del tipo:

$$R = a_{11} R' + a_{12} G' + a_{13} B'$$

$$G = a_{21} R' + a_{22} G' + a_{23} B'$$

$$B = a_{31} R' + a_{32} G' + a_{33} B'$$

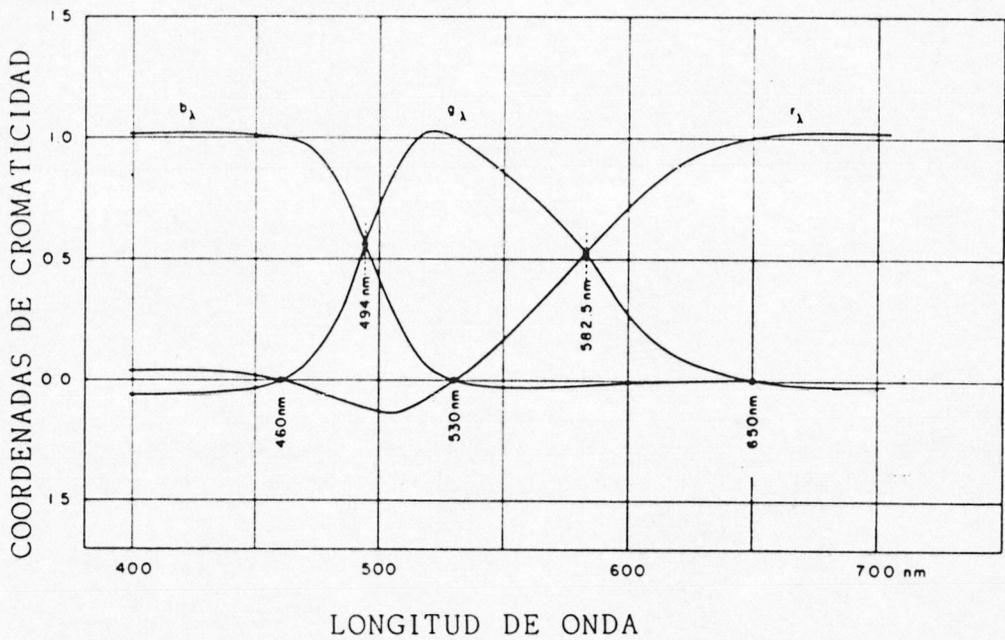


Figura 1.1.a. Resultados de Wright en la medida de las coordenadas de cromaticidad de colores espectrales para la determinación de las funciones de mezcla

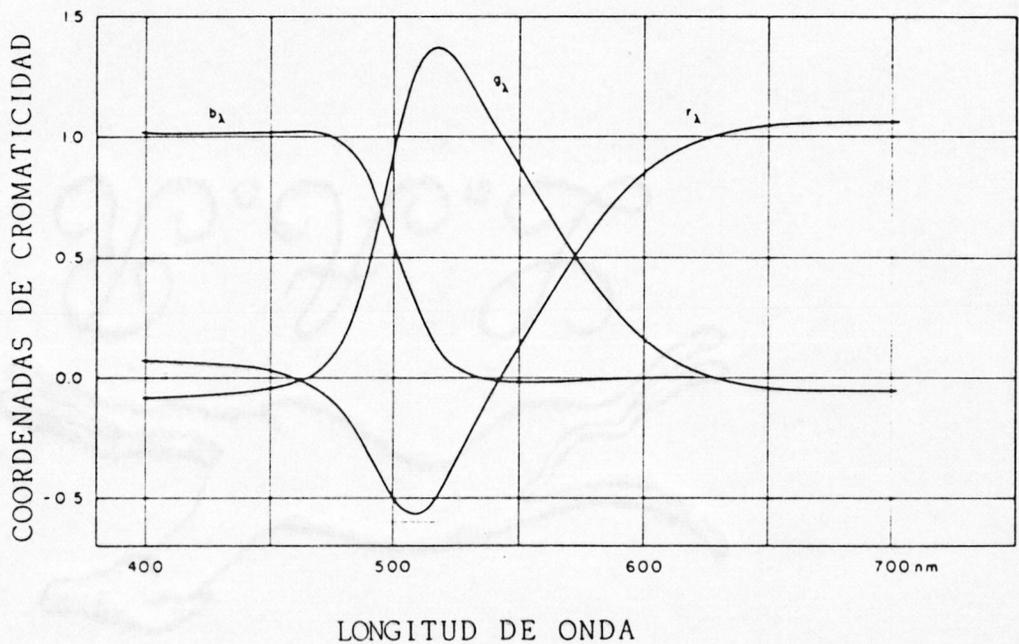


Figura 1.1.b. Resultados de Guild en la medida de las coordenadas de cromaticidad de colores espectrales para la determinación de las funciones de mezcla.

que permiten obtener los valores triestímulo correspondientes al nuevo conjunto de primarios (R',G',B') en función de los antiguos (R,G,B) mediante los coeficientes de transformación a_{ij} establecidos en base a los primarios elegidos y a ciertos convenios de transformación.

En la siguiente tabla se presentan los tres conjuntos de primarios referidos:

	<u>R</u>	<u>G</u>	<u>B</u>
Wright	460 nm	530 nm	650 nm
Guild	460 nm	543 nm	630 nm
CIE	435.8 nm	546.1 nm	700 nm

En las figuras 12.a, 12.b y 12.c se muestran las funciones de mezcla obtenidas por ambos autores y las adoptadas por la C.I.E. en 1931 como observador patrón para campos visuales no superiores a 4° y nivel de iluminación fotópico. Las diferencias en factores de escala entre las dos primeras y la última son debidas a que se han referido a unidades diferentes.

El sistema de representación RGB presenta el inconveniente de que aparecen colores cuyas coordenadas son negativas, lo cual a veces dificulta los cálculos colorimétricos y, lo que es más importante, no contempla la posibilidad de evaluación directa de la función de eficiencia luminosa V_λ . Ello condujo a la adopción del sistema de representación XYZ, de coordenadas (x,y,Y) que evita ciertos problemas, de un lado tomando un conjunto de primarios irreales, resultantes de una transformación lineal a partir de los R,G,B, y por otro haciendo que una de las funciones de mezcla, la \bar{y}_λ , sea igual a V_λ .

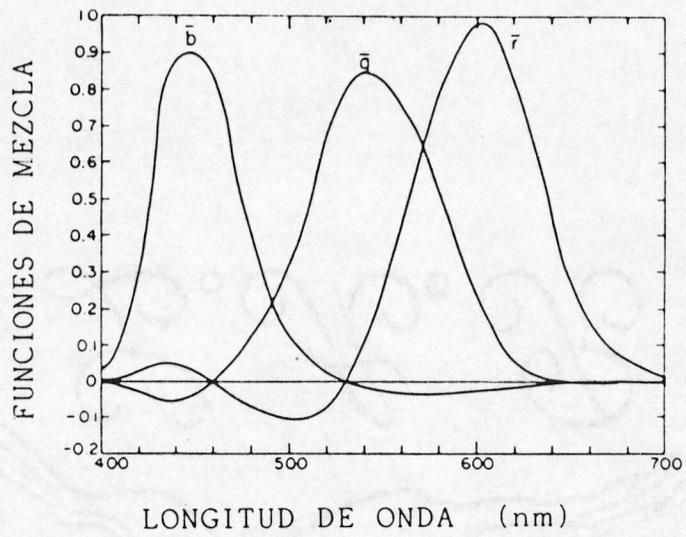


Figura 1.2.a Funciones de mezcla obtenidas por Wright.

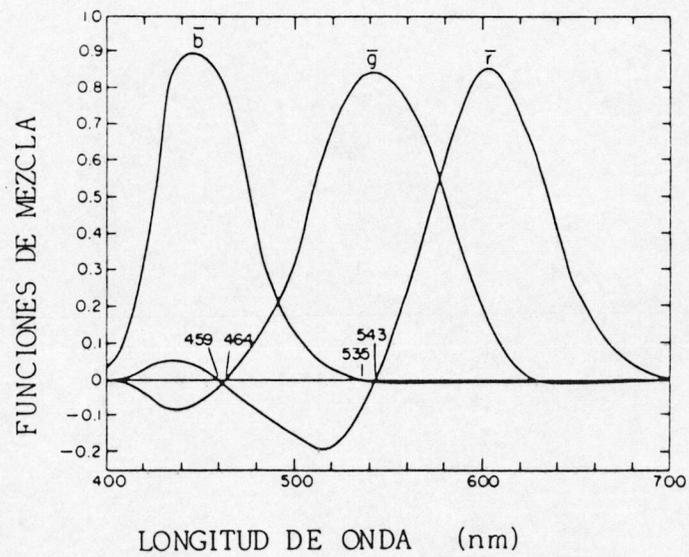


Figura 1.2.b. Funciones de mezcla obtenidas por Guild.

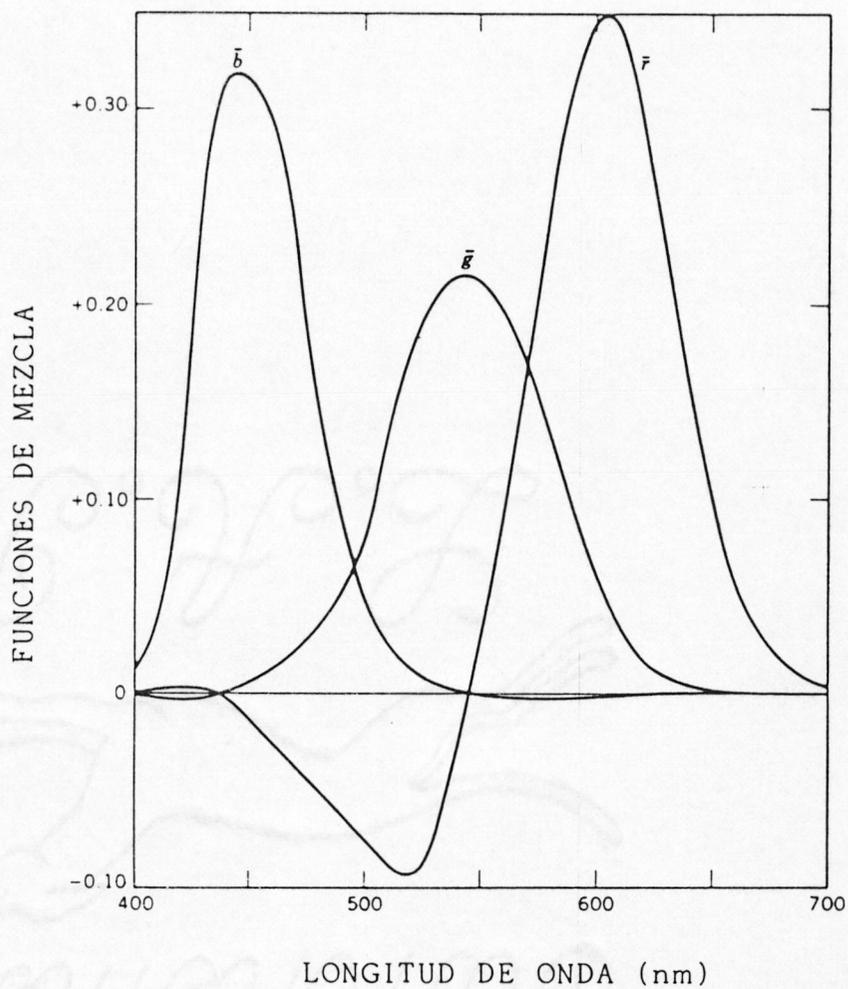


Figura 1.2.c. Funciones de mezcla correspondientes al observador patrón psicofísico CIE-1931, en el sistema RGB.

En la figura 1.3 se presentan las funciones de mezcla \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ , del observador patrón CIE-1931 recomendado para campos visuales no superiores a 4°, visión foveal y nivel fotópico de iluminación. En ellas se puede observar un incremento de la sensibilidad en la zona del espectro visible correspondiente a longitudes de onda cortas.

En este sistema de representación del color, las coordenadas se calculan mediante las ecuaciones:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$Y = Y$$

donde:

$$X = k \int L_{e\lambda} \bar{x}_\lambda d\lambda$$

$$Y = k \int L_{e\lambda} \bar{y}_\lambda d\lambda$$

$$Z = k \int L_{e\lambda} \bar{z}_\lambda d\lambda$$

proporcionando las coordenadas x e y la información sobre la cromaticidad de un determinado color y la Y sobre la magnitud fotométrica.

Con relación a la constante k que interviene en las expresiones de los valores triestímulo, hemos de indicar que, si bien el valor de las coordenadas de cromaticidad es independiente

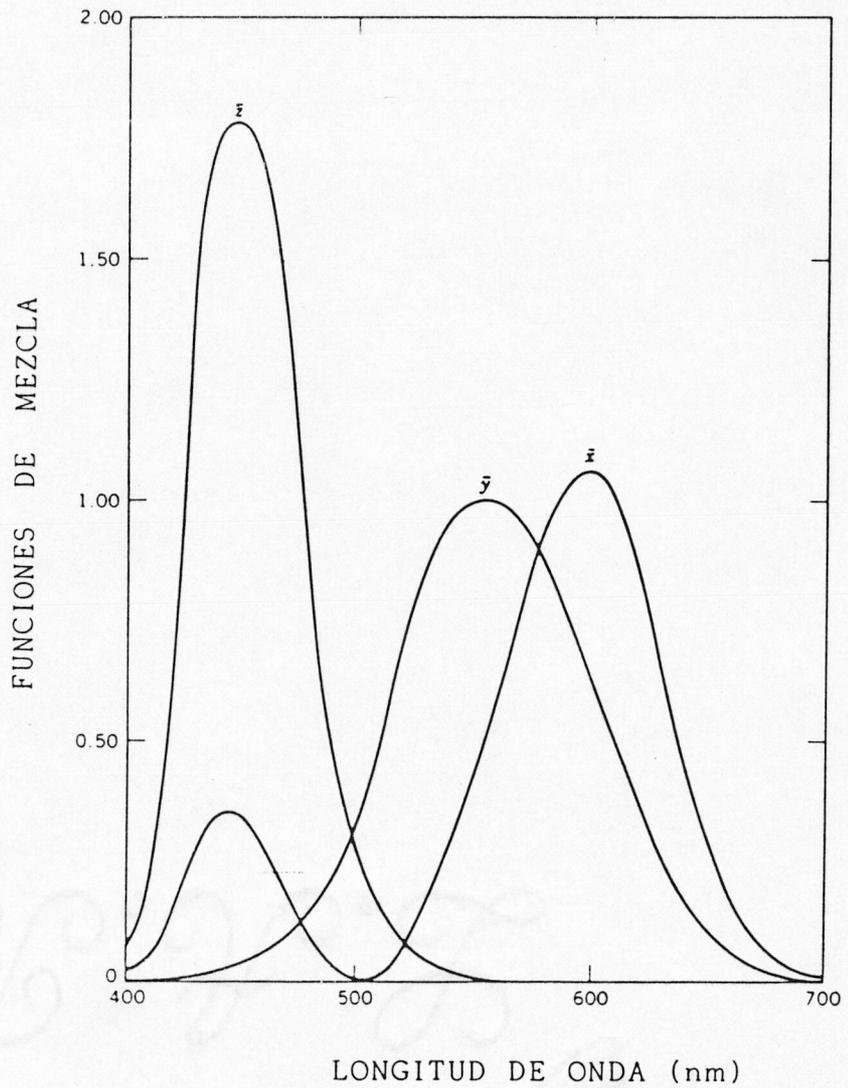


Figura 1.3. Funciones de mezcla del observador sicofísico CIE-1931 en el sistema XYZ.

de ésta, toma un valor igual a 683 lm/w cuando se está interesado en obtener magnitudes fotométricas absolutas. Normalmente en el tipo de investigación que nos ocupa se suele tomar el valor unidad dado que las magnitudes fotométricas se indican con valores relativos.

La evaluación de las integrales que proporcionan los valores triestímulo se realiza, a partir de los datos experimentales obtenidos en la medida de la radiancia espectral relativa $L_{e\lambda}$ mediante cálculo numérico en la forma:

$$X = \sum_{380}^{760} L_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda$$

$$Y = \sum_{380}^{760} L_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda$$

$$Z = \sum_{380}^{760} L_{e\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda$$

donde $\Delta\lambda$ no es un factor multiplicativo dentro del sumatorio, sino que simboliza el intervalo en variaciones de longitud de onda seleccionado en la medida de $L_{e\lambda}$. En nuestro caso, ateniéndonos a las normas UNE, se ha tomado $\Delta\lambda = 10$ nm.

1.2.3 IGUALACIONES DE COLOR

Los métodos más avanzados en el campo de la Colorimetría y que han producido el desarrollo de técnicas de gran interés, tanto desde un punto de vista científico como técnico, tienen como base el establecimiento de igualaciones de color, si bien en este sentido se plantean algunos problemas como se comentará posteriormente.

El primer aspecto a abordar cuando se efectúa una igualación es su carácter de partida, en cuanto a composición de distribuciones espectrales se refiere, de las luces en cuestión que intervienen en ellas. En este sentido se han de diferenciar básicamente dos tipos de igualaciones:

a) Igualaciones isómeras.-

Cuando dos colores son igualados de manera que se verifica:

$$\begin{aligned}
 \int L'_{e\lambda} \bar{x}_\lambda d\lambda &= \int L''_{e\lambda} \bar{x}_\lambda d\lambda \\
 \int L'_{e\lambda} \bar{y}_\lambda d\lambda &= \int L''_{e\lambda} \bar{y}_\lambda d\lambda \\
 \int L'_{e\lambda} \bar{z}_\lambda d\lambda &= \int L''_{e\lambda} \bar{z}_\lambda d\lambda
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

con $L'_{e\lambda} = L''_{e\lambda}$ se dice que la igualación es isómera, es decir ámbos poseen idénticas distribuciones energéticas espectrales y resulta, en este caso, relativamente fácil la determinación de las proporciones con que se han de mezclar los primarios. Este tipo de igualación es la que industrialmente supone un menor coste económico, Saltzman y Keay (1967) y la más viable para obviar algunos de los problemas de metamerismo que en muchos casos son difíciles de evitar y que son objeto parcial de esta memoria. Asimismo han sido ampliamente empleadas en investigaciones dentro del área que nos ocupa, McAdam (1942), Brown y McAdam (1949), Crawford (1970), Wyszecki y Fielder (1971), Hita y Jiménez (1980).

b) Igualaciones metámeras.-

Se puede afirmar que el problema básico de la Colorimetría radica en el hecho de que no existen relaciones o correspondencias biunívocas entre los espacios psicológico, físico y psicofísico del color. Es decir, mientras que para el espacio físico la relación es unívoca con el de las sensaciones de color, correspondiendo a cada composición espectral una y solo una sensación, la inversa no es cierta. Esto implica que tampoco existe una relación biunívoca entre el espacio físico y el psicofísico que evalúa los estímulos de color de acuerdo con la sensación producida, Alvarez-Claro et al (1976-78).

En definitiva, las coordenadas que representan un punto en el diagrama cromático pueden ser obtenidas a partir de diferentes composiciones espectrales, lo que se traduce en el mantenimiento de las ecuaciones anteriores a pesar de ser $L'_{e\lambda} \neq L''_{e\lambda}$. A esta propiedad se le denomina metamerismo e igualaciones metámeras aquellas que verifican tal igualación.

Una descripción más detallada de los diferentes tipos de igualaciones metámeras, según las variaciones de los factores que intervienen en los valores triestímulo y que hacen que éstos puedan seguir teniendo iguales valores, se hará en el siguiente capítulo de la presente memoria.

1.3 COLORIMETRIA DIFERENCIAL

Bajo el punto de vista tanto científico como técnico, a veces ofrece más interés la evaluación de diferencias entre colores, o de éstos respecto a un color patrón, que la medida en sí de un color. Se plantea pues, una doble necesidad: cuantificar estas diferencias y hacerlas predecibles en un sistema de representación del color, lo que es tanto como conocer la métrica del espacio de color o el elemento de línea asociado a ella.

Tradicionalmente se han abordado estos problemas partiendo de la medida experimental de diferencias de color, entendidas como "mínimas diferencias perceptibles" o, en general, de los umbrales diferenciales de color para una posterior generalización del elemento de línea, ds , que satisfaga la predicción de dichos resultados experimentales. En este sentido y, si bien a veces ha surgido la polémica aún no resuelta, Wyszecki (1972-b), sobre si hay diferencias entre los criterios de perceptibilidad y aceptabilidad de diferencias de color, la mayoría de los estudios en los que se basa la Colorimetría Diferencial hasta la fecha, optan por criterios de evaluación de diferencias perceptibles cuando se ha de proponer el elemento de línea asociado a la métrica del espacio. Es de notar, que si el estudio de diferencias de color es un problema científico, el establecimiento de tolerancias es, casi siempre, eminentemente técnico.

Los primeros resultados experimentales aportados en este campo fueron los obtenidos a partir de las medidas realizadas por Judd (1933), Priest y Brickwedde (1938) que determinaron los umbrales de pureza colorimétrica para luces monocromáticas y Wright y Pitt (1934) que lo hicieron en longitudes de onda.

Wright (1941) fué el primer autor que aborda el estudio

de diferencias de color en el espacio cromático en su conjunto, determinando los umbrales diferenciales en distintas direcciones del diagrama cromático. Sus resultados se muestran gráficamente en la figura 1.4 donde se puede observar una característica importante del sistema de representación CIE-1931 consistente en la falta de uniformidad, apareciendo notables variaciones en el tamaño de las mínimas diferencias perceptibles para las diferentes tonalidades estudiadas.

Posteriormente se plantea la necesidad de no restringir el estudio a "umbrales de línea" y abordar qué ocurre cuando se compara un color de referencia con otros situados alrededor de él pero en distintas direcciones del diagrama cromático. En base a esta idea surge el trabajo de McAdam (1942), realizando este estudio para un solo observador y adoptando un método experimental con el cual el propio observador realizaba las igualaciones de color en un campo fotométrico bipartito, mediante su actuación sobre los mandos que regulaban un colorímetro visual. La mayor aportación del trabajo de McAdam reside principalmente en la adopción de la elipse como representación geométrica del umbral diferencial de cromaticidad, a partir de cálculos teóricos con los resultados experimentales. Sus resultados se muestran en la figura 1.5 (ampliados en un factor 10 para su mejor visualización gráfica sobre el diagrama cromático x-y).

Los resultados de este autor sentaran la base a partir de la cual se han tomado criterios en el establecimiento técnico de tolerancias de color. Un estudio similar, ampliado en el sentido de introducir la variable luminancia, en la determinación del umbral diferencial de cromaticidad fué realizado por Brown y McAdam (1949).

La adopción de la elipse y elipsoide como representación geométrica de los umbrales de cromaticidad y color respectiva-

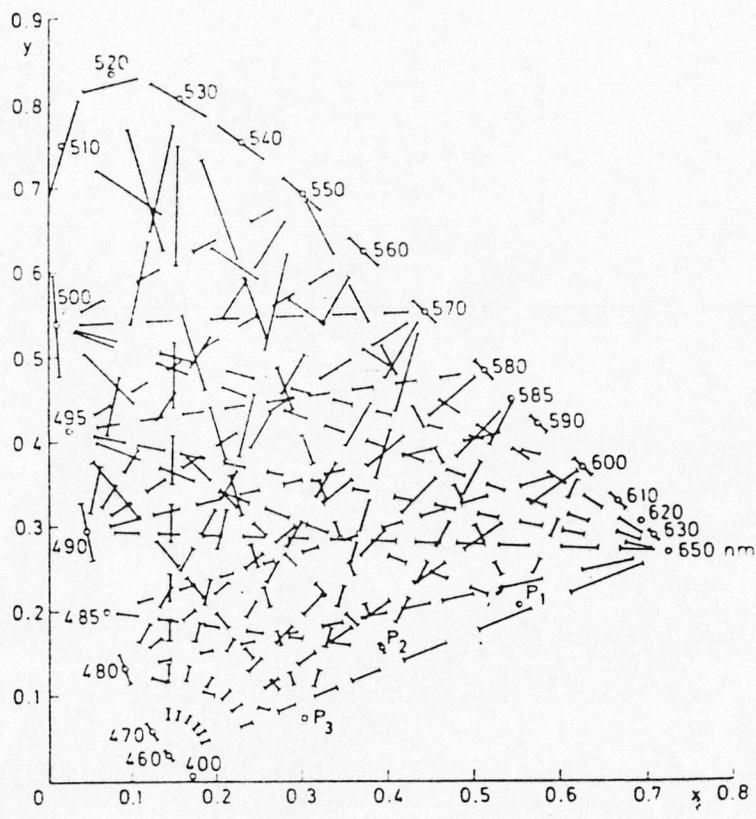


Figura 1.4. Resultados obtenidos por Wright en la medida de "umbrales de línea".

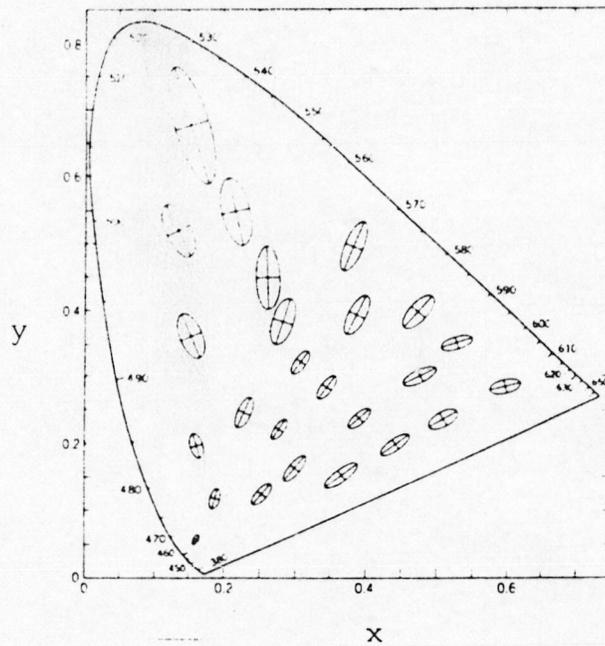


Figura 1.5. Resultados experimentales de McAdam (1942)

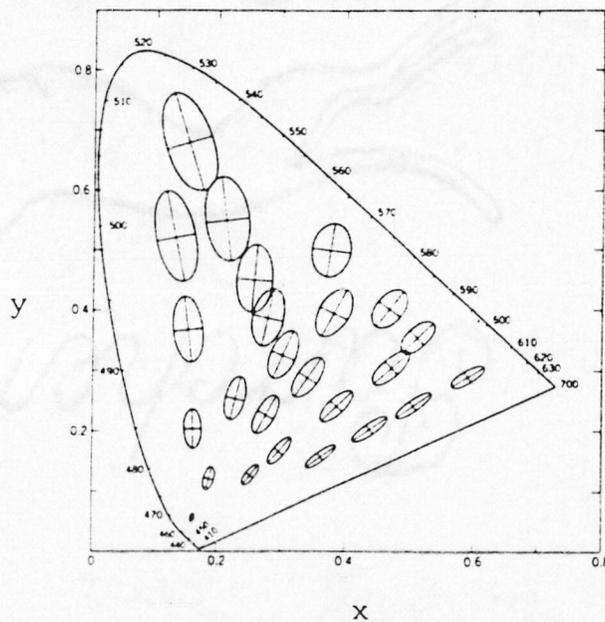


Figura 1.6. Resultados predichos con el elemento de línea, ds , propuesto por Stiles (1946).

mente, cuestión bajo la que subyace la asociación de un espacio de Riemann al espacio de color, en los resultados de McAdam, no ha dejado de suscitar polémicas aún no resueltas. En este sentido han aportado datos los trabajos realizados por LeGrand (1970), Crawford (1970), Parra (1970), Wyszecski y Fielder (1971), Hita et al (1982-b), Hita et al (1984). No obstante, dicha representación geométrica es el punto de referencia de casi la totalidad de los trabajos realizados hasta la fecha y su adopción permite realizar comparaciones de los resultados obtenidos por diferentes autores además de haber supuesto un buen criterio bajo el punto de vista técnico e industrial en el establecimiento de tolerancias de color, como se ha indicado anteriormente. En cualquier caso, siempre se han de tener presentes las limitaciones que esta representación posee, a fin de no aceptar como definitivas algunas conclusiones relacionadas con la métrica del espacio de color.

Junto al problema de la métrica aparece el de la uniformidad de dicho espacio. En este sentido otro de los objetivos de la Colorimetría Diferencial es la obtención de un sistema de representación en el que las distancias entre estímulos de color se correspondan con las diferencias reales de las sensaciones que éstos producen. Ello equivale a obtener un sistema de representación donde los umbrales sean iguales en tamaño y forma para cualquier punto del mismo.

Estos dos objetivos, que convergen en uno, han sido abordados hasta ahora bajo dos puntos de vista: uno inductivo y otro puramente empírico. En el primero se engloban todos aquellos trabajos que han propuesto un elemento de línea teórico como representativo del elemento de línea del espacio de color.

Exponemos resumidamente algunos de los trabajos realizados en este sentido, si bien algunos más por motivos históricos que por su interés actual. Así, el primer elemento de línea

fué 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 viene 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 factores de peso para los primarios:

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

La adecuación de los resultados predichos por Stiles a los datos experimentales puede visualizarse comparando los umbrales diferenciales de cromaticidad calculados a partir del elemento de línea, con los medidos por McAdam, y que se presentan en la figura 1.6.

Se han propuesto otros elementos de línea más recientemente que pretenden contemplar algunos aspectos de modelos teóri-

cos de la visión del color. Tal es 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 métodos de tipo empírico, son muchos los trabajos que se han elaborado a partir del de McAdam (1942), que tratan de determinar para distintos puntos del diagrama cromático, bajo condiciones experimentales diversas, el valor de las diferencias cromáticas. En este sentido cabe resaltar el estudio realizado por McAdam (1943-1944) calculando el valor de los coeficientes g_{ik} del elemento de línea del espacio de Riemann:

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

Otros autores como Krystek y Erb (1980) han propuesto recientemente algoritmos para la transformación a espacios euclídeos ($g=1$ si $i=k$ y $g=0$ si $i \neq k$) sin más que conocer las expresiones de los coeficientes g_{ik} en función de las coordenadas de cromaticidad, pero la aplicación de estos estudios está sujeta a las limitaciones descritas en la métrica.

Por otra parte, tal como se ha indicado muchos han sido los intentos de obtención de un sistema uniforme de representación del color. En este sentido se pueden diferenciar dos aspectos del problema. Uno que hace referencia a la obtención de atlas de color, en los que la ordenación de los colores atiende a un sistema de escalones de igual diferencia perceptible. El ejemplo más interesante, por su utilidad y extendido uso, es

el atlas de Munsell, si bien otros como el de Ostwald y DIN están también bastante difundidos. La ordenación de colores en estos sistemas se realiza según 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 (x, y, Y) que pretenden conseguir un espacio de color euclídeo y, como consecuencia de ello, evaluar las diferencias de color en los nuevos espacios.

En esta memoria haremos mención a tres de estos sistemas, que han sido también adoptados para la representación de los resultados, y que son el sistema UCS-CIE 1960, CIELUV (1976) y CIELAB (1976). Estos dos últimos son objeto de actuales estudios a fin de verificar su adecuación a los problemas científicos y técnicos. En este sentido, se pueden mencionar los trabajos de Pointer (1981) y Kuehni (1982), donde se analizan gran parte de los resultados experimentales clásicos de la Colorimetría Diferencial en los nuevos sistemas propuestos.

A continuación se formulan las transformaciones que definen estos sistemas de representación a partir de los valores triestímulos X,Y,Z, del CIE-1931.

- UCS-CIE 1960

$$U = 2X/3$$

$$V = Y$$

$$W = -0.5 X + 1.5 Y + 0.5 Z$$

escribiéndose las coordenadas de cromaticidad u,v en función de las x e y del CIE-1931 como:

$$u = 4x / (-2x+12y+3)$$

$$v = 6y / (-2x+12y+3)$$

- CIELUV

$$u^* = 13 L^* (u - u_0)$$

$$v^* = 13 L^* (v - v_0)$$

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

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

donde u_0 y v_0 son los valores de u y v correspondientes al estímulo acromático en el sistema UCS-CIE 1960.

- CIELAB

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

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

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

$$L^* = 903.3 (Y/Y_0) \quad \text{si } (Y/Y_0) \leq 0.008856$$

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

$$f(\) = 7.787 (\) + 16/116 \quad \text{para}$$

$$(\) \leq 0.008856$$

siendo X_0 , Y_0 y Z_0 los valores triestímulos correspondientes al estímulo acromático que se utilice en el sistema CIE-1931.

2. PLANTEAMIENTO GENERAL

2.1 METAMERISMO

Una de las definiciones más ampliamente aceptadas sobre el concepto de colores metámeros ha sido la propuesta por Judd y Wyszecki (1975), según la cual: "Estímulos metámeros de color son aquellos que teniendo diferentes distribuciones energéticas espectrales producen la misma sensación de color bajo las mismas condiciones de observación".

Actualmente la definición de metamerismo y colores metámeros se encuentra sometida a revisión, pero ello no en un sentido conceptual sino más bien en cuanto a precisión de su terminología en base a las diferentes situaciones prácticas que se presentan en la industria y que pueden originar ciertas confusiones, Rodrigues y Besnoy (1980). En este sentido son de considerar los recientes trabajos realizados por Rodrigues y Besnoy (1980), Billmeyer (1983), Robertson (1983), Kuehni (1983), los cuales están siendo la base de planteamiento para establecer una terminología más precisa en el Comité de Índices de Metamerismo de la I.S.C.C. (Inter-Society Color Council).

Independientemente de ello son varios los tipos de metametamismo que se pueden presentar en las igualaciones colorimétricas, los cuales pasamos a describir a continuación sirviéndonos de la sistematización que supone la representación de un color en el sistema CIE-1931.

Como se desprende de apartados anteriores, la especificación del color en el sistema C.I.E. se basa en considerar una fuente luminosa, un objeto y un observador. La fuente luminosa está caracterizada por su radiancia espectral, pero desde el punto de vista de energía recibida por el objeto es más interesante considerar la irradiancia espectral E_λ .

El objeto refleja, o transmite dependiendo de los casos, parte de la energía recibida y según las condiciones de iluminación y observación queda perfectamente definido por su reflectancia espectral direccional ρ_λ , o transmitancia τ_λ , en su caso.

El observador está caracterizado por sus funciones de mezcla de colores y en este sistema se adoptan las \bar{x}_λ , \bar{y}_λ y \bar{z}_λ , referidas anteriormente, como resultado promedio de un conjunto de observadores.

De esta manera, los valores triestímulos que permiten medir el color y caracterizar la respuesta del observador se pueden expresar como:

$$\begin{aligned}
 X &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} & \text{ó} & & X &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \\
 Y &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} & \text{ó} & & Y &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \\
 Z &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} & \text{ó} & & Z &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \bar{z}_{\lambda}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Una igualación metámera o lo que es igual, un par metámero de colores será aquel que satisface:

$$X' = X'' \quad ; \quad Y' = Y'' \quad ; \quad Z' = Z''$$

donde esta igualdad se cumple a pesar de las diferencias existentes en los factores que intervienen en cada uno de los términos de los sumatorios que expresan los valores triestímulos.

En este sentido se suele hablar de un par metámero de objetos cuando se verifican las igualaciones anteriores para un iluminante al menos, a pesar de ser diferentes sus curvas de reflectancia espectral $\rho'(\lambda)$ y $\rho''(\lambda)$, cumpliéndose:

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda} (\rho'_{\lambda} - \rho''_{\lambda}) E_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} &= 0 \\ \sum_{\lambda} (\rho'_{\lambda} - \rho''_{\lambda}) E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} &= 0 \\ \sum_{\lambda} (\rho'_{\lambda} - \rho''_{\lambda}) E_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} &= 0 \end{aligned}$$

La afirmación anterior de "un iluminante al menos" tiene bastante importancia ya que puede suceder que el par de objetos metámeros, dejen de ser percibidos iguales en color cuando cambia el observador o cuando son examinados bajo otro iluminante diferente; en la figura 2.1 se presenta un ejemplo de cuatro muestras que obedecen a este tipo de metamerismo.

Evidentemente este es uno de los problemas básicos con que se enfrenta la Colorimetría en sus aplicaciones industriales

y el metamerismo al que obedece ha sido objeto del más amplio estudio en la literatura siendo destacables los trabajos realizados por Wyszecki (1960) y Stiles y Wyszecki (1962). Puesto que en principio serían infinitas las diferentes combinaciones que se pueden obtener, variando las reflectancias espectrales de los objetos, que verifiquen las ecuaciones anteriores, algunos autores han desarrollado una serie de métodos estadísticos para la generación de funciones de reflectancia que produzcan pares metámeros bajo diferentes iluminantes y se han calculado sus límites teóricos, obteniéndose así una amplia base de datos en cuanto a posibilidades de partida en las igualaciones de color, Takahama y Nayatani (1972 a-b), Otha y Wyszecki (1975), Schmitt (1976-1977).

Otro de los factores que puede originar la obtención de igualaciones metámeras es el relacionado con el tipo de fuente luminosa que se utilice al iluminar dos objetos de las mismas características, dando lugar a la definición matemática de iluminantes metámeros, según la cual:

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda} E'_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} &= \sum_{\lambda} E''_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \\ \sum_{\lambda} E'_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} &= \sum_{\lambda} E''_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \\ \sum_{\lambda} E'_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} &= \sum_{\lambda} E''_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \end{aligned}$$

Análogamente al caso anterior, cuando se cambia la muestra lo más probable es que desaparezca la igualdad, estando ello de alguna forma relacionado con el rendimiento en color de las fuentes luminosas empleadas y la constancia del mismo, Kuehni (1977), Nayatani y Takahama (1977), CIE (1974), Haldstead (1978).

También se puede presentar el metamerismo como una com-

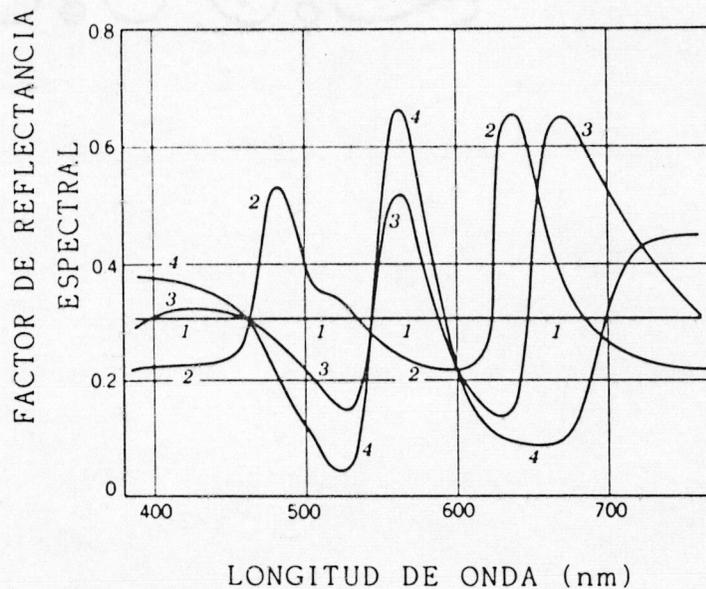


Figura 2.1. Factor de reflectancia espectral de cuatro muestras hipotéticas que poseen los mismos valores triestímulo, cuando son iluminadas con el iluminante D_{65} , respecto al observador CIE-1931.

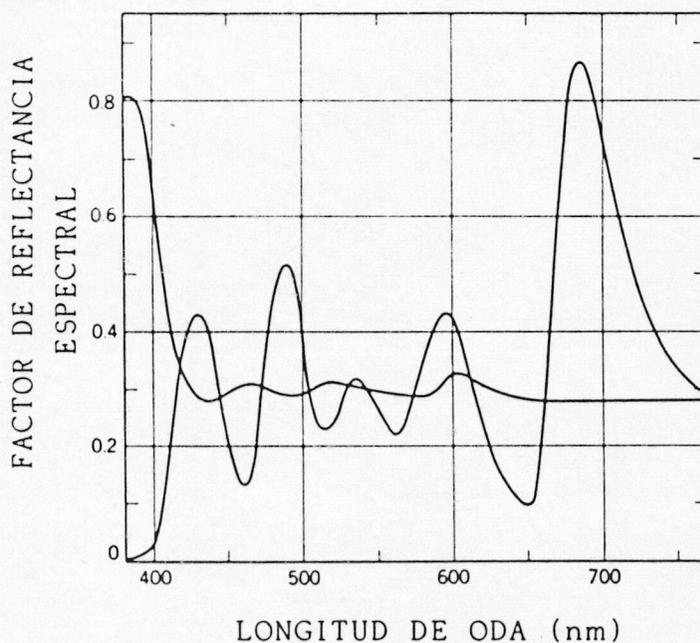


Figura 2.2 Factor de reflectancia espectral de dos muestras hipotéticas que poseen el mismo color tanto cuando son iluminadas por una lámpara de incandescencia como por luz diurna, respecto al observador CIE-1931.

binación de los dos casos anteriores. Un ejemplo de este tipo se ilustra en la figura 2.2 donde se muestran las curvas de reflectancia de dos muestras hipotéticas y que resultan metámeras tanto bajo iluminación con luz diurna media como bajo una lámpara de incandescencia.

Por último se puede considerar la definición matemática de observadores metámeros en la forma:

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{x}'_{\lambda} &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{x}''_{\lambda} \\ \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{y}'_{\lambda} &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{y}''_{\lambda} \\ \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{z}'_{\lambda} &= \sum_{\lambda} E_{\lambda} \rho_{\lambda} \bar{z}''_{\lambda} \end{aligned}$$

De este caso es difícil encontrar ejemplos referidos a la actuación del ojo humano como observador. Sin embargo, generalizando este concepto a cualquier receptor y los instrumentos que los llevan como observadores, entonces sí es fácil encontrar ejemplos de observadores metámeros. Un colorímetro fotoeléctrico puede calibrarse de modo que para una cierta muestra de color bajo un iluminante dé los mismos valores triestímulos que otro instrumento tomado como referencia. Si al cambiar la muestra los valores triestímulos en el primer aparato son diferentes a los del segundo estamos en un caso de metamerismo de observadores. Los fabricantes de instrumentos tratan de evitar este tipo de metamerismo, Alvarez-Claro (1971).

Todo el tratamiento aquí descrito es equivalente para objetos transparentes sin más que sustituir la reflectancia espectral ρ_{λ} por la transmitancia espectral τ_{λ} de los objetos de color.

Cuando no se trata de objetos de color sino de manantiales luminosos, las ecuaciones (2.1) toman la forma:

$$\begin{aligned}
 X &= \sum_{\lambda} L_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda} \\
 Y &= \sum_{\lambda} L_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda} \\
 Z &= \sum_{\lambda} L_{e\lambda} \bar{z}_{\lambda}
 \end{aligned}$$

donde $L_{e\lambda}$ es la radiancia espectral de la fuente luminosa de color. Este es el caso que atañe a los colorímetros visuales y en él solo se presentan, lógicamente, los tipos de metamerismo debido a las fuentes luminosas y observadores, o una combinación de ambos.

2.2 INDICES DE METAMERISMO

La mayoría de los problemas prácticos que se presentan en las aplicaciones industriales colorimétricas, así como en la propia Ciencia del Color, a veces exigen el empleo de colores metámeros y consecuentemente se plantea la necesidad de cuantificar las diferencias en composiciones espectrales, o en definitiva, evaluar el grado de metamerismo de los mismos.

Con tal propósito Judd y Wyszecki (1963) proponen que "el grado de metamerismo de una diferencia metamérica de dos objetos dados, que deben ser iguales, para una combinación dada de flujo incidente y observador, está evaluado por la suma de dos diferencias de color entre los objetos calculados para la combinación de referencia y otra adecuada expresada en términos de una unidad conveniente de medida".

De esta forma se refiere el grado de metamerismo a unas condiciones patrón a través de una tercera composición espectral que sirve de test.

Este grado de metamerismo es el más empleado en los casos de metamerismo de objetos descrito anteriormente, habiéndose propuesto la C.I.E. (1972) un índice especial para su medida cuando cambia el iluminante. Para ello recomienda la adopción del iluminante D_{65} como iluminante patrón de referencia, el iluminante A como iluminante-test patrón y como observadores patrón de referencia el CIE-1931 o bien el CIE-1964. Así, si dos objetos tienen los mismos valores triestímulos respecto al iluminante D_{65} y observador CIE, el índice de metamerismo será igual al índice ΔE que mide las diferencias de color que aparecen entre ambos cuando son observados bajo el iluminante A, utilizando para ello cualquiera de las fórmulas usuales de medida de diferencias de color, o sea :

$$\Delta E_{LUV} = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{ó}$$

$$\Delta E_{LAB} = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

De forma similar se ha considerado otro índice especial de metamerismo, por el comité de Colorimetría de la C.I.E., referente a cambios de observador y que permite medir las diferencias de cromaticidad que aparecen en los objetos metámeros de color cuando son examinados bajo las condiciones del observador patrón CIE-1931 o las del CIE-1964. El procedimiento para su determinación es similar al del índice especial para cambios de iluminante.

En este sentido resulta de especial interés el reciente trabajo de Billmeyer (1980) en que plantea la similitud o equivalencia de resultados en diferencias de color cuando en objetos metámeros cambia el iluminante o bien el observador.

Es de uso frecuente la obtención de pares metámeros de color referidos al observador patrón CIE-1931 ó CIE-1964 como resultado promedio de la determinación de las funciones de mezcla sobre un conjunto de individuos . Ello conlleva la existencia de una serie de desviaciones en las funciones de mezcla de un observador real (generalmente desconocidas, Lozano (1978), Nimeroff (1965)) respecto al observador patrón, que se traduce en la aparición de una diferencia metamérica debido a estas desviaciones. Allen (1969) propone la definición de un índice especial de metamerismo de observador que permita evaluar estas diferencias que aparecen respecto al observador patrón. Para ello parte de las funciones de mezcla determinadas para el conjunto de individuos que se emplearon en el establecimiento del observador CIE-1964, Stiles y Burch (1959), y calcula sus desviaciones a partir de las cuales propone un "observador patrón de desviación".

Strocka (1977) plantea la posibilidad de especificar un índice de metamerismo también para observadores, pero calculado a partir de los valores medios de los índices que evalúan las diferencias metaméricas de un conjunto de observadores. Encuentra una buena correlación entre la media del conjunto y el valor medio de los índices de dos observadores, por lo que concluye que la selección de dos observadores es suficiente para caracterizar, en la práctica, el metamerismo de observador. Posteriormente, Nayatani et al (1981) han propuesto otro índice con el mismo objeto que estos dos últimos autores y para ello realizan una síntesis de los dos trabajos anteriores aunque con una técnica matemática diferente.

Recientemente se han propuesto otra serie de índices que permiten evaluar las diferencias metaméricas cuando se trabaja en condiciones de adaptación cromática constante, Berns y Billmeyer (1983), a partir de la formulación del modelo no lineal

para la adaptación cromática de Nayatani y Takahama (1981).

Los índices hasta ahora descritos se plantean en base a propósitos concretos de la medida del grado de metamerismo, evaluada en términos de diferencias de color, en unas determinadas condiciones, tanto de iluminantes como de observadores, de ahí su calificativo de "especiales". Se han definido, no obstante, otra serie de índices que permiten evaluar el grado de metamerismo de una forma más general a partir del cálculo directo de las diferencias en composiciones espectrales.

Este es el caso del grado de metamerismo propuesto por Judd y Wyszecki (1963) consistente en una cuantificación, sin más, de las diferencias en distribuciones espectrales mediante la expresión:

$$D = \left[\sum_{\lambda} (L'_{e\lambda} - L''_{e\lambda})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Los mismos autores plantean la objeción de que éstas diferencias no deben ser equi-evaluadas por no tener las funciones de mezcla igual contribución en todo el espectro visible, siendo más pequeña en los extremos del mismo. Este aspecto no lo contempla la expresión anterior y por ello proponen la trivarianza del grado de metamerismo con expresiones similares a la anterior pero en la que las diferencias son pesadas con los valores de las funciones de mezcla. De acuerdo con lo establecido el grado de metamerismo viene expresado en función de tres componentes:

$$\begin{aligned} M_x^2 &= \sum_{\lambda} \left[\bar{x}_{\lambda} (L'_{e\lambda} - L''_{e\lambda}) \right]^2 = \sum_{\lambda} \left[\bar{x}_{\lambda} \Delta L_{e\lambda} \right]^2 \\ M_y^2 &= \sum_{\lambda} \left[\bar{y}_{\lambda} (L'_{e\lambda} - L''_{e\lambda}) \right]^2 = \sum_{\lambda} \left[\bar{y}_{\lambda} \Delta L_{e\lambda} \right]^2 \\ M_z^2 &= \sum_{\lambda} \left[\bar{z}_{\lambda} (L'_{e\lambda} - L''_{e\lambda}) \right]^2 = \sum_{\lambda} \left[\bar{z}_{\lambda} \Delta L_{e\lambda} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde el grado de metamerismo es:

$$M = \left[M_x^2 + M_y^2 + M_z^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Nimeroff y Yurow (1965) plantearon un nuevo índice, partiendo del propuesto por Judd y Wyszecki, pero en el que independizan el grado de metamerismo con la magnitud radiométrica absoluta de los colores que se igualen, pues sobre todo suele interesar evaluar la diferencia relativa entre las distribuciones espectrales y poder así comparar los grados de metamerismo de igualaciones con distintos colores a pesar de tener éstos luminancias diferentes. Para ello normalizan respecto del color igualado y proponen el siguiente índice:

$$M = \left[M_x^2 + M_y^2 + M_z^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{donde}$$

$$M_x^2 = \frac{\sum [\bar{x}_\lambda \quad \Delta L_{e\lambda}]^2}{\left[\sum_\lambda \bar{x}_\lambda L'_{e\lambda} \right]^2}$$

$$M_y^2 = \frac{\sum [\bar{y}_\lambda \quad \Delta L_{e\lambda}]^2}{\left[\sum_\lambda \bar{y}_\lambda L'_{e\lambda} \right]^2}$$

$$M_z^2 = \frac{\sum [\bar{z}_\lambda \quad \Delta L_{e\lambda}]^2}{\left[\sum_\lambda \bar{z}_\lambda L'_{e\lambda} \right]^2}$$

Este nuevo índice presenta el inconveniente, Lozano (1978), de que en las igualaciones realizadas en colorímetros

visuales para la determinación de las funciones de mezcla puede presentarse para algunas componentes del grado de metamerismo el problema de que se anule el denominador, en concreto para rojos espectrales ($\bar{z}_\lambda = 0$ a partir de 650 nm).

Para obviar este problema, que solo se presentaría en casos muy concretos, y disponer de un índice que fuese independiente de la luminancia, Lozano (1978) propone como alternativa mantener las componentes de las ecuaciones (2.2) pero los $\Delta L_{e\lambda}$ que intervienen en ellas serían evaluados de la forma:

$$\Delta L_{e\lambda} = \frac{L'_{e\lambda}}{\sum_{\lambda} L'_{e\lambda}} - \frac{L''_{e\lambda}}{\sum_{\lambda} L''_{e\lambda}}$$

No obstante, como comentan Billmeyer y Saltzman (1981), el problema fundamental en el establecimiento de un índice de metamerismo es que los de tipo general, tal y como el propuesto por Nimeroff y Yurow, se basan en la especificación de las diferencias en composiciones espectrales de la igualación y no en diferencias de color, de ahí que sea imposible correlacionar la magnitud del metamerismo de una forma visual. Por el contrario, los índices especiales miden las diferencias de color cuando se destruye la igualación, no estando por tanto unívocamente definidas las relaciones entre las magnitudes que permiten evaluar el metamerismo.

2.3. PLANTEAMIENTO

Inherente a las propias bases de la Colorimetría aparece el metamerismo, cuyas características ya hemos analizado y que en la actualidad no deja de suscitar problemas en la Ciencia del Color y sus aplicaciones prácticas, llegando su importancia a plantear la necesidad de un estudio permanente y que justifica la existencia de un Comité especial en el seno de la C.I.E. dedicado al análisis del metamerismo e índices del mismo.

Por otra parte hemos de resaltar que el establecimiento de tolerancias de color y elementos de línea que predigan las diferencias del mismo, se hace en la mayor parte de los casos en base a los resultados clásicos obtenidos en esta disciplina por McAdam (1942) y posteriormente ampliados y revisados por otros autores, Brown y McAdam (1949), Wyszecki y Fielder (1971), Crawford (1970). Ello a pesar de que las diferencias mínimas perceptibles han sido determinadas por estos autores a partir de estímulos producidos por luces de color, empleando colorímetros visuales, y no superficies de color con textura como es el caso de muchas de las aplicaciones colorimétricas. Este problema ya se apuntó en el Simposio que sobre Métrica del Color se celebró en Holanda en 1971, Lozano (1978).

Pero otra consideración, a nuestro juicio igual de importante, recae en el hecho de que obviamente en la mayoría de los problemas prácticos que se presentan a veces es inevitable la realización de igualaciones metámeras y los trabajos realizados por los autores anteriores, así como la casi totalidad de los realizados hasta la fecha empleando colorímetros visuales, se han efectuado partiendo de igualaciones isómeras de color para eludir en un principio el problema que supone la ruptura de la igualación, respecto al observador patrón CIE, cuando la igualación realizada es metámera, Hita et al (1977).

Pues independientemente de que las funciones de mezcla, del observador real que efectúa la igualación, difieran de las establecidas en el observador patrón CIE, en caso de ser isómera la igualación los valores de las expresiones que proporcionan los valores triestímulo según las ecuaciones (1.1) seguirán permaneciendo iguales (igualdad que no se mantiene en caso de ser metámera la igualación). Lo dicho, si bien no resta validez a los resultados obtenidos por estos autores, sí que limita sus resultados a unas determinadas condiciones experimentales que a veces, junto al problema anterior planteado en el Simposio sobre Métrica del Color por Stiles y McAdam, no se aproximan exactamente a los problemas prácticos.

Cabe pues, plantearse la posible influencia que sobre los umbrales diferenciales de cromaticidad, a partir de las técnicas de discriminación cromática, tenga el tipo de igualación colorimétrica del que se parte en cuanto a su carácter metámero o isómero.

Sea como fuese, la base experimental de la Colorimetría Diferencial radica en el estudio de los umbrales diferenciales de color, lo que unido a la idea de que el metamerismo es el soporte de esta rama del saber, implica la necesidad de plantear un estudio experimental que trate de analizar la posible influencia que sobre la capacidad de discriminación cromática presenta el carácter isómero o metámero, y en este caso el grado de metamerismo, de las igualaciones de partida.

La idea de esta posible influencia no es nueva, de hecho un estudio previo realizado en nuestro laboratorio apuntó la posibilidad de que tal fenómeno se produjese debido a la variabilidad de los umbrales diferenciales de color encontrados al variar algunos parámetros experimentales, entre ellos el carácter de la igualación de partida, Hita y Jiménez(1980). Por

otro lado el trabajo de Nimeroff y Yurow (1965) es un claro exponente de la problemática planteada al estudiar las diferencias entre el color medido y el esperado en base al umbral de discriminación de observadores normales.

En cualquier caso es de esperar que algunas diferencias se presenten entre observadores distintos cuando se trata de experiencias que arrancan de igualaciones metámeras, Judd y Wyszecki (1975). Ello debido al carácter promedio que presentan las funciones de mezcla del observador patrón, e incluso alguna variabilidad debe esperarse entre experiencias de un mismo observador dada la multiplicidad de variables que influyen en estos procesos, Wyszecki y Fielder (1971). No obstante, y si la Colorimetría Diferencial ha de ser útil estas distorsiones no deben nunca superar el margen de error asociado a la experiencia dentro de los parámetros que se hayan fijado. Es decir, si se acepta como representativo de la capacidad de discriminación en color de un observador normal su elipsoide de error asociado con un nivel de confianza del 95%, es lógico suponer que los resultados de igualaciones realizadas por otros observadores normales, entre ellos el patrón, caigan dentro de estos límites y por supuesto las realizadas por el mismo observador. Desde luego es posible aceptar la posibilidad de aumentar el nivel al 100% pero ello no supone, de hecho, una restricción grande, e incluso el análisis de los datos debe hacerse con gran flexibilidad de criterios debido a la existencia de algunos parámetros no físicos que de alguna forma intervienen en las experiencias, Hita y Romero (1981), y que se han de tratar de promediar en su realización. Las experiencias efectuadas hasta ahora con igualaciones isómeras parecen ratificar la idea expuesta con los criterios aceptados.

En el estudio con estas condiciones experimentales se plantea pues, un primer aspecto relacionado con el hecho de

que únicamente con igualaciones metámeras es posible chequear la aplicabilidad de las funciones de mezcla del observador patrón.

En este sentido cabe comentar el estudio realizado por Nimeroff y Yurow (1965) a propósito de comprobar la posible relación entre los umbrales diferenciales de cromaticidad medidos para un conjunto de observadores, en distintas zonas del diagrama cromático, y el grado de metamerismo en cada punto estudiado, pero referidos al observador CIE-1964 con un campo de 10° . Se ponen de manifiesto, en gran parte de sus resultados, notables diferencias entre las cromaticidades predichas por el observador patrón y las igualadas por los observadores reales. Medidas similares fueron realizadas con anterioridad en el NRC (National Research Council) por Stiles y Wyszecki (1962) y pusieron de manifiesto el mismo efecto. En la figura 2.3 se pueden observar sus resultados.

Con objeto de poder predecir la cromaticidad realmente observada, estos autores examinan la posible relación entre el grado de metamerismo y los semiejes mayores de las elipses representativas del proceso de discriminación cromática, encontrando cierta correlación que pone de manifiesto un mayor grado de metamerismo en las elipses de mayor área.

Sin embargo, los grados de metamerismo que obtienen los mencionados autores resultan de la realización, mediante un colorímetro tipo Donaldson con un conjunto fijo de primarios, de igualaciones en distintos puntos del diagrama cromático, pero no ha sido estudiada la dependencia de un mismo estímulo con diferentes grados de metamerismo obtenidos al realizar las igualaciones variando la composición espectral de los primarios.

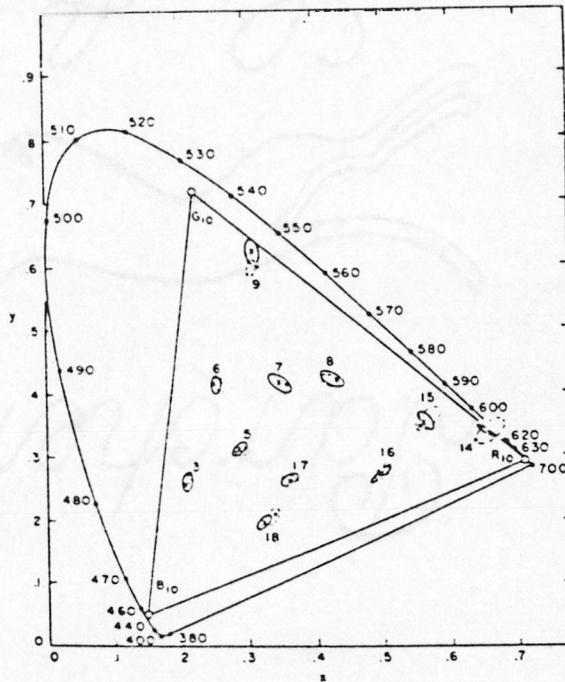


Figura 2.3

- (•) Cromaticidades predichas por el observador patrón.
- Elipses en trazo discontinuo: cromaticidades límite, pertenecientes al umbral diferencial, observadas en el NRC (Stiles y Wyszecki).
- Elipses en trazo continuo: cromaticidades límite, pertenecientes al umbral diferencial, observadas en el NBS (Nimeroff).
- (x) Media de las observaciones del NBS.

Se hace pues necesaria una revisión de la influencia que el metamerismo, en diferentes grados, presenta sobre la Colorimetría Diferencial, lo que exige que sea estudiada una selección de tonalidades representativas con diferentes igualaciones de partida.

En este sentido, el estudio realizado en la presente memoria, se plantea en base a la posible influencia que puede tener el metamerismo en la discriminación cromática pero en diferentes grados para un mismo estímulo.

Para ello se han seleccionado cinco estímulos de color que han sido estudiados con diferentes observadores y para cada uno de los colores se han efectuado cuatro igualaciones distintas, caracterizadas por las diferencias en composiciones espectrales de los primarios de color empleados en cada una de ellas.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Objeto de esta investigación es el estudio de la comparación simultánea de estímulos de color bajo las condiciones experimentales de discriminación cromática diferencial que respondan al planteamiento del problema. En este sentido, si bien los parámetros experimentales que se han fijado para el desarrollo de las experiencias serán comentados posteriormente, en el presente capítulo se describe la instrumentación utilizada que permite la producción de colores de forma que sea posible su comparación en las condiciones experimentales fijadas.

En su diseño se han tenido en cuenta las características generales de rigidez mecánica, versatilidad y fácil manejo, así como la reproducibilidad que se exige en este tipo de experiencias en cuanto a la producción de colores se refiere.

3.1. DESCRIPCION GENERAL

La figura 3.1 muestra un esquema general del dispositivo experimental. En él se pueden considerar bien diferenciadas las siguientes partes:

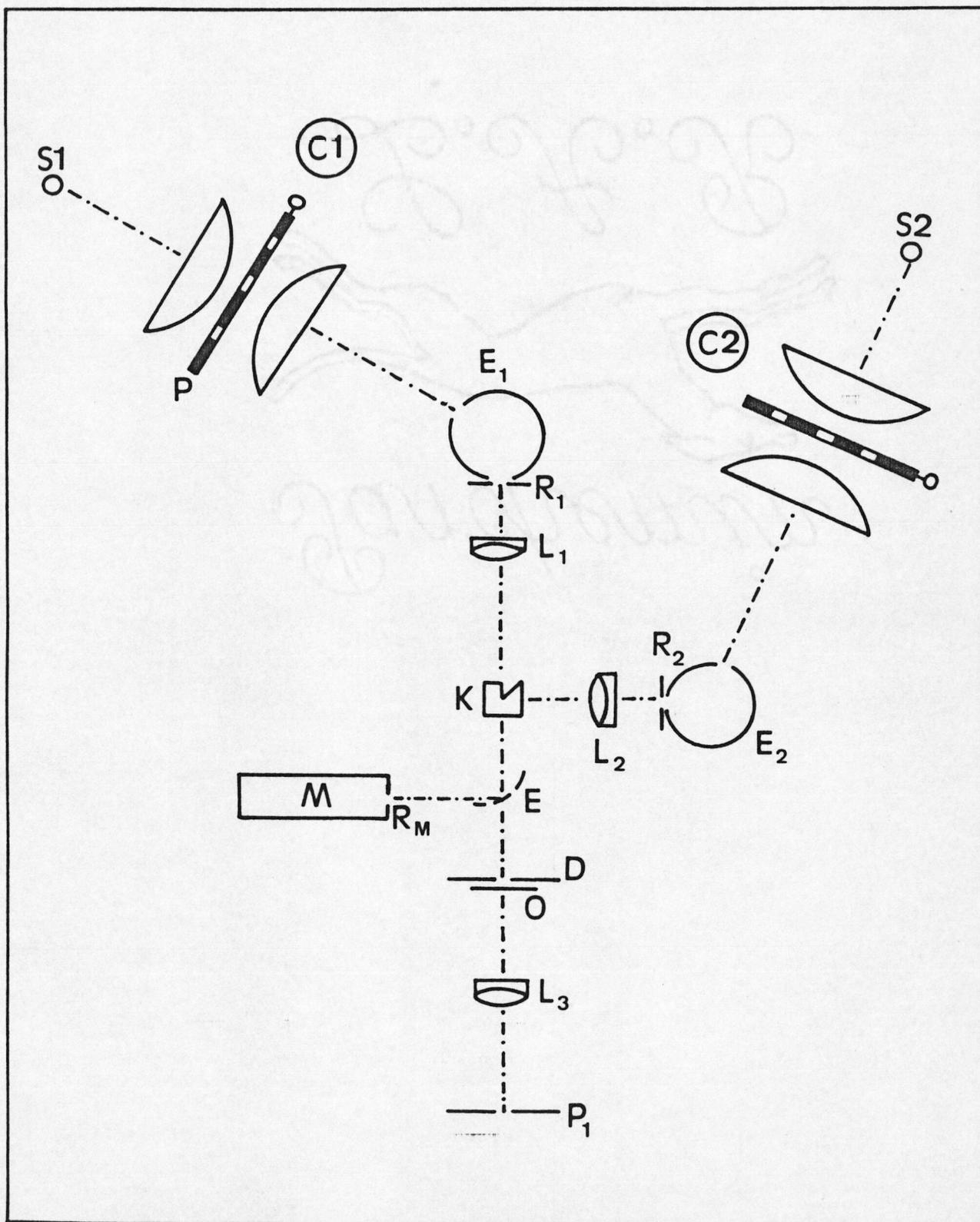


Figura 3.1 Esquema general del dispositivo experimental.

3.1.1. SISTEMA DE PRODUCCION DEL ESTIMULO VARIABLE

La obtención del estímulo de color que se ha de comparar con otro de referencia se ha realizado mediante el dispositivo que se simboliza en el esquema general como el bloque C1. Consiste esencialmente en un colorímetro visual tipo Donaldson modificado, basado en los principios de la Colorimetría tricromática, con tres primarios. Su realización se ha llevado a cabo en el taller de mecánica de la Sección de Físicas de esta Universidad.

Está constituido por una placa mecanizada de bronce fundido P, de 50 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor. En la zona central de dicha placa van situados los tres filtros de color que proporcionan los primarios del colorímetro y se han dispuesto de manera que estén centrados sobre los vértices de un triángulo equilátero. Las cavidades que alojan a dichos filtros han sido diseñadas con un perfil de doble escalón con objeto de que en uno de ellos sea posible situar filtros cuadrados de 5x5 cm y en otros filtros circulares de 5 cm de diámetro. Vista la placa de frente se aprecian tres orificios circulares de 5 cm interiores a otros tres de 7.07 cm de diámetro respectivamente. Motivos de esta disposición han sido de una parte que éstas son las mayores dimensiones comercializadas por los fabricantes, y que interesan con objeto de aprovechar el máximo flujo radiante en caso de filtros de bajas transmittancias, y de otra el poseer la máxima versatilidad en cuanto a posibilidades de intercambio de filtros, que pueden tener diversas formas geométricas y por supuesto características espectrales distintas con vistas a la obtención de diferentes grados de metamerismo para las distintas igualaciones de un mismo color de referencia.

La variación de la radiancia de cada uno de los prima-

rios se regula mediante la incorporación, a la placa portadora de filtros, de tres diafragmas variables. Dichos diafragmas se han realizado trazando sobre sendas láminas de latón, de 0.1 mm de espesor, orificios de 50 mm de diámetro. La regulación de la apertura se efectúa mediante un sistema de tracción que actúa sobre las láminas antes mencionadas, constituido por tornillos de paso de rosca de 1 mm que van solidarios a un mando de control que posee una cabeza 5 cm de diámetro dividida en diez partes; ello hace posible que sean quinientas las posibles aperturas de los diafragmas que regulan las radiancias de cada primario, obteniéndose así gran variedad y precisión en la selección de estímulos de color para un conjunto de primarios determinado. La reproducibilidad de las aperturas queda garantizada mecánicamente por la sujeción de la lámina de latón, en el extremo opuesto al mando, a un rodillo, que la mantiene presionada a la placa, el cual lleva incorporado en su interior un sistema de cojinetes y muelles de tracción. En la figura 3.2 se muestra un esquema de la placa portadora de filtros.

Esta placa queda situada entre un sistema de lentes condensadoras, de 23 cm de diámetro y 34 cm de distancia focal, en cuyo foco objeto se ha situado una fuente luminosa, S_1 , constituida por una lámpara de Iodo-Cuarzo (Sylvania FFX, 230 V, 500 W). De esta manera incide un haz de luz blanca colimado sobre el conjunto de filtros, condición ésta a tener muy en cuenta en el caso de emplear filtros interferenciales por interesar que la incidencia sobre ellos sea prácticamente normal.

Si bien los filtros están en contacto con el aire, a través de la cara exterior de la placa portadora, para evitar posibles variaciones en sus transmitancias con la temperatura, J. Juan (1974), se les ha hecho llegar una corriente de aire

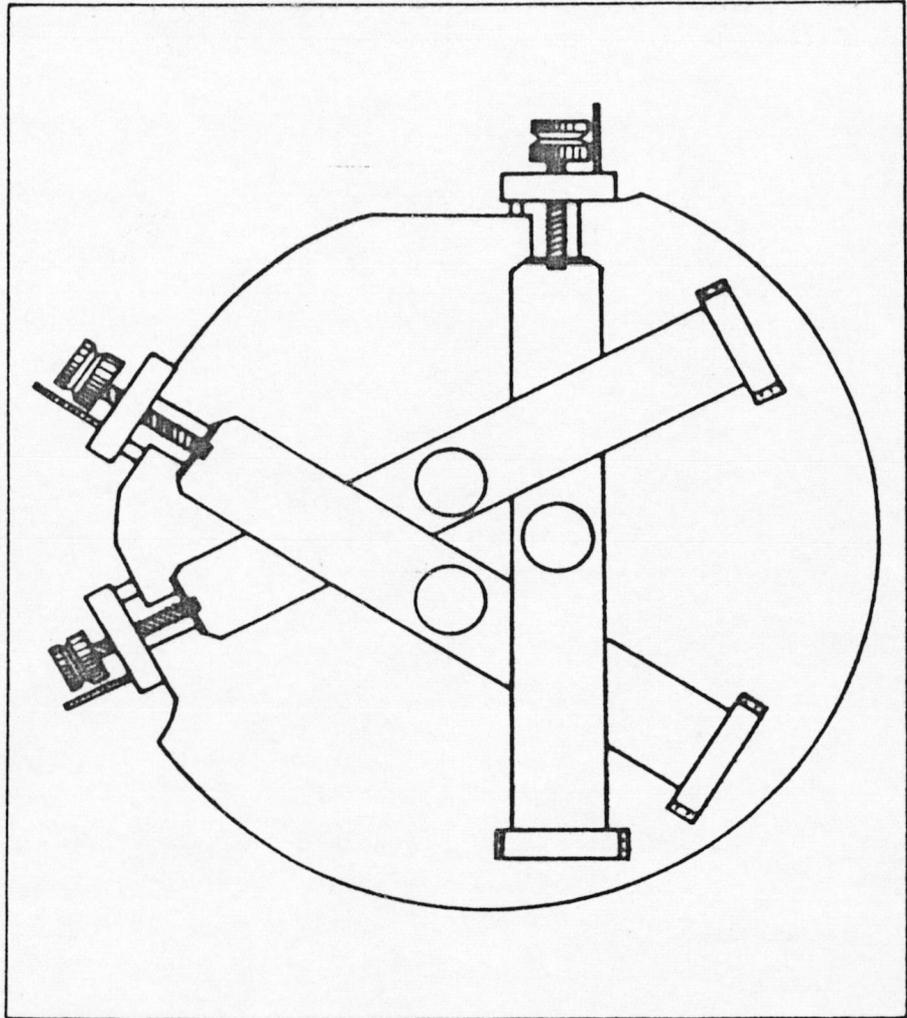


Figura 3.2. Esquema de la placa portadora de filtros y mandos de control del colorímetro productor del estímulo variable.

producida por un turboventilador que va acoplado a una carcasa metálica, suficientemente amplia, la cual encierra al conjunto lámpara - primera lente condensadora, controlándose también la constancia de la temperatura transcurrido un tiempo inicial de funcionamiento. Todo el conjunto descrito va unido solidariamente, mediante tornillos de presión, a la mesa que sustenta el dispositivo experimental para evitar posibles vibraciones de éste.

Para unas determinadas aperturas de los diafragmas, de este dispositivo emergen tres haces de luz, después de incidir sobre los filtros, que convergen en el foco imagen de la segunda lente condensadora sobre el cual se ha situado el orificio de entrada de una esfera integrante, E_1 . Al orificio se le ha adherido un delgado vidrio deslustrado con objeto de borrar la imagen del filamento de la lámpara que sobre él se representa y a la par evitar la posible entrada de polvo al interior de la esfera.

La esfera integrante está realizada en hierro y mecanizada en dos mitades que ajustan perfectamente. Posee un diámetro de 15 cm y un orificio de salida situado a 120° con el de entrada, ambos de 3 cm de diámetro. Con objeto de evitar posibles oxidaciones se ha cromado interiormente y la mezcla de las luces procedentes de los primarios se produce espacialmente debido a la difusión que se realiza sobre una capa de OMg que se ha depositado en su interior por condensación de los humos que se desprenden al quemar cintas de magnesio, según las instrucciones convencionales, Keitz (1955).

El sistema descrito produce una radiación, que emerge del orificio de salida de la esfera integrante, cuya cromaticidad se puede controlar a través de los mandos del colorímetro, mezclando en distintas proporciones cada una de las luces primarias.

3.1.2 SISTEMA DE PRODUCCION DEL ESTIMULO DE REFERENCIA

Está constituido por un dispositivo similar al de producción del estímulo variable con la salvedad de que la placa portadora de filtros y el sistema de variación de las aperturas de los diafragmas es distinto. En el esquema general de la figura 3.1 se simboliza por el bloque C2.

En la figura 3.3 se presenta un esquema de la placa utilizada en este caso, en la que puede observarse que la variación de la apertura de los diafragmas se realiza mediante semisectores cuyo giro permite variar el área que cubren de los filtros y controlar así el flujo radiante. La variación más pequeña que se puede apreciar en los mandos del sistema es de $1/3$ de mm en la longitud del arco, lo que corresponde a una variación angular, teniendo en cuenta que el radio es de 7.5 cm, de 0.05 radianes.

La disposición de la fuente luminosa S_2 y del sistema de condensadores es similar a la anterior. Se ha de destacar que la lámpara S_2 es de las mismas características que la S_1 , cuestión de interés en cuanto al tipo de metamerismo con que se pretenden realizar las igualaciones. Su curva de emisión espectral se muestra en la figura 3.4 conforme al calibrado realizado en los laboratorios del Instituto de Optica "Daza de Valdés" (C.S.I.C.).

En este caso el conjunto formado por la fuente luminosa, las lentes condensadoras y la placa portadora de filtros va montado sobre un banco óptico de perfil triangular, solidario a la mesa, en sus respectivos jinetillos. Igualmente se encuentra aislado mediante una carcasa debidamente refrigerada y con control de temperatura. En la esfera E_2 se produce, de la misma forma descrita anteriormente, la mezcla espacial de primarios.

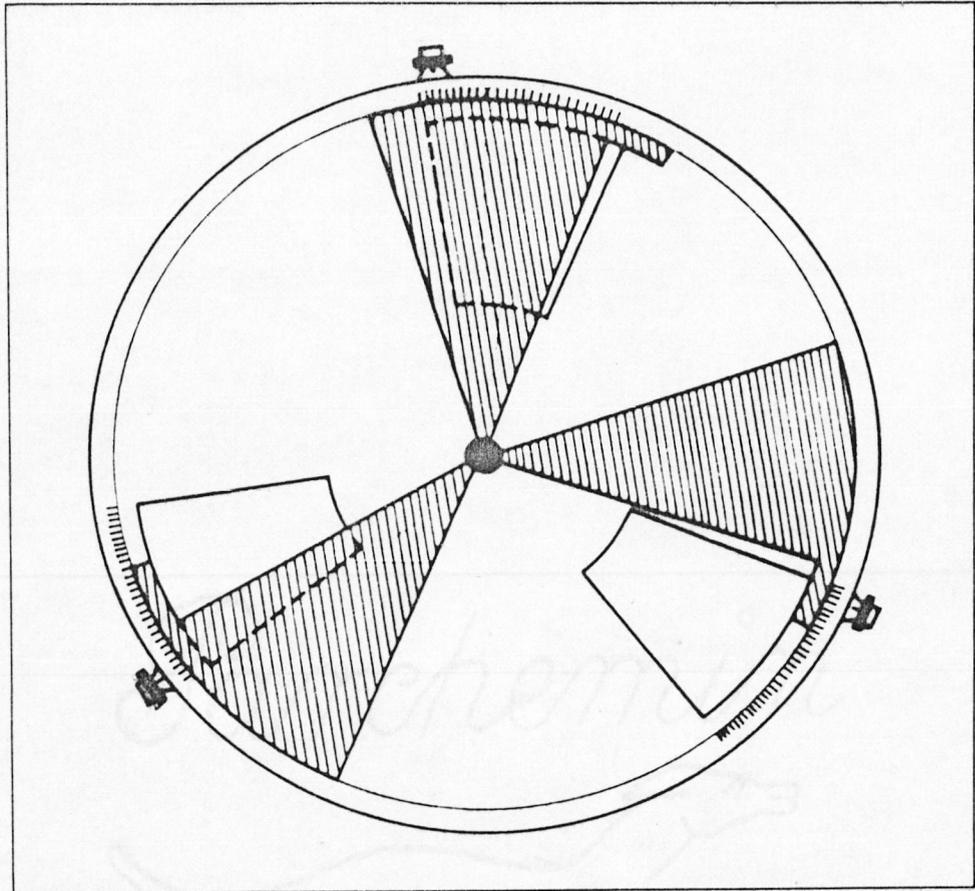


Figura 3.3. Esquema de la placa portadora de filtros del colorímetro empleado para producir el estímulo de referencia.

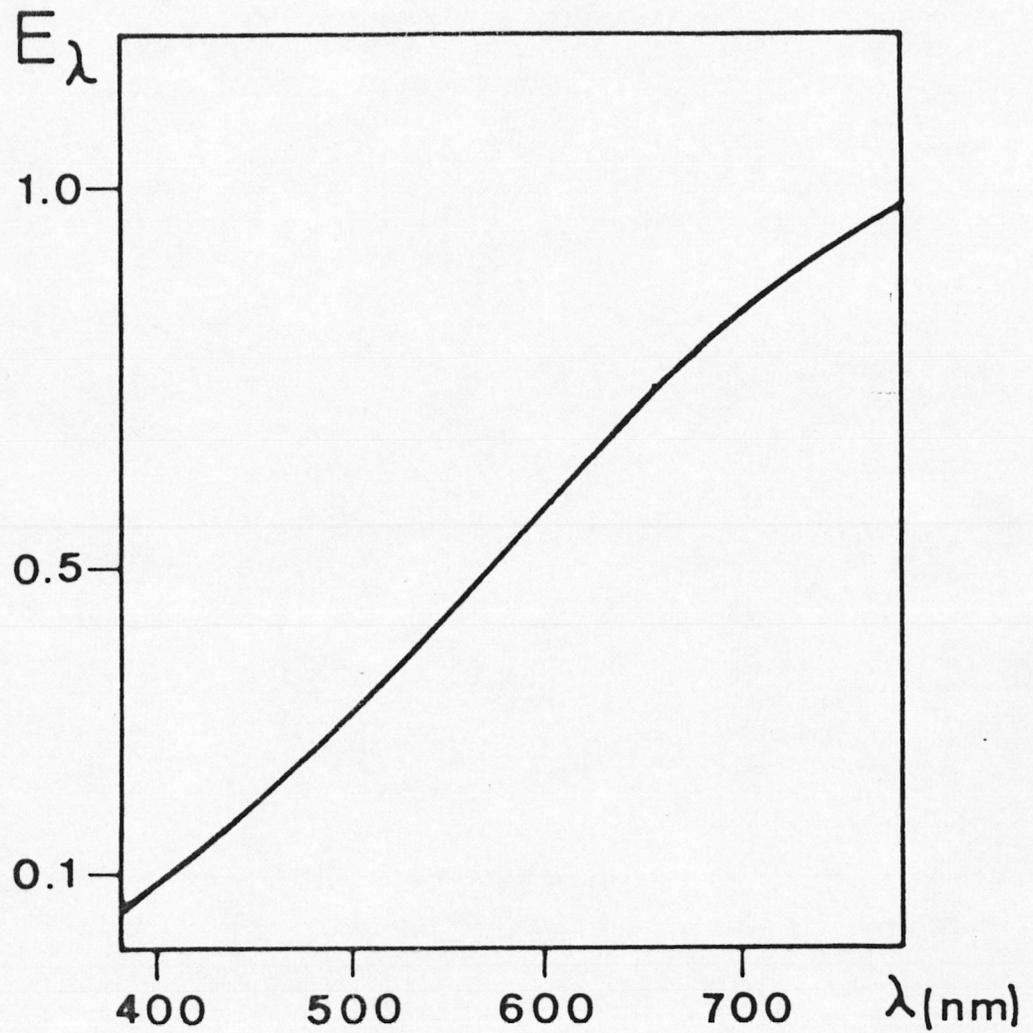


Figura 3.4 Curva de emisión espectral relativa de las lámparas empleadas en los colorímetros.

3.1.3 SISTEMA DE YUXTAPOSICION DE ESTIMULOS

Producidos los estímulos de color a estudiar se ha de disponer en el dispositivo experimental de un sistema que permita la comparación de éstos bajo ciertas condiciones experimentales. Puesto que este estudio de discriminación cromática se realiza por comparación simultánea, el sistema se ha diseñado de forma que un color se presente yuxtapuesto al otro en un campo fotométrico circular bipartito con separación diametral.

Para ello, tanto en el orificio de salida de la esfera integrante E_1 , como en la E_2 , se han situado sendas rendijas lineales, R_1 y R_2 , de anchura regulable (que se fijó en 2 mm) de forma que se encuentren en el foco objeto de dos dobletes acromáticos, L_1 y L_2 respectivamente, ambos de la misma distancia focal y tamaño ($f'=127$ mm y 7 cm de apertura). De ellos emergen dos haces de luz colimados, correspondientes a cada uno de los colores, que se hacen incidir, como puede observarse en la figura 3.1, sobre un cubo fotométrico K del cual emergen paralelos tras haber sufrido el procedente del colorímetro de referencia, por reflexión total en el cubo fotométrico, un cambio de dirección de 90° .

3.1.4 SISTEMA DE OBSERVACION

Como se comentará posteriormente, el tipo de visión elegido para las experiencias es maxwelliana, ello se ha realizado acoplado la pupila de entrada del ojo del observador a una pupila de salida artificial P_1 de 2.5mm de diámetro, que se encuentra situada en el foco imagen de un doblete acromático L_3 ($f'=20$ cm, apertura 3 cm) sobre el que inciden los haces luminosos yuxtapuestos, previamente diafragmados circularmente

mediante el diafragma D que se ha situado entre el doblete de observación L_3 y el cubo fotométrico K, estando prácticamente junto a éste último. Al objeto de evitar posibles efectos de miopía nocturna, dado el tipo de adaptación con el que se han desarrollado las experiencias, y facilitar las observaciones, el diafragma D se ha colocado sobre el foco objeto del doblete L_3 . La apertura del diafragma es tal que teniendo en cuenta la focal del doblete, el tamaño del campo de observación es de 3° .

Un obturador electromagnético O, montado sobre el mismo soporte del diafragma D y consistente en una bobina que actúa como electroimán al ser alimentada por un generador de impulsos eléctricos, hace que una placa soldada a una varilla de hierro que penetra en el interior de la bobina interrumpa el campo de observación cuando no llega ningún impulso eléctrico. Ello permite controlar el tiempo de exposición del campo fotométrico en el que se presentan los estímulos a comparar. Tanto la duración de los impulsos como su periodo es controlable mediante el dispositivo electrónico que los genera, permitiendo así fijar una amplia gama de tiempos que puede ir de 0.2 a 10 segundos y un tiempo entre exposiciones suficiente que permita al experimentador actuar sobre los mandos de control del colorímetro variable.

Al objeto de evitar posibles movimientos del observador, cuestión crítica en visión maxwelliana, y garantizar un buen acoplamiento de la pupila de salida del dispositivo con la del ojo, se ha dispuesto de una dentonera cuya posición es ajustable quedando así fijada la posición de la pupila del observador. Va montada, a través de un soporte, sobre un jinetillo de banco óptico con desplazamiento horizontal y vertical, lo que hace posible su ajuste.

Ya que la adaptación se ha realizado a la oscuridad,

el dispositivo de observación y el propio observador se sitúan en el interior de una cabina negra que posibilita dicha adaptación, asimismo tanto en los colorímetros como en el resto del dispositivo se han situado carcacas y pantallas negras para evitar luces parásitas.

3.1.5 SISTEMA DE CALIBRADO

Para la medida de las radiancias espectrales relativas $L_{e\lambda}$ de cada uno de los colores estudiados y posterior cálculo de las coordenadas de cromaticidad, se ha dispuesto de un sistema para el calibrado de los colorímetros cuyo esquema se puede observar en el general presentado en la figura 3.1.

Consiste básicamente en un espejo cóncavo E, sobre el cual se hace incidir el haz procedente del colorímetro variable, tras atravesar el cubo fotométrico K, o bien el procedente del colorímetro de referencia después de haber sufrido una reflexión total en dicho cubo. Este espejo se ha montado en el banco óptico que soporta el cubo K mediante un jinetillo con desplazamiento horizontal y vertical de manera que pueda ajustarse con precisión su posición. Asimismo el jinetillo va dotado de una plataforma giratoria graduada que permite la colocación exacta del eje óptico del espejo en la orientación adecuada respecto a la dirección en que inciden los haces de luz colimados que interesan calibrar.

El haz de luz reflejado en E se focaliza sobre la rendija de entrada de un monocromador M, de la firma JOBIN-IVON, de redes de difracción (1200 l/mm). La resolución con que separa espectralmente el haz incidente es de 2 , 4 u 8 nm dependiendo de que la anchura de las rendijas del mismo sea de 0.5 ,

1 ó 2 mm respectivamente, resoluciones que se ajustan muy bien a las necesidades que se plantean en Colorimetría.

En la rendija de salida del monocromador se ha acoplado un fotodiodo de Silicio de la firma EG&G modelo HUV-4000B (área 1 cm^2 , responsividad 10^7 v/w , $R_f=200 \text{ M}\Omega$ a 230 nm, corriente de oscuridad 5 pA, impedancia de salida 500Ω) que incluye etapa de amplificación. Este tipo de fotodiodo ofrece unas características óptimas de linealidad, estabilidad, sensibilidad y relación señal-ruido para las medidas colorimétricas.

La lectura de las medidas que proporciona el detector se ha efectuado con un multímetro digital RACAL-DANA modelo 4003 que posee una resolución de $1 \mu\text{V}$, precisión 0.04% y $10 \text{ M}\Omega$ de impedancia de entrada en continua.

3.2 PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO

Descritas las características generales del dispositivo experimental empleado pasamos a describir el montaje del mismo y las precauciones que se han tomado en su puesta a punto con objeto de minimizar las posibles causas de errores sistemáticos así como garantizar la reproducibilidad de las medidas.

Requisito indispensable en el montaje de todo sistema óptico es la colocación exacta de sus componentes en las posiciones relativas y el mantenimiento de éstas frente a posibles vibraciones. Por ello se ha procurado que el equipo vaya sustentado por una mesa de amplia base que garantice esta condición así como dotar a las componentes del mayor peso posible y su posterior fijación permanente.

Para ello tanto los colorímetros empleados como los bancos ópticos de perfil Zeiss van unidos a la mesa mediante tornillos de presión. Todas las componentes ópticas que no forman parte del sistema de producción de colores en sí van montadas sobre jinetillos con desplazamiento horizontal y vertical de la casa EALING permitiendo un buen ajuste de las posiciones. Antes de proceder a su fijación se ha realizado un alineamiento de todas ellas mediante la conocida técnica del laser en que éste se emplea como medio visualizador del eje óptico del sistema, haciendo coincidir a éste último con el propio haz laser. Asimismo se alinearon previamente aquellas componentes auxiliares, como son diafragmas, microscopio y telescopio de banco, que se han utilizado al medir anchuras de rendijas así como en la colocación de componentes en focos de algunas de las lentes utilizadas.

La constancia en la alimentación de las fuentes luminosas se ha asegurado con el uso de un estabilizador de alta velocidad BOAR transistorizado modelo 2000-HS (margen en la tensión de entrada $\pm 15\%$, frecuencia 45-60 Hz, precisión de regulación 2%, distorsión nula) cuya tensión de salida se ha mantenido a 220 V. Asimismo se alimenta con esta tensión estabilizada todas las componentes del sistema de lectura de medidas radiométricas empleado en la realización de los calibrados, excepto el fotodiodo que por llevar incluida etapa de amplificación se ha alimentado con una fuente, también estabilizada, a ± 15 V de la firma DATEL-INTERSIL modelo BPM-15/60E.

No obstante y con el fin de controlar posibles variaciones se han realizado calibrados periódicos controlándose así también el posible envejecimiento de la capa difusora de OMg con que van recubiertas las esferas integrantes, Lozano (1978). El control mediante calibrados periódicos prácticamente nunca se ha traducido en una variación de las coordenadas de cro-

maticidad de un estímulo en concreto y en su caso solo ha alcanzado en una magnitud de ± 2 a la última cifra significativa con que se expresan dichas coordenadas. En cuanto a la variación temporal de la coordenada fotométrica Y (en el sistema CIE-1931) con los calibrados periódicos, en el caso más desfavorable tan solo ha habido una variación decreciente del orden del 5% . Se ha de destacar que antes del uso de cualquiera de las lámparas utilizadas se ha realizado un envejecimiento inicial para evitar variaciones bruscas en su emisión posterior.

Como se ha comentado anteriormente, para evitar posibles variaciones en las transmitancias de los filtros con la temperatura, al tener las lámparas efecto de foco calorífico, J. Juan (1974), a ambos colorímetros se les ha dotado de una inyección de aire dirigida hacia los filtros mediante un turboventilador, todo ello a pesar de encontrarse éstos al aire y no dentro de la carcasa que encierra a la lámpara. Tomada esta precaución tal efecto no se ha manifestado en la realización de los calibrados; ello se ha comprobado al volver a calibrar una determinada posición de mando de los colorímetros al principio y al final de cada una de las sesiones de calibrado.

Para evitar inercias y holguras mecánicas en los mandos del colorímetro así como en el monocromador, que afectasen a la reproducibilidad de las medidas, siempre se han variado estos mandos actuando en una misma dirección, si bien el diseño de los controles empleados ha garantizado su estabilidad.

Se ha comprobado, previamente a la toma de medidas, que el mando selector de longitudes de onda en el monocromador está correctamente calibrado, para ello se han hecho incidir sobre él las radiaciones procedentes de un láser de He-Ne así como las correspondientes al doblete amarillo de la lámpara

de Na y las emitidas por la lámpara de Hg.

Finalmente, el dispositivo generador de impulsos eléctricos que actúan sobre el sistema de obturación ha sido calibrado en las distintas posiciones de sus mandos, lo que permite controlar tanto la duración de los impulsos como su periodo. Ello se ha realizado empleando un reloj de alta sensibilidad GRIFFIN-GEORGE TKL-900V al que va acoplada una célula fotoeléctrica; este conjunto se situó detrás del obturador empleado en el dispositivo para así introducir en las medidas del tiempo de exposición real las posibles inercias de la chapa obturadora. La precisión con que fueron medidos los tiempos en las posiciones seleccionadas fué del orden del 1% .

3.3 REALIZACION DE CALIBRADOS

El cálculo de las coordenadas de cromaticidad de un determinado color supone la medida de la radiancia espectral relativa $L_{e\lambda}$ y el conocimiento de las funciones de mezcla del observador patrón sicofísico que se emplee. El calibrado de cada uno de los colorímetros se ha realizado de manera que dicha magnitud, $L_{e\lambda}$, sea conocida para los colores que pueden producir. Para ello se han medido las radiancias relativas $L_{e\lambda}$ transmitidas en el espectro visible por los filtros utilizados como primarios de color en cada una de las posiciones de los mandos que controlan el flujo transmitido.

El dispositivo empleado, representado en la figura 3.1 se ha comentado anteriormente. La radiancia espectral relativa vendrá dada por:

$$L_{e\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{\rho_{\lambda} \cdot \epsilon_{\lambda} \cdot R_{\lambda}} \quad (3.3)$$

donde

M_{λ}	= Medida registrada en el multímetro (mv).
ρ_{λ}	= Factor de reflexión espectral relativo del espejo.
ϵ_{λ}	= Efectividad del monocromador.
R_{λ}	= Responsividad espectral relativa del fotodiodo de silicio.

con λ comprendida entre 380 y 760 nm.

La medida de estos factores se ha realizado como a continuación se detalla:

3.3.1 FACTOR DE REFLEXION-ESPECTRAL RELATIVO DEL ESPEJO

En la figura 3.5 se muestra un esquema del montaje experimental para la medida del mismo. Consiste en una rendija R de anchura regulable que es iluminada a través de un difusor por una lámpara de incandescencia S cuya alimentación se ha estabilizado. A continuación se disponen dos lentes acromáticas L_1 y L_2 de igual focal ($f'=127$ mm). El espejo se sitúa a continuación sobre el mismo banco óptico en una plataforma giratoria graduada.

El haz reflejado por el espejo se hace incidir sobre la rendija de entrada del monocromador M que se encuentra montado en un banco óptico a 90° con el haz incidente en E. La disposición de las lentes y del espejo es tal que la imagen que representa el espejo sobre la rendija de entrada del monocromador tiene el mismo tamaño que la propia rendija.

En estas condiciones se ha hecho un barrido en el espectro visible, registrándose las medidas de 10 en 10 nm y trabajando con una resolución en el monocromador de 4 nm (rendijas de entrada y salida de 1 mm).

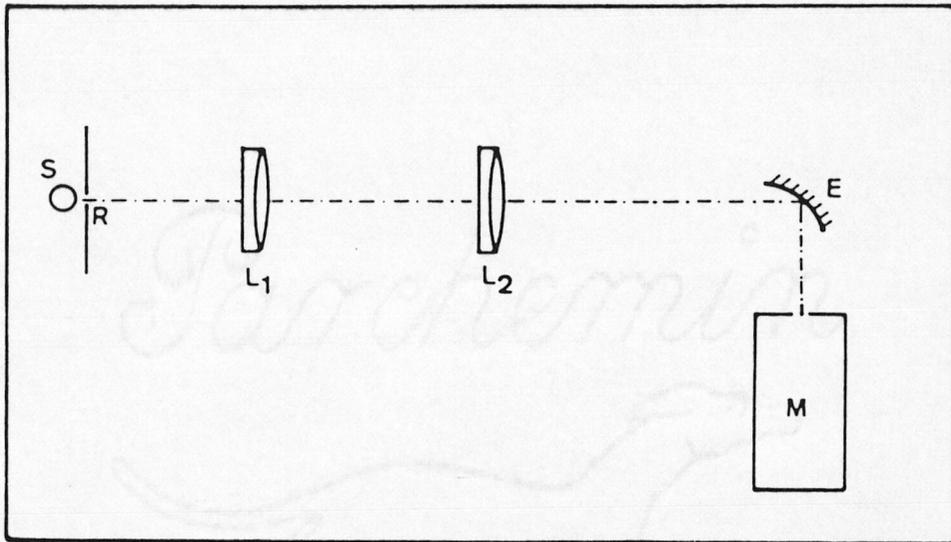


Figura 3.5. Esquema del dispositivo de medida del factor de reflexión del espejo.

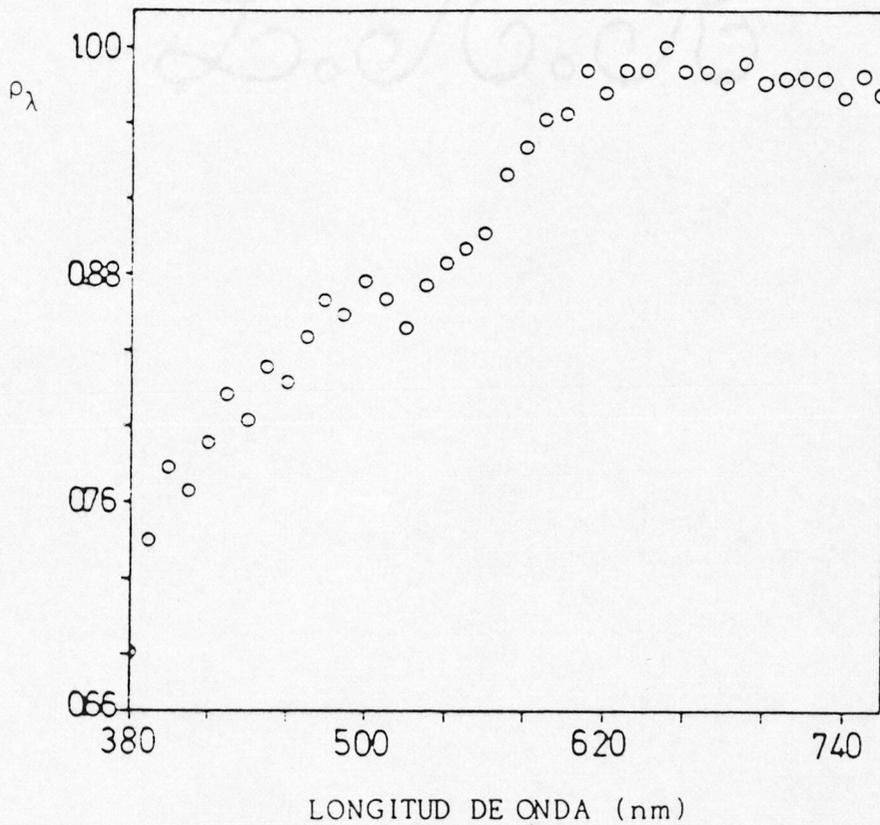


Figura 3.6. Factor de reflexión espectral relativo del espejo.

El factor de reflexión espectral relativo del espejo se ha calculado hallando la relación existente entre las medidas tomadas con el espejo y sin él, cuando el monocromador se sitúa justo frente a L_2 .

Puesto que no se está interesado en medidas radiométricas absolutas, los resultados se han normalizado al valor más alto de ρ_λ ; en la figura 3.6 se presentan estos resultados que han sido introducidos en los cálculos de la expresión (3.3).

3.3.2 EFFECTIVIDAD DEL MONOCROMADOR

En la figura 3.7 se presenta la efectividad ϵ_λ del monocromador JOBIN-IVON HV-20. Dicha curva ha sido suministrada por el fabricante y responde al comportamiento normal que presentan las redes de difracción por reflexión, Záidel (1976).

3.3.3 RESPONSIVIDAD ESPECTRAL RELATIVA DEL FOTODIODO

En la figura 3.8 se presenta la responsividad espectral relativa del fotodiodo de silicio EG&G HUV-4000B. Los valores se han normalizado al valor más alto, 760 nm, y su medida se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Optica "Dáza de Valdes" (C.S.I.C.). Como se observa ésta es creciente a lo largo del espectro lo que genera que, en el dispositivo de lectura de las medidas, se obtuvieran valores más bajos para las longitudes de onda cortas cuya corrección se efectúa mediante la expresión (3.3).

La linealidad del fotodiodo fué comprobada en el propio dispositivo haciendo incidir sobre él un determinado estímulo de color y variando la intensidad que le llega mediante un juego de polarizadores previamente calibrado, obteniéndose

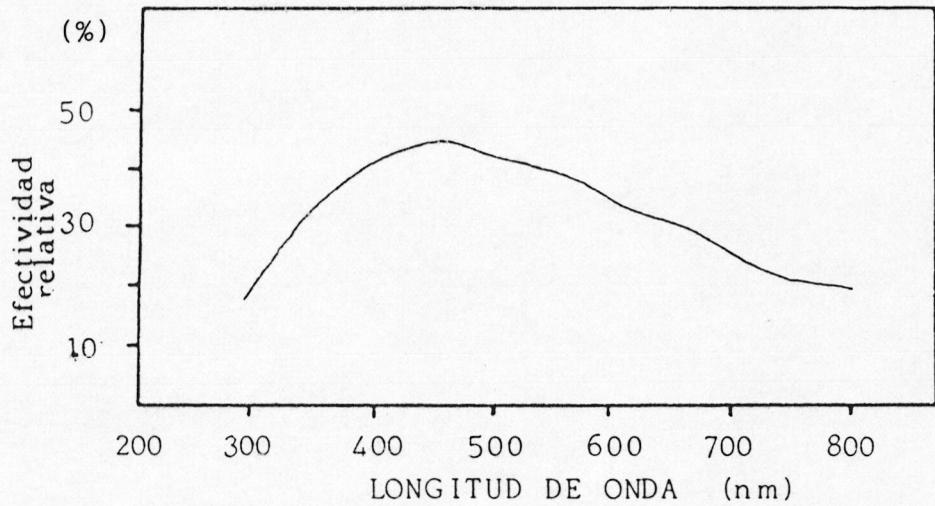


Figura 3.7. Efectividad relativa del monocromador H-20

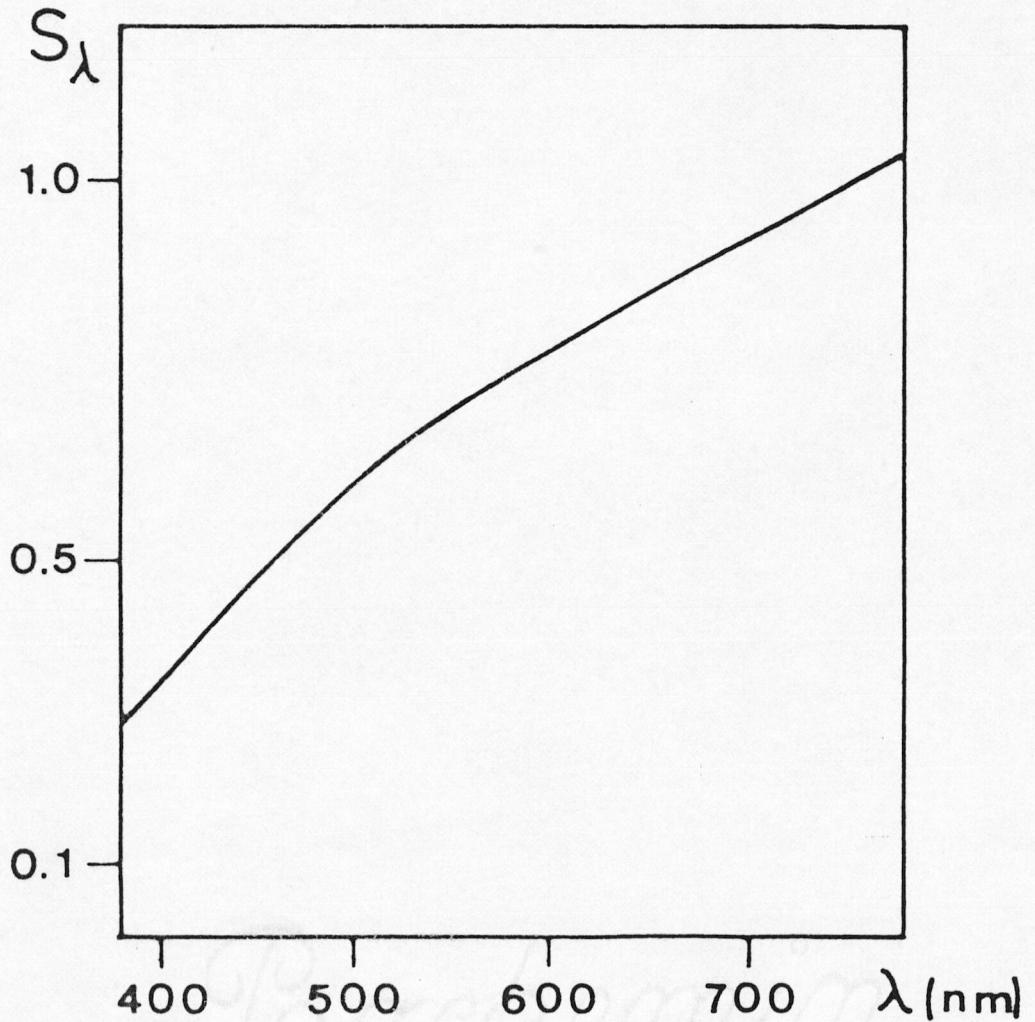


Figura 3.8. Responsividad espectral relativa del fotiodo de silicio HUŪ-4000B.

una alta correlación en el ajuste lineal entre la respuesta del fotodiodo y la intensidad incidente.

Todos los calibrados se han realizado de 10 en 10 nm a partir del pico en transmitancia de cada uno de los filtros que actúan como primarios de color según la norma UNE usual en Colorimetría. En todos los casos las rendijas de entrada y salida del monocromador han sido de 1 mm de anchura, lo que ha supuesto una resolución de 4 nm.

En este sentido hemos de destacar los resultados obtenidos por Sève (1982) en los que evalúa el error experimental asociado al cálculo de los valores triestímulos X, Y, Z, al pasar de las integrales que los expresan a sumatorios en saltos discretos de 1, 5 ó 10 nm y su traducción en la variación experimental de los valores de las coordenadas de cromaticidad. En ellos se pone de manifiesto que dichas variaciones no llegan nunca a ser superiores a una o dos unidades en la cuarta cifra decimal de unos casos frente a otros, lo que garantiza una buena medida hasta la tercera cifra decimal en las coordenadas de cromaticidad en cuanto a la elección del $\Delta\lambda$ elegido en los calibrados se refiere. Otro estudio similar en el que se evalúan los errores del paso de la integral de cálculo de los valores triestímulos a sumatorios, teniendo también en cuenta la tabulación discreta de las funciones de mezcla, ha sido realizado recientemente por Krystek (1982).

No obstante, en el presente trabajo hemos considerado como más representativo del error experimental en el cálculo de las coordenadas de cromaticidad el asociado al propio instrumento y se ha tomado el escalón mínimo de variación de los mandos del colorímetro expresado en términos de diferencias de coordenadas de cromaticidad y luminancias, englobando éste los posibles errores sistemáticos mencionados en el apartado anterior.

Por otra parte, los errores accidentales se han 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 representativo del umbral.

La realización de un programa de cálculo en FORTRAN-V ha permitido la agilización de éste para evaluar las radiancias espectrales relativas, proporcionando una matriz en la que figuran sus valores para cada uno de los colores primarios en las longitudes de onda seleccionadas y cada una de las posiciones de los mandos de control de los colorímetros.

4. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Cualquier estudio en el campo de la Colorimetría Diferencial exige la especificación de las condiciones experimentales con que se ha realizado, ya que la variabilidad de los resultados puede ser función de éstas, Hita y Romero (1981). Este hecho implica la necesidad de dicha especificación al objeto de hacer comparables estos resultados experimentales con los obtenidos por otros autores en condiciones similares, o en su caso distintas, para poder de esta forma establecer una generalización de los mismos.

4.1 PARAMETROS EXPERIMENTALES

Para la exposición de los parámetros que se han fijado en las experiencias realizadas y la justificación de los mismos, se ha adoptado la siguiente clasificación, lo que nos permitirá un análisis detallado de los mismos:

- a) Parámetros fotométricos.
- b) Parámetros visuales.

- c) Parámetros temporales.
d) Observadores.

a) PARAMETROS FOTOMETRICOS

En primer lugar se ha procedido a la selección de los estímulos de color a estudiar. Dado el carácter de la presente memoria, y teniendo en cuenta de una parte el comportamiento no uniforme del espacio de color, en cuanto a sistemas de representación se refiere, Pointer (1981), y de otra las posibles dependencias de las diferencias de color con el índice de metamerismo según las zonas del diagrama de cromaticidad, Nimeroff (1965), se ha procurado dentro de las limitaciones experimentales intrínsecas al trabajo, realizar este estudio con estímulos de color que sean representativos de las distintas zonas del mismo. Para ello se han elegido cinco colores de referencia: azul-purpurino, púrpura-rojizo, rojo-anaranjado, amarillo y verde-amarillento, siguiendo las denominaciones zonales propuestas por Kelly (según Judd 1954) y cuya localización en el diagrama CIE-1931 se presenta en la figura 4.1.

En la tabla 4-I se expresan las coordenadas de cromaticidad x e y en el sistema CIE-1931 así como la coordenada fotométrica relativa Y de los colores estudiados. En las tablas 4-II 4-III y 4-IV se especifican igualmente las coordenadas de los colores estudiados en los sistemas de representación UCS, CIELUV y CIELAB respectivamente, adoptados en la realización de esta memoria.

Como puede apreciarse la coordenada Y , o lo que es lo mismo, la luminancia relativa, varía de unos colores a otros lo que es debido a limitaciones experimentales, e inherentes a este tipo de investigación, en el sentido de conseguir ciertas luminancias, a partir de los filtros disponibles en el mercado,

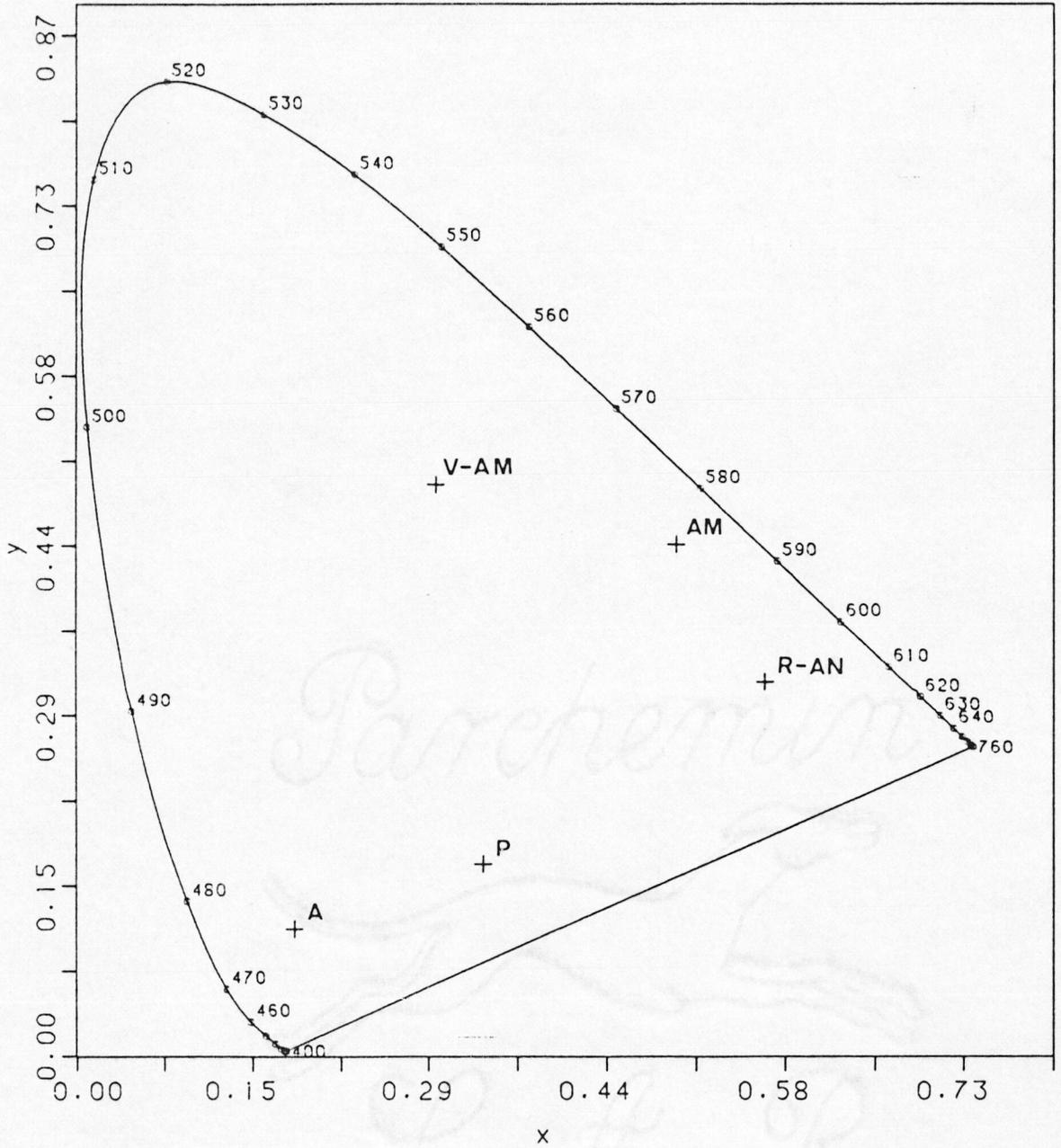


Figura 4.1. Localización en el diagrama CIE-1931 de los estímulos de color estudiados.

TABLA 4-I. Coordenadas de los estímulos de color estudiados en el sistema CIE-1931.

	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>Y</u>
AZUL-PURPURINO	0.180	0.109	1.028
PURPURA-ROJIZO	0.336	0.165	2.213
ROJO-ANARANJADO	0.565	0.321	3.329
AMARILLO	0.493	0.439	4.873
VERDE-AMARILLENTO	0.297	0.490	2.538

TABLA 4-II. Coordenadas de los estímulos de color estudiados en el sistema UCS-CIE 1960.

	<u>u</u>	<u>v</u>	<u>L</u>
AZUL-PURPURINO	0.182	0.165	1.028
PURPURA-ROJIZO	0.312	0.230	2.213
ROJO-ANARANJADO	0.395	0.338	3.329
AMARILLO	0.271	0.362	4.873
VERDE-AMARILLENTO	0.143	0.355	2.538

TABLA 4-III Coordenadas de los estímulos de color estudiados en el sistema CIELUV.

	<u>u*</u>	<u>v*</u>	<u>L*</u>
AZUL-PURPURINO	-7.33	-57.91	19.79
PURPURA-ROJIZO	39.84	-50.80	30.21
ROJO-ANARANJADO	88.65	15.07	36.95
AMARILLO	34.58	39.98	44.12
VERDE-AMARILLETNO	-28.33	24.59	32.37

TABLA 4-IV. Coordenadas de los estímulos de color estudiados en el sistema CIELAB.

	<u>a*</u>	<u>b*</u>	<u>L*</u>
AZUL-PURPURINO	27.93	-53.57	19.79
PURPURA-ROJIZO	53.37	-35.65	30.21
ROJO-ANARANJADO	47.33	26.76	36.95
AMARILLO	10.26	47.34	44.12
VERDE AMARILLENTO	-32.11	20.15	32.37

para unos determinados colores; todo ello también unido a las diferencias en la eficiencia luminosa espectral. No obstante, este hecho no resta generalidad al estudio que se ha realizado.

Por otra parte, la elección de las luminancias relativas, se ha efectuado en base a las variaciones que permiten los filtros empleados como primarios de color en torno al color de referencia, con objeto de que hubiese un amplio intervalo en las posiciones de mando de los colorímetros que permitiera determinar el umbral diferencial de color mediante el método que se comentará posteriormente.

No obstante, el intervalo de luminancias en el que se han realizado las igualaciones, está comprendido dentro del nivel fotópico bajo y sus valores garantizan la independencia de los resultados con la variación de este parámetro según apuntan los trabajos realizados en este sentido por Brown (1951) y Walraven (1962).

Teniendo en cuenta el tipo de visión adoptado hemos considerado interesante expresar los valores de éste parámetro mediante la iluminación retiniana medida en trolands, tomando los colores estudiados valores comprendidos entre 27.6 y 83.5 td.

Asimismo hemos de especificar el carácter de las igualaciones en cuanto al tipo de fusión de primarios empleado, espacial o temporal, siendo adoptado el primero de ellos, como se desprende en la descripción del dispositivo experimental, por su sencillez. No obstante trabajos anteriores realizados en este Departamento pusieron de manifiesto la independencia de los resultados, en lo que se refiere a capacidad de discriminación en color de observadores normales, con este parámetro, Hita y Jiménez (1980).

b) PARAMETROS VISUALES

En la realización de esta memoria se ha elegido el desarrollo de las experiencias con visión maxwelliana, ello en base a garantizar la homogeneidad en la iluminación de la zona de la retina excitada, así como asegurar el trabajo en visión foveal, ya que el tamaño del campo fotométrico ha sido de 3° . De esta manera se evita la participación de posibles factores secundarios en los mecanismos de visión introducidos por efectos parafoveales y que pueden acarrear ciertos desvios en las leyes de aditividad de la colorimetría según se desprende de los trabajos realizados por Nimeroff (1964), Moreland (1955) y Clarke (1960).

La forma del campo fotométrico elegida fué circular bipartito con separación diametral, presentándose en la mitad izquierda el color a comparar con el de referencia, como ya se comentó en el capítulo tercero. Esta forma de presentación ha sido elegida frente a otras también usuales en Colorimetría Diferencial, como son campos concéntricos y cabezales de contraste de Lummer-Brodhum, por ser la más frecuentemente utilizada además de aproximarse mejor a las condiciones normales de comparación. De hecho, Lozano et al (1974) han puesto de manifiesto un aumento de la capacidad de discriminación, en el sentido de minimización del umbral, utilizando los cabezales antes mencionados, no obstante en este trabajo, como en la mayoría de los realizados en este área, se está más interesado en la evolución relativa con los parámetros experimentales a estudiar, lo que es independiente de la forma del campo analizado.

El modo de apariencia de los estímulos fué de apertura, como corresponde en el caso de trabajar con luces dirigidas y no provenientes de luz difundida por superficies (modo de objeto).

Parquehemín

Respecto a los parámetros visuales de adaptación hemos de especificar que ésta ha sido a la oscuridad, tanto durante el desarrollo de las experiencias, como durante un tiempo de diez minutos previo al comienzo de las mismas. Este tipo de adaptación es el adoptado en la mayoría de los trabajos y tiene como objeto situar al ojo en unas condiciones independientes del tipo de iluminación al que pudiese haber estado sometido anteriormente. Hemos de destacar que si bien el tiempo de diez minutos no alcanza el valor asintótico de la curva de adaptación para la medida del umbral absoluto, caso que no es el nuestro, dicha condición no es necesaria ya que las luminancias de los estímulos se encuentran dentro del nivel fotópico. En este sentido hemos de resaltar los resultados obtenidos por Cruz y Alvarez - Claro (1973) en los que se pone de manifiesto la independencia de las igualaciones metámeras con el estado de adaptación manteniéndose la ley de Von-Kries.

c) PARAMETROS TEMPORALES

El tiempo de exposición de los estímulos de color a comparar seleccionado ha sido de 1s como recomienda la literatura en las condiciones experimentales elegidas en este trabajo, Hita et al (1980, 1982). Los resultados muestran un deterioramiento de la capacidad de discriminación del observador para tiempos inferiores, lo cual unido a los criterios apuntados por Siegel (1965), si bien en un dispositivo experimental diferente, ha hecho que se opte por este tiempo de observación.

Un tiempo de 10s entre cada presentación de colores se ha elegido en base a que es suficiente para que el experimentador actúe sobre los mandos de control de los colorímetros, así como para la recuperación del estado de adaptación del observador.

d) OBSERVADORES

La realización de las experiencias planteadas en la presente memoria se ha llevado a cabo con tres observadores, todos ellos con visión normal del color según los test de Ishihara, Colegio Médico de Tokio y Farnsworth D-15 para la detección de anomalías en la visión del color. Dos de los observadores no poseen ningún tipo de ametropía y uno de ellos un ligero astigmatismo en el ojo con que realizaba las igualaciones.

Todos poseían experiencia en este tipo de investigación lo cual garantiza la fiabilidad de los resultados de los mismos. No obstante se ha evitado la actuación directa sobre el dispositivo experimental de los mismos, limitándose su tarea a meros instrumentos de cero en cuanto a la igualdad o desigualdad de los colores en estudio.

En cuanto al número hemos de indicar que las experiencias han sido realizadas en un principio con dos observadores, si bien durante el desarrollo de las mismas se ha introducido un tercero con objeto de ratificar, o no, los resultados obtenidos en casos concretos y tendencias aparecidas en los dos anteriores. En este sentido se ha de destacar el hecho de que la gran mayoría de los trabajos internacionales realizados en este campo emplean el mismo número de observadores, Ronchi y Ferrara Mori (1963), si bien la elección de uno mayor o menor depende en parte de las características propias de la investigación planificada. Es más, investigaciones en este área y que han sido aceptadas internacionalmente sentando las bases de la Colorimetría Diferencial, como los trabajos de McAdam (1942) se realizaron con un solo observador o un número similar al empleado en la presente memoria, Brow y McAdam (1949), Brown (1951), Wyszecki y Fielder (1971).

En otro sentido, pero relacionado con este mismo aspecto,

hemos de indicar que de acuerdo con el tamaño del campo fotométrico y ateniéndonos a las normas de la Comisión Internacional de Iluminación se han referido todas las medidas al observador patrón psicofísico CIE-1931 en el que se han introducido las funciones de mezcla \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ calculadas por Mahr(1961) y recomendadas para su adopción internacional por el Comité de Colorimetría para campos inferiores a 4°, Wyszecki y Stiles (1967).

4.2 SELECCION COLORIMETRICA DE PRIMARIOS

Para la realización de este estudio han sido fundamentalmente dos los criterios seguidos en la elección de los primarios de color empleados, aspecto éste de gran interés e íntimamente relacionado con el planteamiento del problema. En primer lugar se ha procurado, con objeto de obtener la más diversa variedad en la composición de las distribuciones espectrales de los colores seleccionados para estudio, disponer de un conjunto de filtros tanto interferenciales como vidrios normales de color que cubriesen ampliamente todo el espectro visible y con características espectrofotométricas diferentes tanto en anchos de banda como en los picos de transmitancia, lógicamente con la limitación que supone la comercialización de algunas características por las firmas fabricantes.

En segundo lugar, para la realización de las distintas igualaciones correspondientes a un mismo color se ha atendido también al criterio de realizar las combinaciones posibles que hagan que el valor que toman las funciones de mezcla en las longitudes de onda transmitidas por los filtros, tomen valores muy diferentes en unos conjuntos de primarios respecto a otros.

De esta manera pensamos que se contemplan suficientemente los factores que participan en la obtención de una igualación metámera de color con diferentes grados de metamerismo.

En la tabla 4-V se presentan las características espectrales de cada uno de los filtros empleados donde a todos se les ha asociado una clave para su identificación. Todos ellos han sido fabricados por la firma SCHOTT y las características generales de los interferenciales son las propias de los filtros de banda tipo AL, soportando temperaturas comprendidas entre 70°C y 100°C, por supuesto nunca alcanzadas en el dispositivo experimental, y teniendo una tolerancia en $\lambda_{\text{máx.}}$ de $\pm 1\%$. No obstante las características de estos filtros fueron ratificadas en nuestro laboratorio.

De las cuatro igualaciones realizadas para cada color, tres de ellas se han efectuado con un carácter puramente metámero y una "cuasi-isómera" de partida con objeto de realizar posibles comparaciones con el resto. La denominación de esta última obedece a pequeñas diferencias en la distribuciones espectrales de los primarios empleados, más que nada asimetrías, y que se traducen en la existencia de un cierto grado de metamerismo como se expondrá en los resultados.

Con objeto de poner de manifiesto las posibles variaciones según el tipo de igualación, siempre se han mantenido en el colorímetro de referencia, que produce el estímulo que se analiza, los mismos filtros que serán responsables, en base a sus transmitancias, de la cromaticidad de los primarios (R4,V5,A6).

Dadas las características de los filtros y los criterios de selección de primarios, no siempre se ha podido realizar para todos los colores una igualación manteniendo los mismos primarios en el colorímetro responsable de establecer los estímu-

TABLA 4-V. Características espectrales de los filtros empleados en las igualaciones.

FILTRO	$\lambda_{\text{máx.}}$ (nm)	$\tau_{\text{máx.}}$ (%)	HW (ancho de banda a mitad de pico, nm)
R1	655.3	55.0	22.5
R4	655.3	54.5	22.5
R17	598.0	55.0	18.0
R18	616.3	62.5	21.5
R50	647.0	90.0	
V2	526.0	66.0	19.5
V5	526.0	66.5	19.7
V13	521.2	64.5	20.7
V14	542.5	50.8	19.8
V15	557.1	55.0	18.2
V60	533.0	39.0	85.0
A3	454.0	63.0	22.0
A6	453.5	62.5	23.0
A10	463.6	60.5	20.5
A11	479.1	66.0	21.0
A70	420.0	57.0	115.0

los variables. Ello debido unas veces a las propias leyes de la Colorimetría y otras a que las proporciones de las mezclas para determinados colores y primarios hacía que no se dispusiese de un intervalo suficientemente amplio en la variación de los mandos de control del colorímetro para obtener el umbral diferencial de color, a pesar de haber tratado de optimizar esta limitación en la elección de los colores analizados.

En la tabla 4-VI pueden observarse las características colorimétricas de los primarios de color seleccionados en cada una de las igualaciones. En ella se presentan (para las posiciones de mando de los colorímetros asociadas a la máxima apertura de los diafragmas) los valores triestímulos X,Y,Z así como las coordenadas de cromaticidad en el sistema CIE-1931, de cada primario. Es de notar la diferencia en valores triestímulos de las ternas de primarios (R1,V2,A3) con los de referencia (R4,V5,A6) a pesar de su carácter "cuasi-isómero" y que son debidas a que en el colorímetro de referencia la máxima apertura alcanzable de los diafragmas es más pequeña que en el variable.

En las figuras 4.2 (a-b) a 4.7 (a-b) se presentan las curvas de transmitancia espectral de cada uno de los conjuntos de primarios empleados en las igualaciones, así como su representación en el diagrama de cromaticidad CIE-1931 junto con los estímulos de color que se han estudiado.

En la figura 4.8 se han representado conjuntamente todos los primarios empleados al objeto de visualizar mejor las localizaciones relativas entre ellos.

TABLA 4-VI. Valores triestímulo* y coordenadas cromáticas, en el sistema CIE-1931, de los primarios empleados en cada igualación.

IGUALACION	PRIMARIO	FILTRO	X	Y	Z	x	y
Colorímetro referencia	R	R4	5.796	2.181	0.000	0.727	0.273
	G	V5	1.893	11.890	0.924	0.129	0.809
	B	A6	2.542	0.381	13.841	0.152	0.023
"C. Isóm."	R	R1	7.168	2.692	0.000	0.727	0.273
	G	V2	2.514	15.331	1.131	0.133	0.808
	B	A3	3.559	0.567	19.530	0.150	0.024
Metám. I	R	R50	35.445	13.834	0.002	0.719	0.281
	G	V60	33.264	54.257	5.333	0.358	0.584
	B	A70	7.459	2.879	41.915	0.143	0.055
Metám. II	R	R18	32.724	15.415	0.009	0.680	0.320
	G	V14	6.923	19.299	0.346	0.261	0.726
	B	A70	7.459	2.879	41.915	0.143	0.055
Metám. III	R	R18	32.724	15.415	0.009	0.680	0.320
	G	V15	13.031	23.223	0.132	0.358	0.638
	B	A11	1.739	2.256	13.793	0.098	0.127
Metám. IV	R	R50	35.445	13.834	0.002	0.719	0.281
	G	V13	1.923	15.176	1.601	0.103	0.812
	B	A10	2.754	0.834	16.555	0.137	0.041
Metám. V	R	R17	20.829	13.046	0.017	0.615	0.385
	G	V14	6.923	19.299	0.346	0.261	0.726
	B	A11	1.739	2.256	13.793	0.098	0.127

(*) Referidos a la máxima apertura de los diafragmas de los colorímetros.

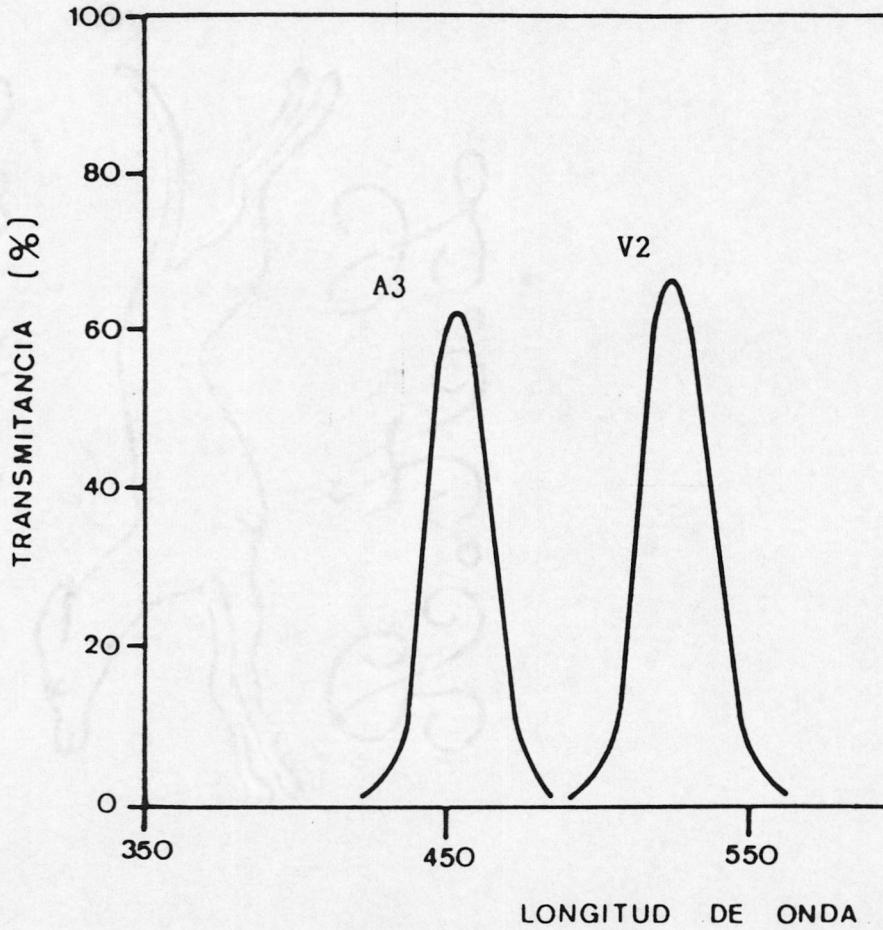


Figura 4.2.a

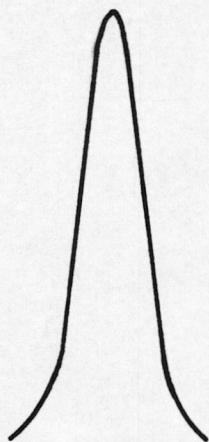
Isóm.

R1

650

750

(nm)



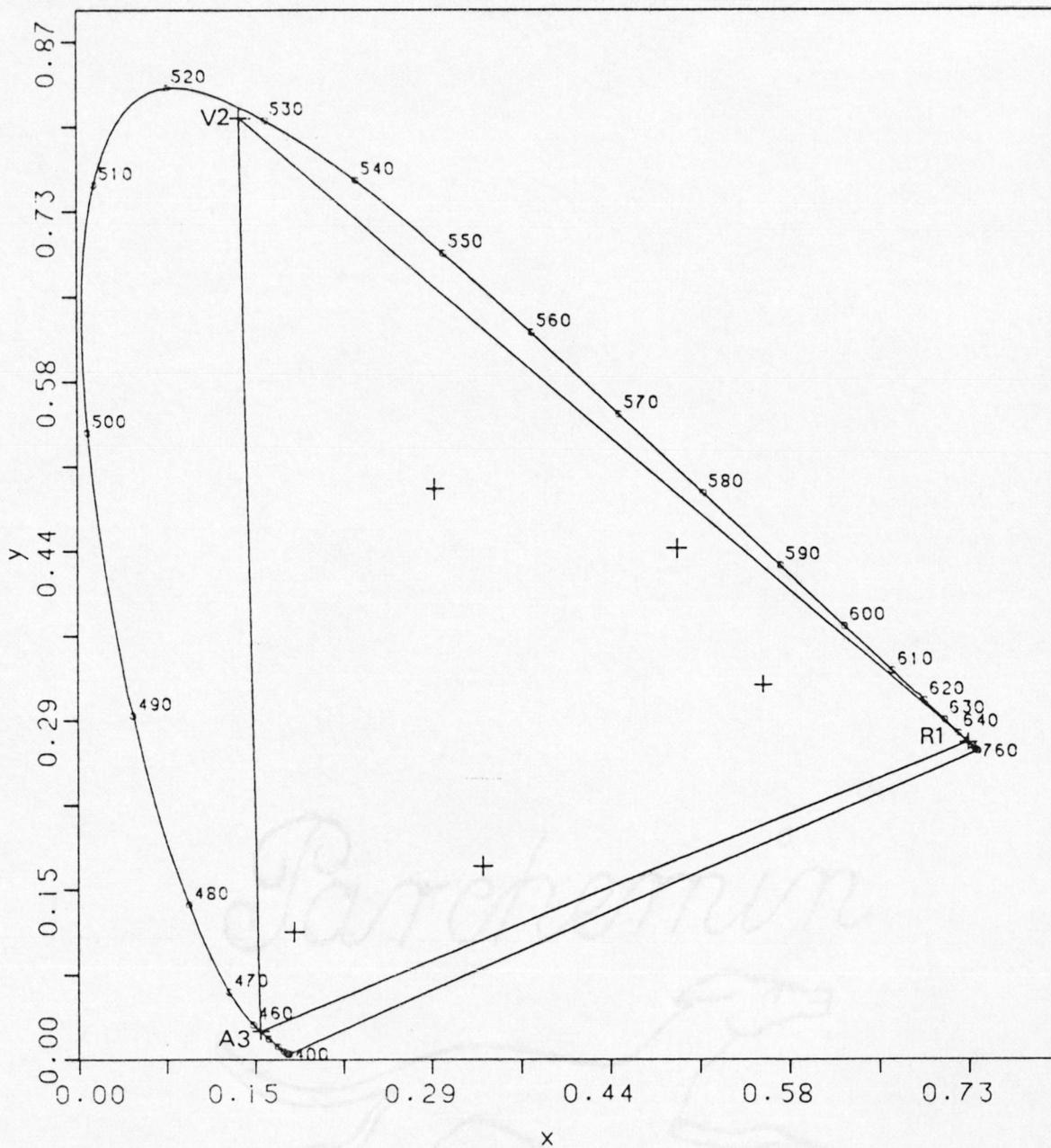


Figura 4.2.b. Primarios empleados en las igualaciones "cuasi-isómeras".

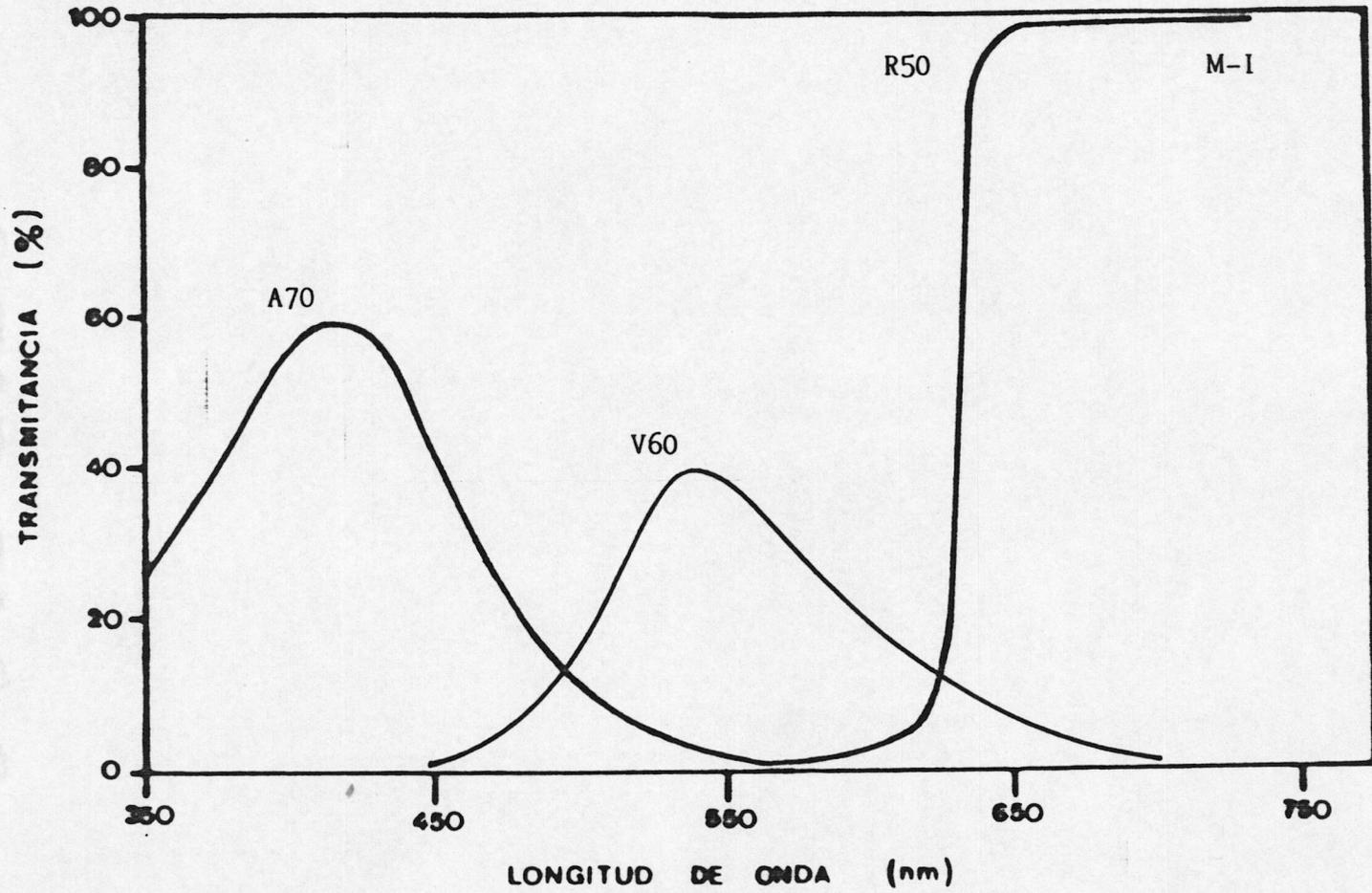


Figura 4.3.a

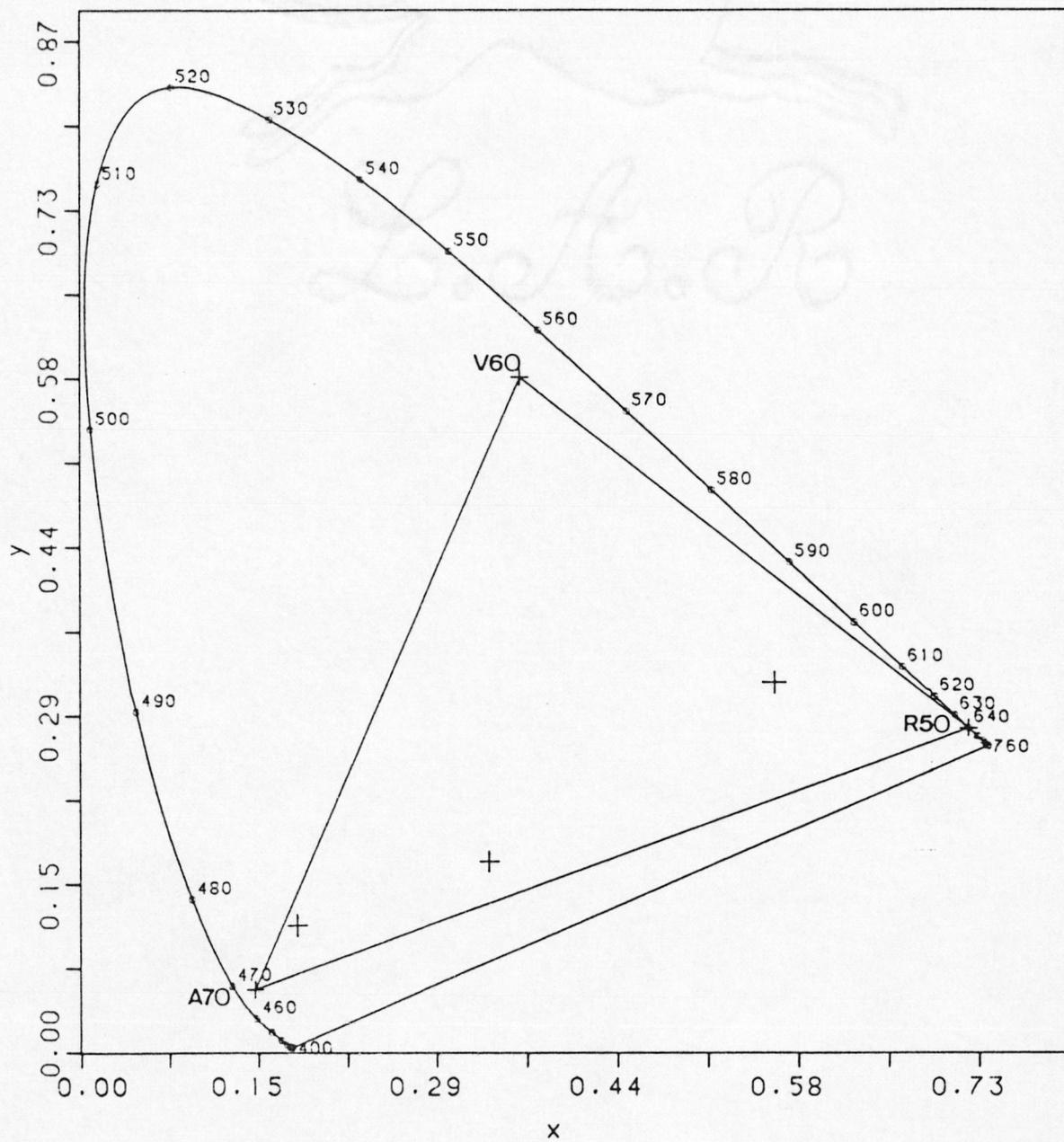


Figura 4.3.b. Primarios empleados en la igualación metámera I.

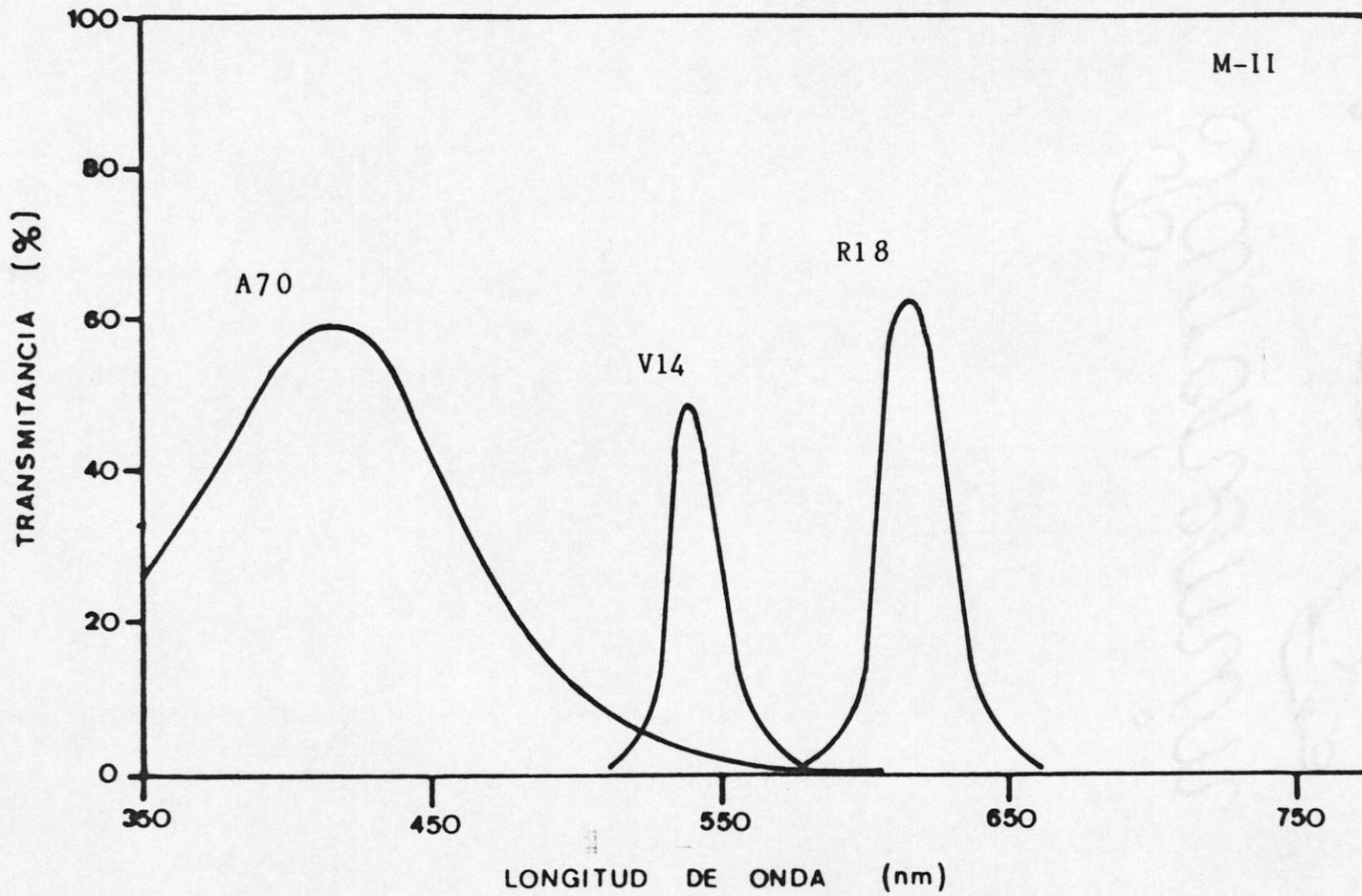


Figura 4.4.a

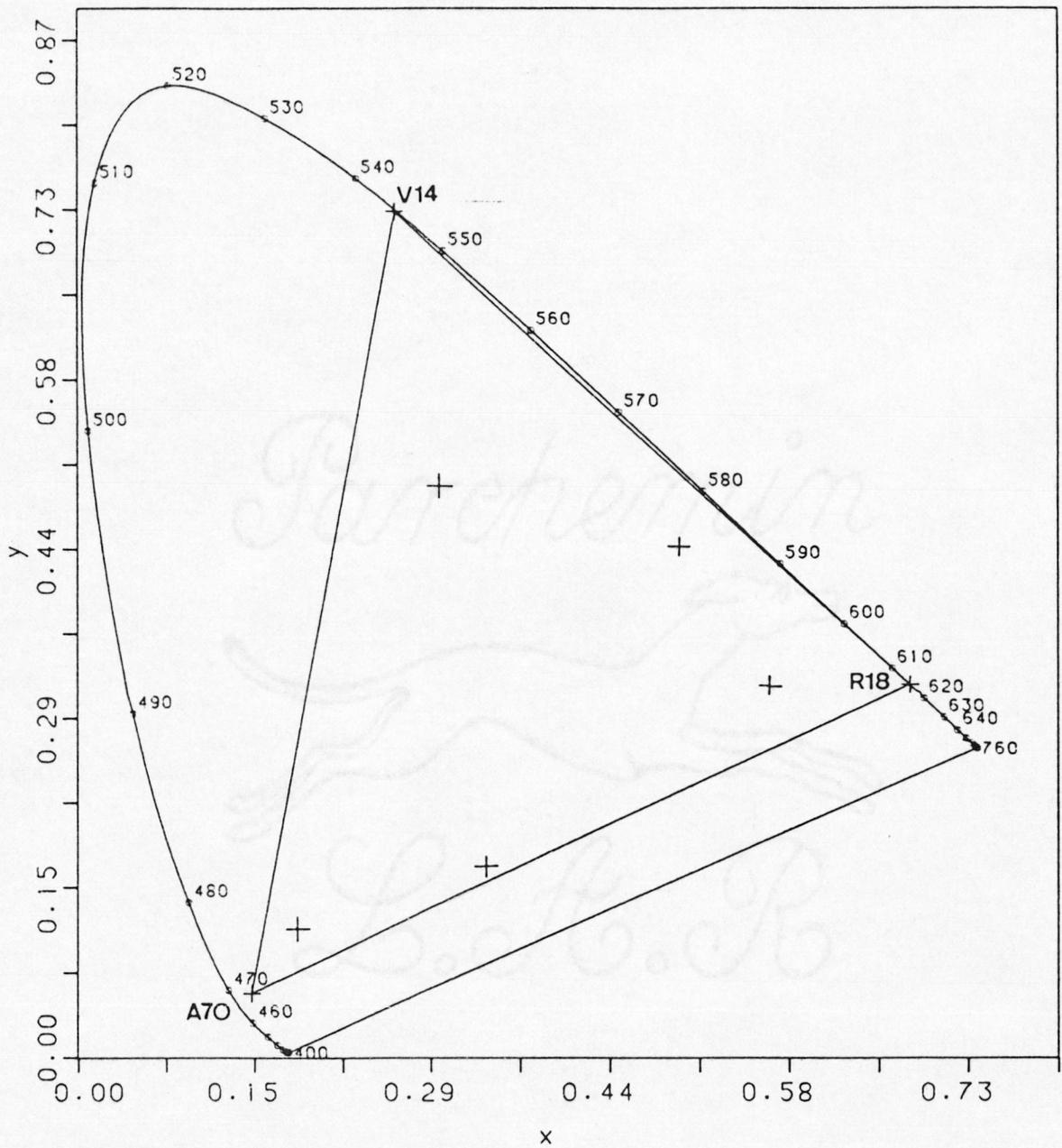


Figura 4.4.b. Primarios empleados en la igualación metámera II.

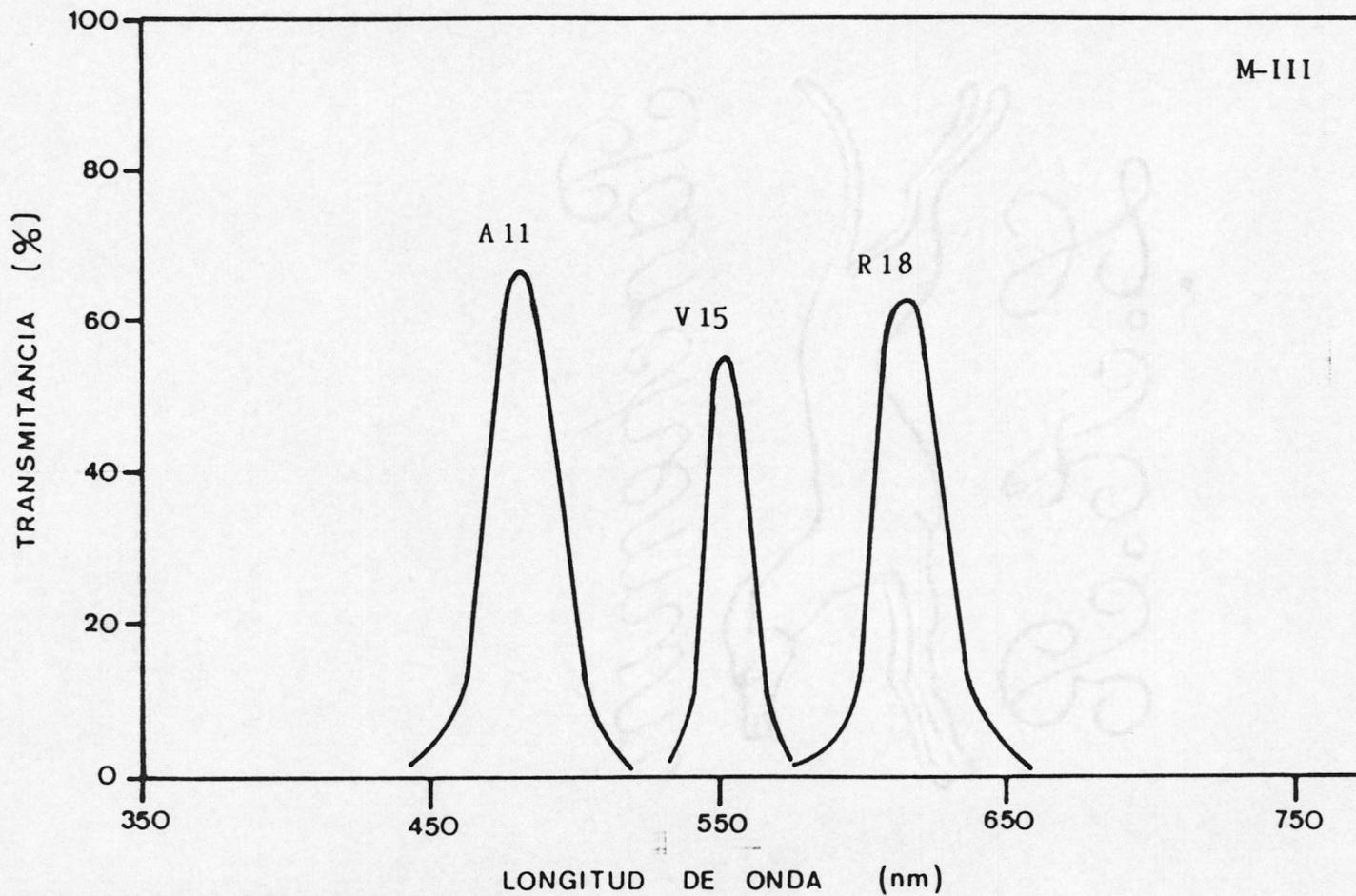


Figura 4.5.a

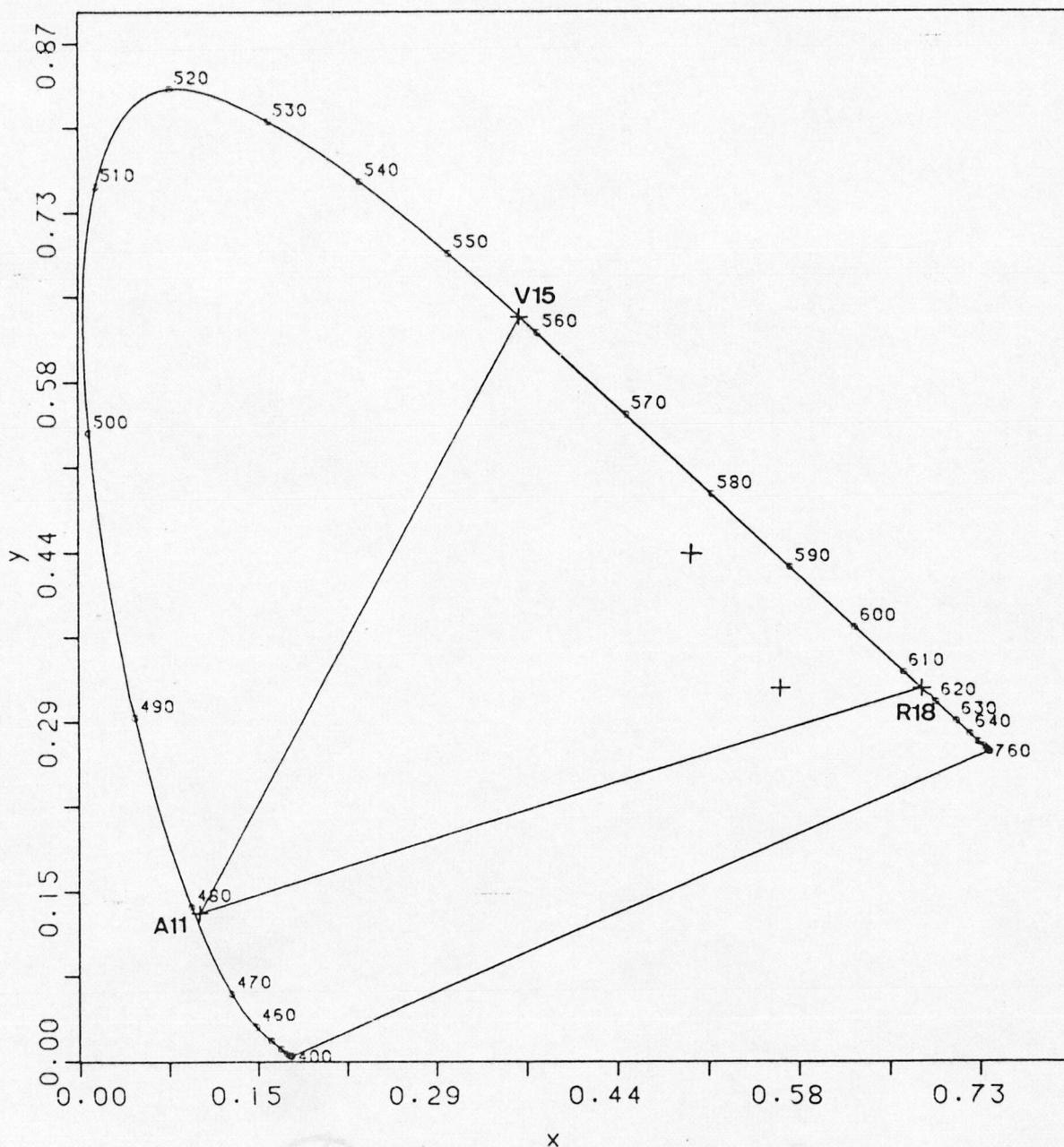
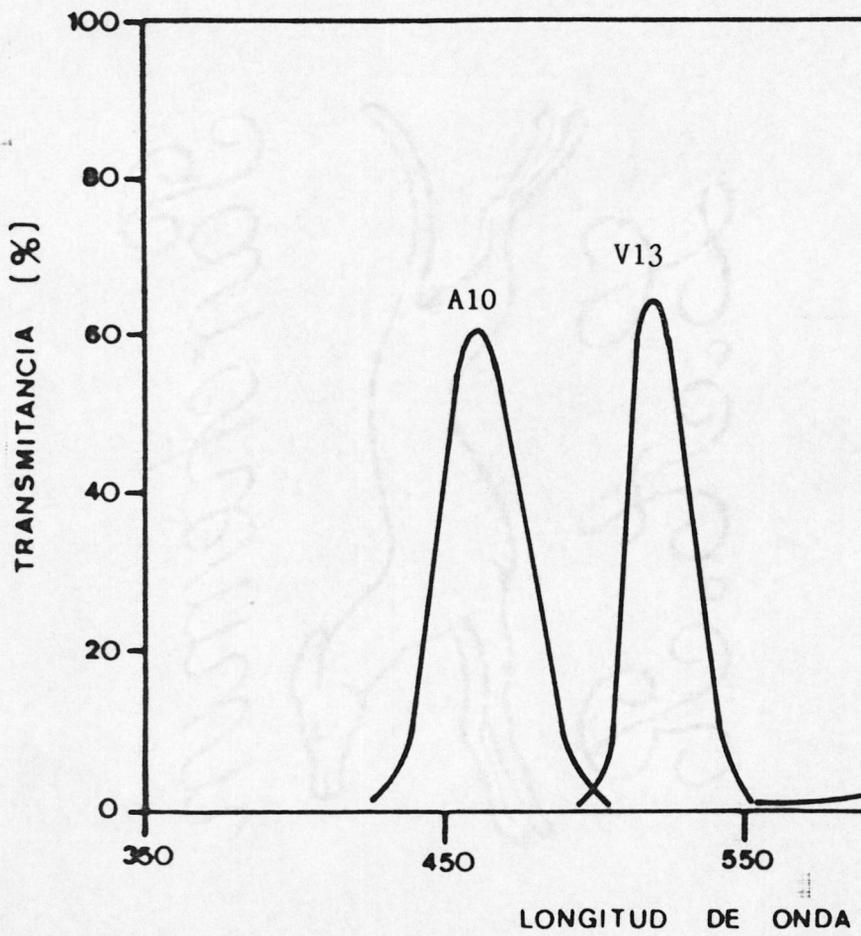
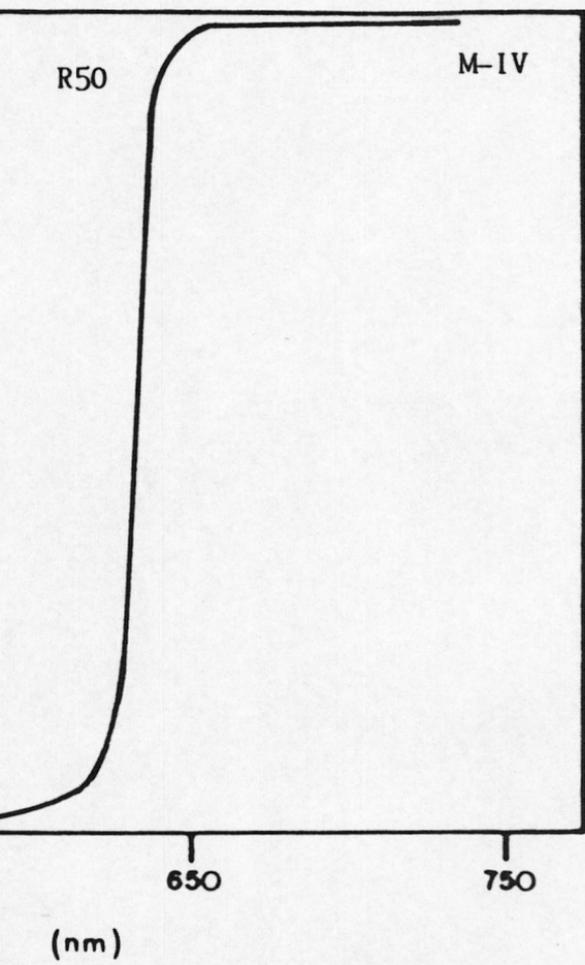


Figura. 4.5.b. Primarios empleados en la igualación metámera III.



LONGITUD DE ONDA
Figura 4.6.a



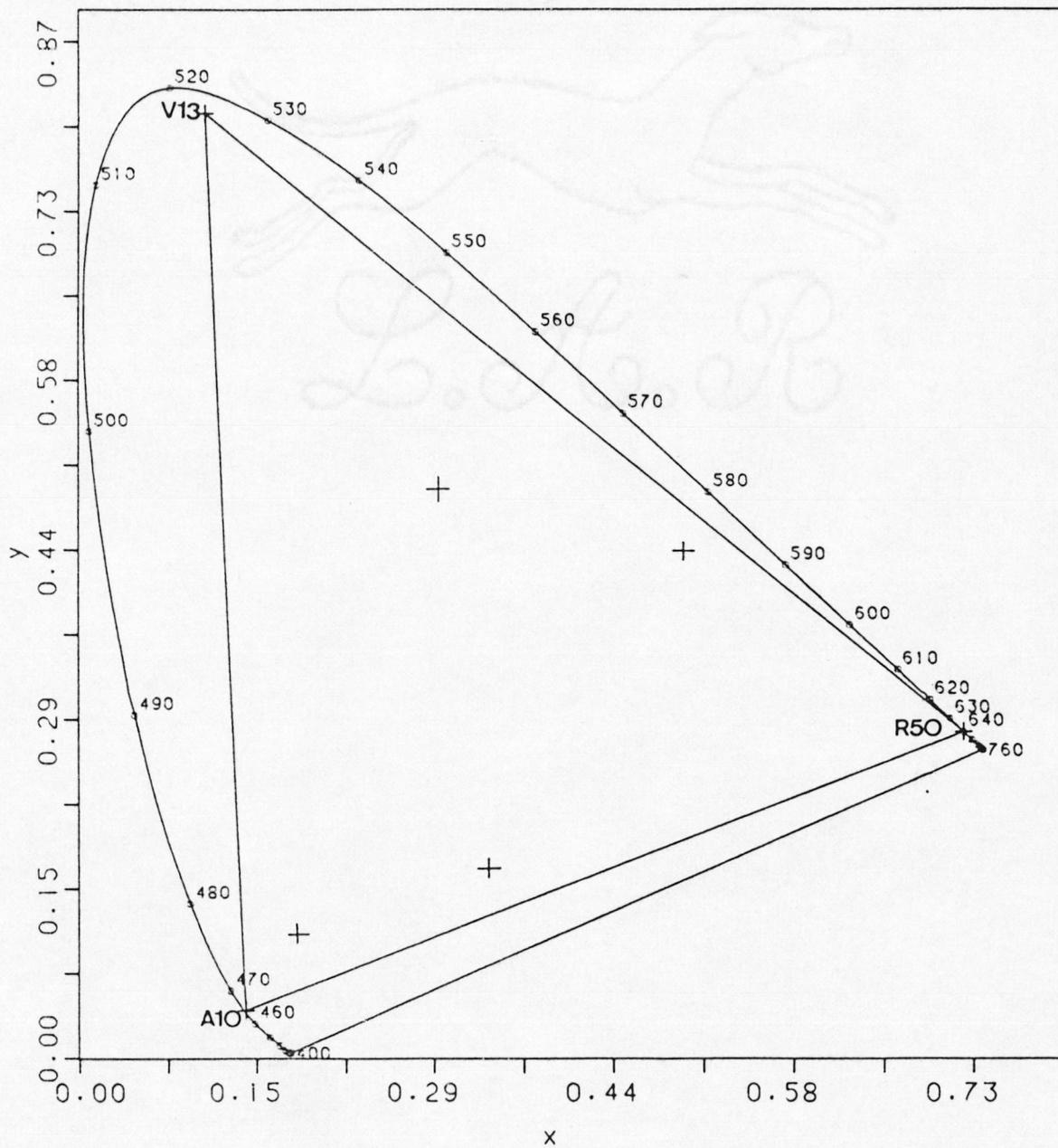


Figura 4.6.b. Primarios empleados en la igualación metámera IV.

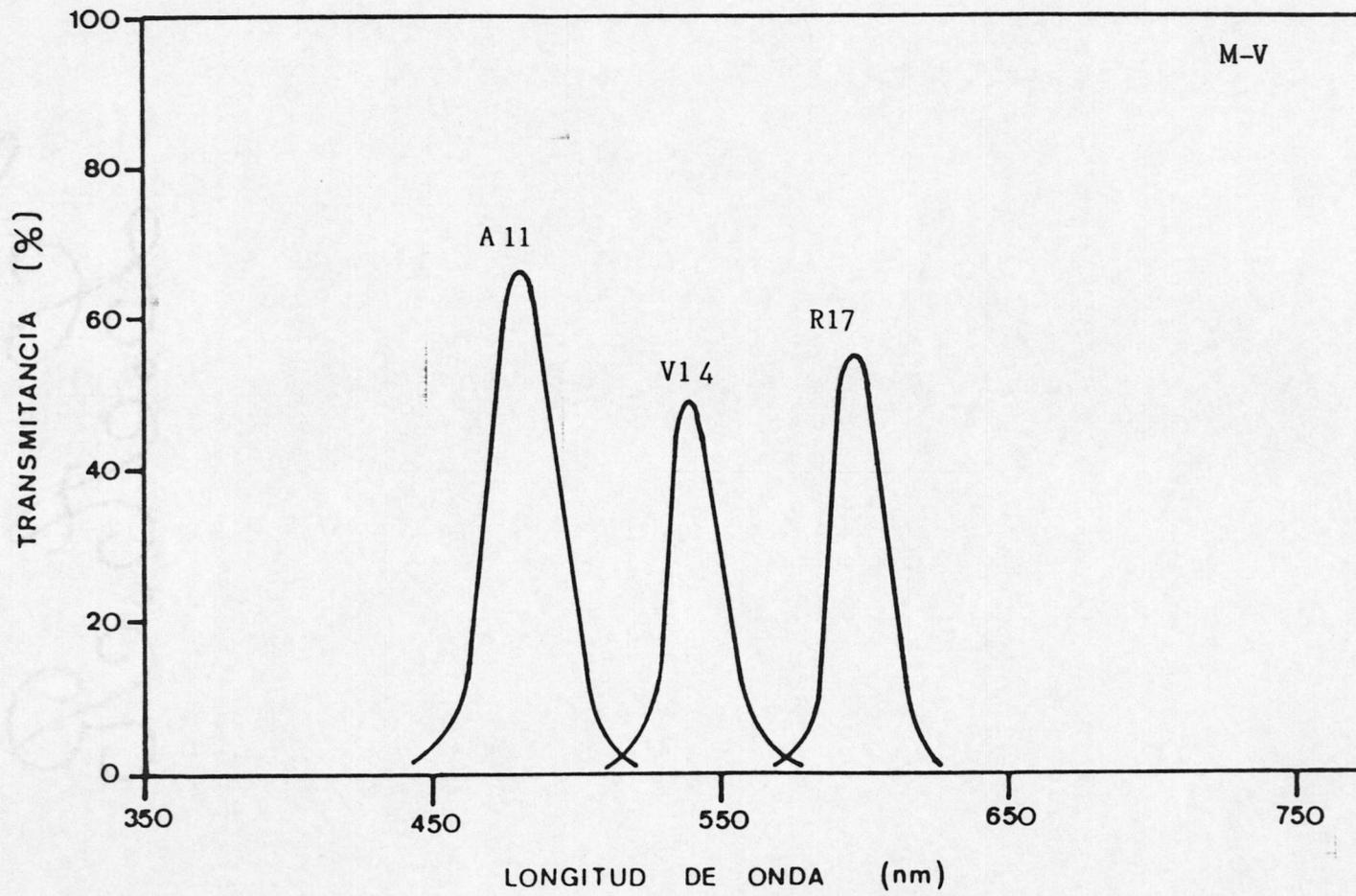


Figura 4.7.a

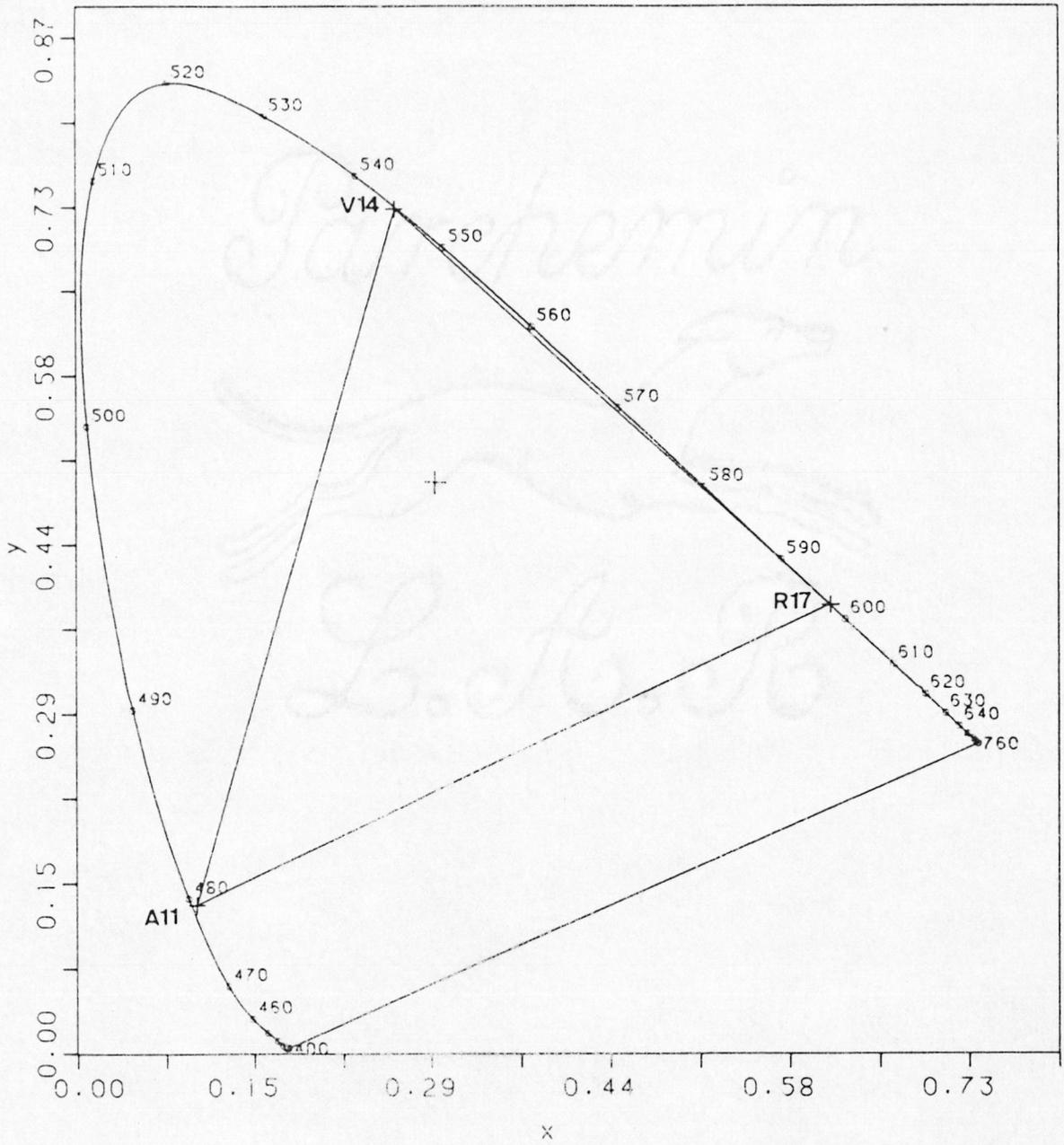


Figura 4.7.b. Primarios empleados en la igualación metámera V.

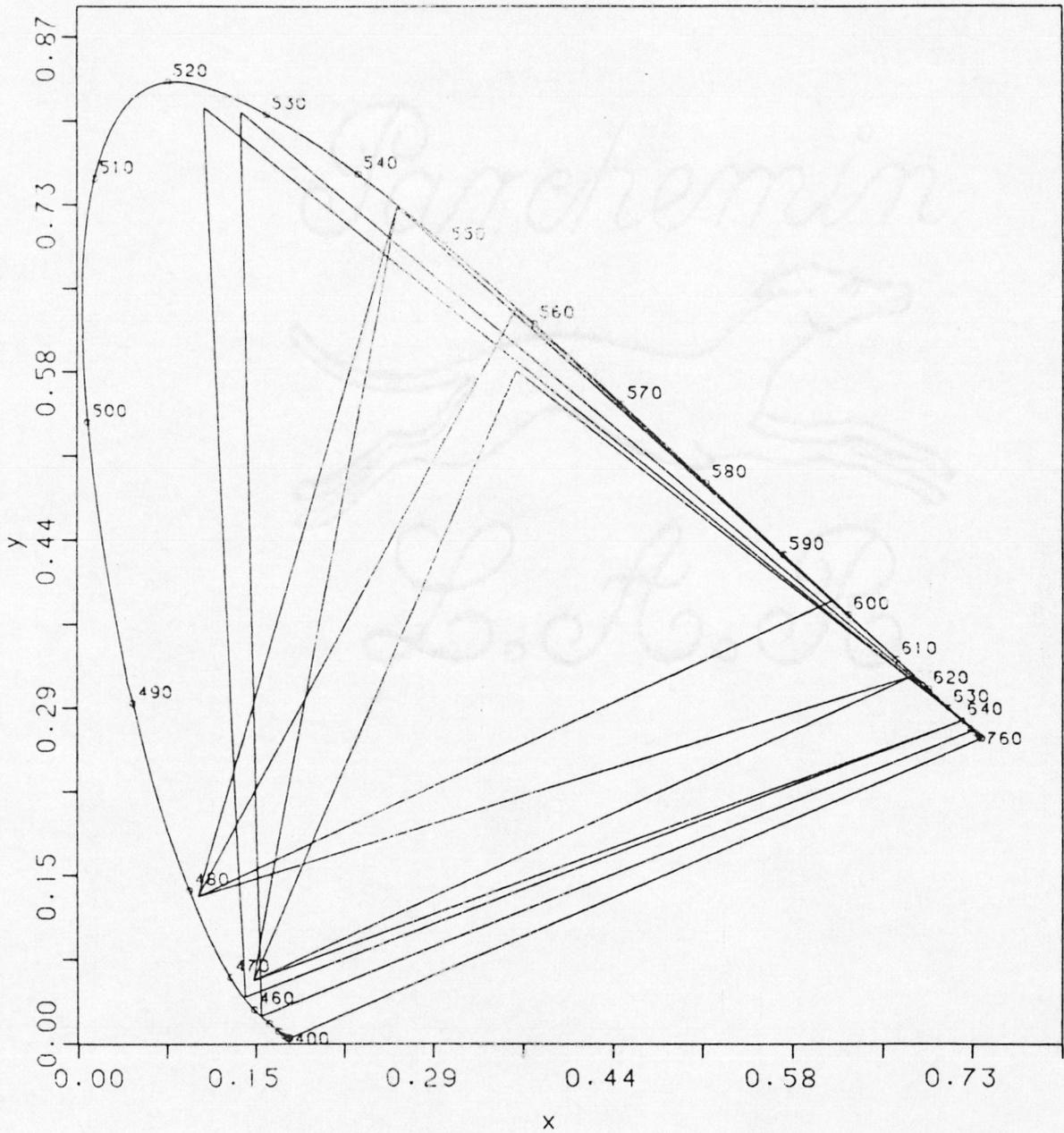
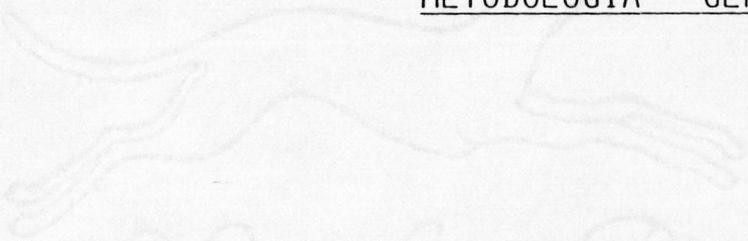


Figura 4.8. Representación conjunta de los seis conjuntos de primarios empleados en las igualaciones efectuadas con el colorímetro productor del estímulo variable.

Parchemin

CAPITULO 5.-

METODOLOGIA GENERAL



L. H. B.

5. METODOLOGIA GENERAL

5.1 METODO GENERAL DE MEDIDA Y DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS

Una vez seleccionados y calibrados los primarios de color, que permiten la medida del umbral diferencial de cada uno de los colores estudiados, se procedió a la igualación visual colorimétrica del color de referencia con el producido por el colorímetro variable. Para ello se dispuso de un programa de cálculo, a partir de los datos del calibrado, que proporciona las posiciones de los mandos de control del colorímetro que permiten obtener una primera aproximación de dichos colores.

Partiendo de estas posiciones se ha conseguido la igualación actuando sobre los mandos de control del colorímetro variable de manera que se realicen todas las combinaciones posibles entre ellos, por supuesto en torno al color de referencia, hasta conseguir la igualdad.

Es importante destacar que para la igualación que es tomada como punto de partida para la posterior determinación

del umbral diferencial de cromaticidad, se ha realizado un barrido exhaustivo de los mandos del colorímetro variable con objeto de evitar que las posiciones de partida fijadas correspondiesen a colores que, si bien son vistos como iguales respecto al de referencia, estuviesen en zonas extremas del umbral diferencial de color; ello a pesar de que en caso de no tomar esta precaución, el propio desarrollo de las sesiones experimentales de medida y método de cálculo lo hubiese detectado. En cualquier caso es interesante destacar que la igualación de partida en las experiencias no tiene por que ser necesariamente la correspondiente al cuasi-isomerismo o metamerismo establecido, pues el barrido realizado garantiza la inclusión de los mismos en el umbral determinado.

Asimismo es de notar que para cada caso estudiado los distintos observadores han realizado su propia igualación, así como que no se ha seguido ninguna pauta secuencial en el sentido de determinar en primer lugar los umbrales diferenciales correspondientes a un mismo color bajo las distintas igualaciones metaméras, sino que se han ido intercalando otros colores estudiados antes de obtener todos los casos correspondientes a uno mismo. Ello con el fin de evitar posibles efectos de aprendizaje que influenciaran en las características de los umbrales.

El método de medida empleado ha sido el de los estímulos constantes, ampliamente descrito en la literatura, LeGrand (1972), y es considerado óptimo en estas investigaciones.

Fijada la posición de partida de la igualación se le presentaron al observador una serie de estímulos obtenidos a partir de variaciones en los mandos de control del colorímetro, debiendo éste responder sobre la igualdad, o no, de los mismos respecto al color de referencia. Debido al tipo de visión utilizada y características del sistema de fijación de la cabeza,

las respuestas eran emitidas por el observador mediante un sistema de pilotos.

Los mandos del colorímetro se variaron de forma que se obtuviesen estímulos distribuidos en distintas direcciones del espacio de color, en torno al de referencia. Con este método las variaciones que percibe el observador no son únicamente de cromaticidad, sino también de luminancia lo que garantiza un funcionamiento del mecanismo visual más próximo a las condiciones normales de comparación, si bien algunos autores han realizado estudios manteniendo constante la luminancia, McAdam (1942), Crawford (1970), Wyszecki y Fielder (1971), lo que no está exento de crítica en lo referente a la generalización de sus resultados.

Cada uno de los estímulos comparados han sido expuestos un total de diez veces, no consecutivas, al observador, caracterizándose la respuesta del mismo por un factor peso igual al número de veces que ha contestado afirmativamente sobre la igualdad entre el estímulo variable y el de referencia.

Como resultado se obtiene una nube de puntos en el espacio de color, cada uno con un factor peso asociado, cuyo ajuste estadístico permite la determinación del umbral diferencial de color, aspecto que será abordado posteriormente.

Se ha de puntualizar que el observador no tuvo ningún tipo de actuación directa sobre los mandos del colorímetro, lo que fué realizado por el experimentador con el fin de evitar la posible influencia de efectos táctiles, LeGrand (1972). Tampoco se ha seguido ninguna pauta determinada en la exposición de estímulos de color, excepto la temporal cada diez segundos como ya se comentó, sino que éstos se han ido variando al azar por el experimentador para garantizar la objetivización de las observaciones para un mismo individuo.

L. A. B.

La duración de cada sesión experimental nunca superó los veinte minutos con el fin de evitar fatigas visuales que influyesen en los resultados. Ello obliga a que las sesiones fueran distribuidas en diferentes horas del día lo cual, por otra parte, garantiza el promedio de las condiciones psicológicas del observador; aspecto que se ha de considerar en base a los resultados obtenidos por Wyszecki (1972).

5.2 ELABORACION DE DATOS Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS

El cálculo de los parámetros que caracterizan a los umbrales diferenciales de color se ha realizado mediante un método matemático estadístico desarrollado a partir de la teoría de propagación de errores en colorimetría, Wyszecki (1959).

Este método consiste esencialmente en un ajuste estadístico a partir del análisis de la varianza de las coordenadas de la nube de puntos, y sus factores de peso, que se han obtenido en la determinación experimental del umbral. Dicho ajuste proporciona los coeficientes de la ecuación del elipsoide de error que caracteriza el proceso de discriminación cromática y está calculado de forma que contenga el 95% de la suma total de los factores de peso. La ecuación del elipsoide viene dada por:

$$\begin{aligned} A(x-x_0)^2 + B(y-y_0)^2 + C(Y-Y_0)^2 + 2D(x-x_0)(y-y_0) + \\ + 2E(y-y_0)(Y-Y_0) + 2F(x-x_0)(Y-Y_0) = 7.81 \end{aligned} \quad (5.1)$$

donde las x , y e Y representan las coordenadas de cromaticidad y luminancias relativas respectivamente de cada uno de los puntos que pertenecen a él y los subíndices "o" simbolizan estas

Parachemin

mismas coordenadas para el centro del elipsoide que se obtiene como media ponderada de los puntos experimentales utilizados en la determinación del umbral. El valor 7.81 garantiza que el 95% de las igualaciones se incluyen en el interior del elipsoide de discriminación.

A partir de estas ecuaciones y realizando una serie de cálculos basados en la Geometría Analítica se pueden obtener los parámetros característicos del elipsoide representativos del umbral diferencial global (variación simultánea de cromaticidad y luminancia) como son su volumen, semiejes, centro, puntos extremos, etc.

Si en dicho elipsoide se efectúa un corte mediante un plano perpendicular al eje de luminancias que pase por su centro se obtiene la sección elíptica principal que será representativa del umbral diferencial de cromaticidad ya que ella contiene puntos de igual luminancia y es la de mayor área. Según (5.1) la sección elíptica principal será:

$$A(x-x_0)^2 + B(y-y_0)^2 + 2D(x-x_0)(y-y_0) = 7.81$$

La orientación de esta sección elíptica, área, y valores de sus semiejes proporciona información sobre las características del umbral diferencial de cromaticidad. Una mayor área de la sección principal significará un deterioramiento de la discriminación, siempre y cuando se refiera a un mismo color debido a la no uniformidad de los sistemas de representación. El predominio del tamaño de uno de los semiejes sobre el otro, así como la orientación de la elipse, supondrá peor discriminación, o aumento de las diferencias justamente perceptibles, en esas direcciones del espacio del color. Asimismo la relación entre semiejes proporciona una cuantificación del comportamiento más o menos uniforme del sistema de representación de color que

se adopte. Igualmente, en principio, un desplazamiento del centro de la elipse respecto del color de referencia estudiado supondrá un no mantenimiento de la igualdad respecto al observador patrón psicofísico empleado, lo que puede tener gran importancia en colorimetría.

Con objeto de obtener información sobre el umbral diferencial de luminancia, a partir del método experimental desarrollado, se han determinado los puntos pertenecientes al elipsoide de error que resultan de la intersección de su superficie con una línea de cromaticidad constante y que pasa por el centro del elipsoide.

El tratamiento descrito hasta el momento, básicamente para el sistema de representación CIE-1931, se ha realizado igualmente para otros tres sistemas recomendados por la C.I.E. Estos han sido el UCS-CIE 1960, de interés por su comportamiento más uniforme, y CIELUV y CIELAB recientemente propuestos y comentados anteriormente. Para estos nuevos sistemas, que surgen a partir de transformaciones del CIE-1931, se han de tomar las precauciones convenientes al realizar las transformaciones, Pointer (1981), Hita et al (1984), ya que algunas de estas no son lineales y supondrían distorsiones en la representación geométrica del umbral diferencial de cromaticidad. Por ello las transformaciones no se han realizado directamente a partir de la ecuación del elipsoide de error, sino que las mismas se han llevado a cabo a partir de los valores triestímulos de cada punto estudiado procediéndose con los nuevos valores de ellos a la obtención del elipsoide, por ajuste de la nube de puntos en el nuevo sistema.

Con relación a los sistemas CIELUV y CIELAB se han seguido las recomendaciones apuntadas por Plaza (1983) de tomar como estímulo acromático el correspondiente al blanco equien-

gético, ya que, como se ha dicho, no se ha trabajado en modo de objeto sino en modo de apertura.

La utilización de un programa de cálculo FORTRAN V ha permitido la agilización de cálculos en la obtención de los parámetros de los umbrales diferenciales. Asimismo se han realizado programas de dibujo que permiten la representación de resultados con el sistema de plotter en el Centro de Informática de esta Universidad.

Otro programa de cálculo en FORTRAN V se ha elaborado para la obtención de los diferentes índices con los que se ha medido el grado de metamerismo.



6. RESULTADOS

A continuación pasamos a exponer los resultados obtenidos en las experiencias realizadas para su posterior análisis y discusión.

6.1 GRADO DE METAMERISMO DE LAS IGUALACIONES

Con objeto de poder evaluar las diferencias en composición espectral, de cada una de las igualaciones de color realizadas, se ha calculado el grado de metamerismo de las mismas.

Teniendo en cuenta las condiciones experimentales del presente trabajo, realizado con colorímetros visuales tipo Donaldson, el metamerismo que se ha estimado es debido lógicamente a las diferencias espectrales entre manantiales luminosos. Por otra parte, como ya se ha comentado, los diferentes grados que pueden obtenerse para un color dado y un conjunto determinado de primarios de color, son difíciles de predecir antes de la realización de la igualación en cuestión y únicamente su cálculo a posteriori permite tener una idea precisa de los

ordenes de magnitud del mismo para las distintas igualaciones.

En cuanto al índice con el que se han evaluado, se ha optado por utilizar el propuesto por Nimeroff y Yurow por considerarlo adecuado en este tipo de experiencias teniendo en cuenta que las luminancias de los estímulos de color estudiados toman ligeras variaciones y dicho índice es independiente de este parámetro.

Para visualizar las composiciones espectrales de cada color, éstas se han representado gráficamente. En las figuras 6.1 (a-b-c-d-e) se presentan las radiancias relativas de los colores de referencia estudiados.

En las figuras 6.2 (a-b) a 6.6 (a-b) se muestran las radiancias relativas, representativas del color físico, obtenidas en las igualaciones realizadas por los observadores L.J. y J.R. con el colorímetro productor del estímulo variable para cada color de referencia, respectivamente.

Conjuntamente, tras cada figura, en las tablas 6-I a 6-V se presentan los grados de metamerismo de cada igualación para los colores estudiados por los observadores L.J., J.R. y E.H. respectivamente.

Asimismo, con el fin de evaluar el grado de metamerismo según el índice propuesto por Lozano (1978), hasta ahora no utilizado en la bibliografía del tema que nos ocupa, en las tablas 6-VI a 6-X se presentan los resultados obtenidos con dicho índice.

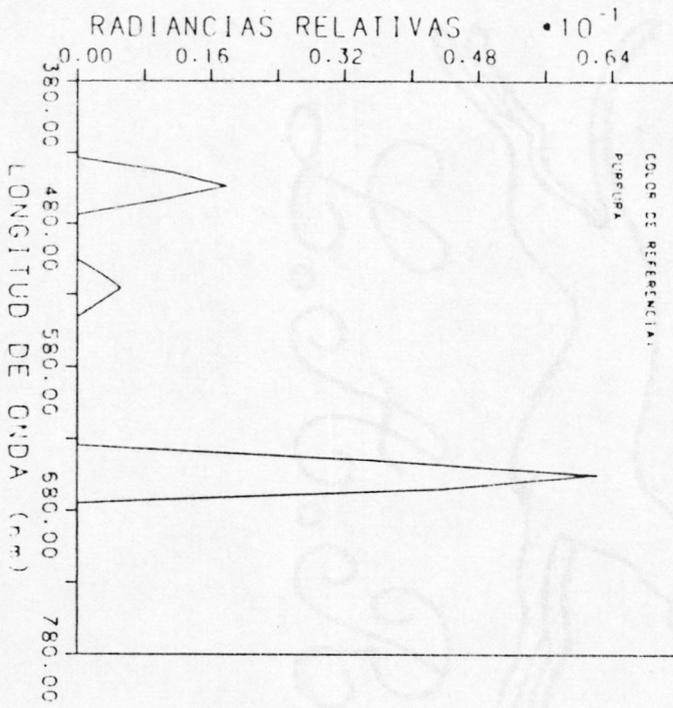


Figura 6.1.b

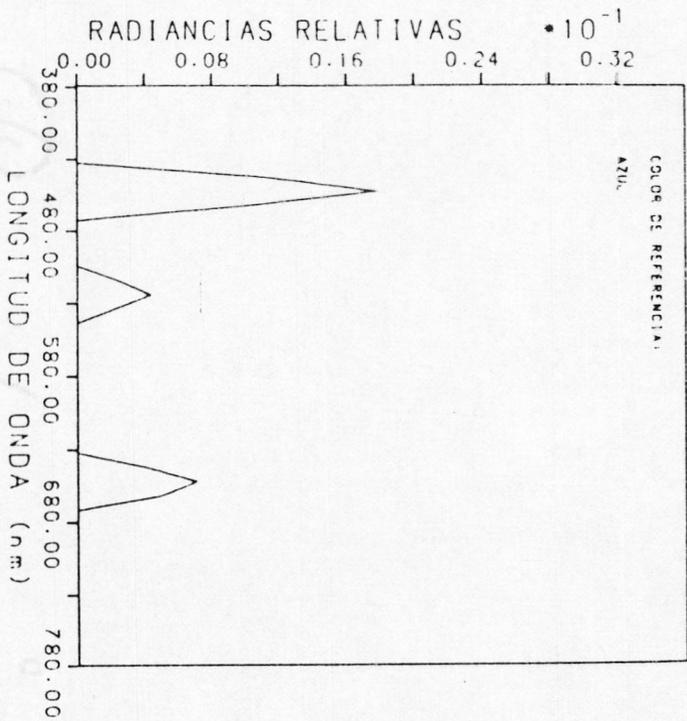


Figura 6.1.a

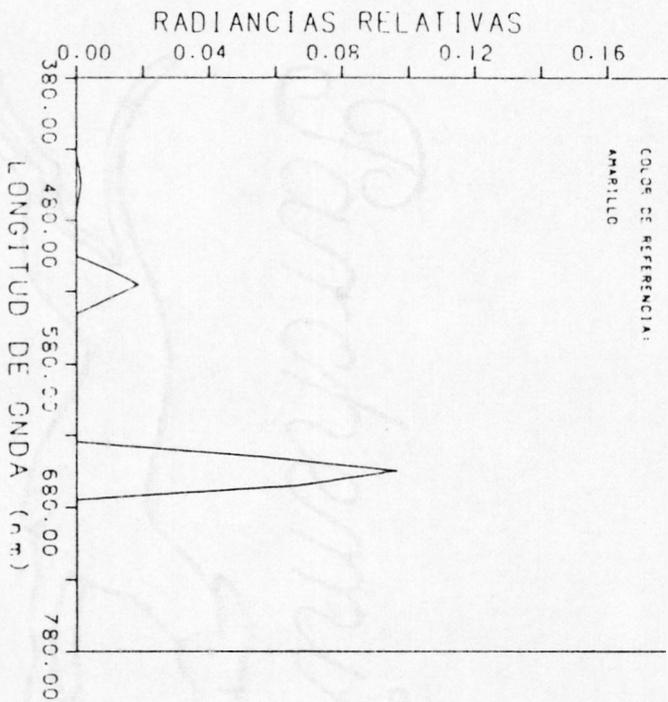


Figura 6.1.d

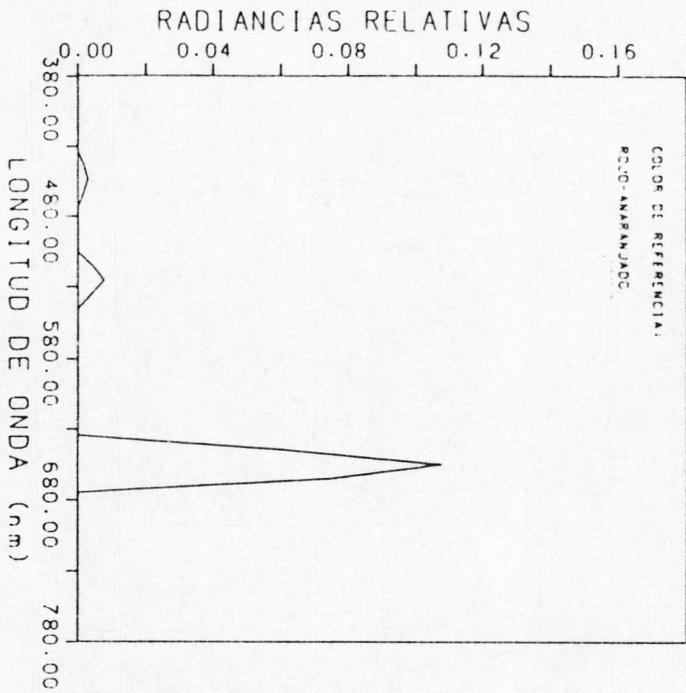


Figura 6.1.c

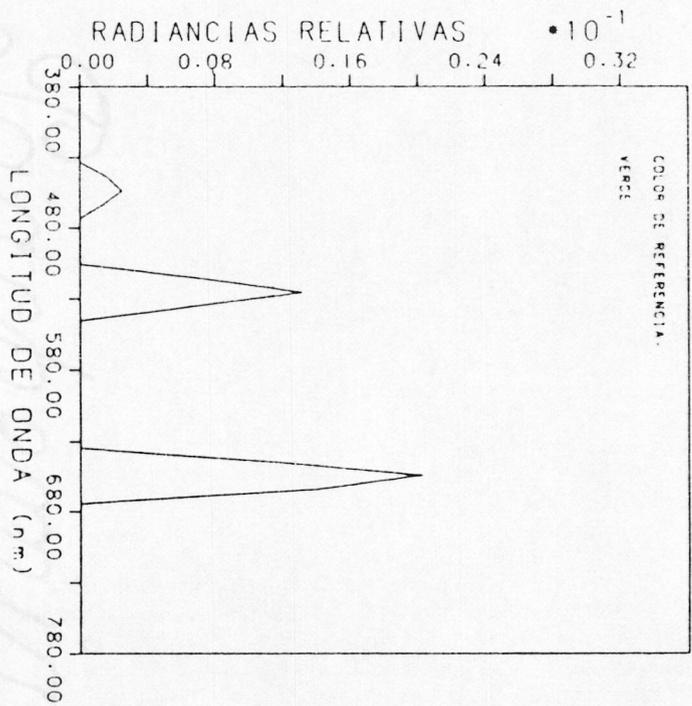


Figura 6.1.e

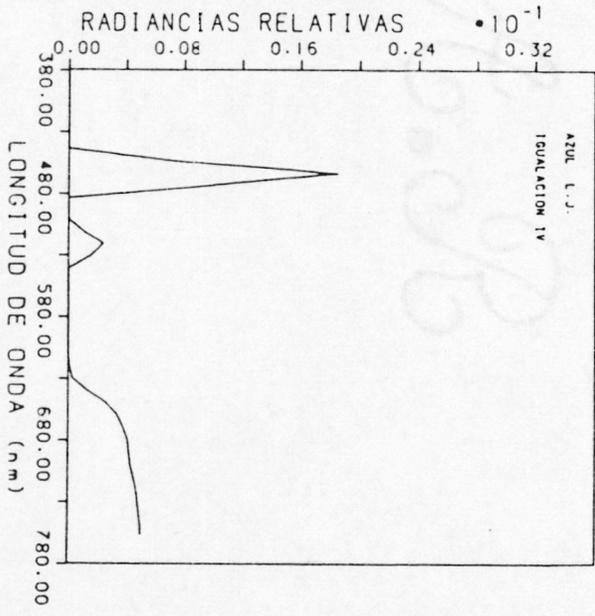
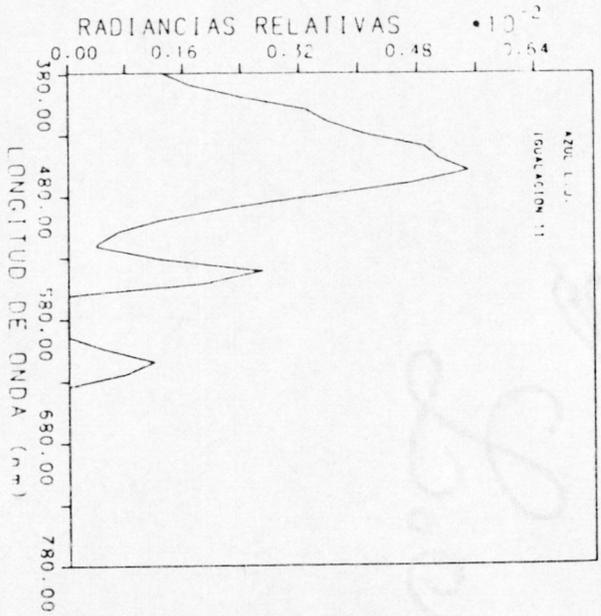
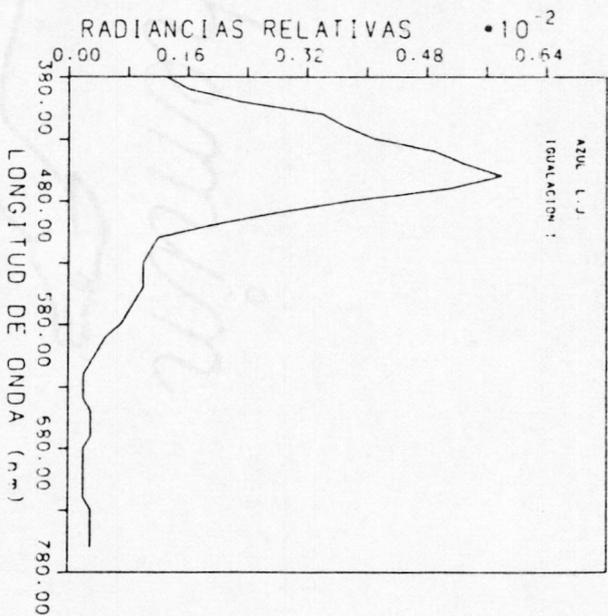
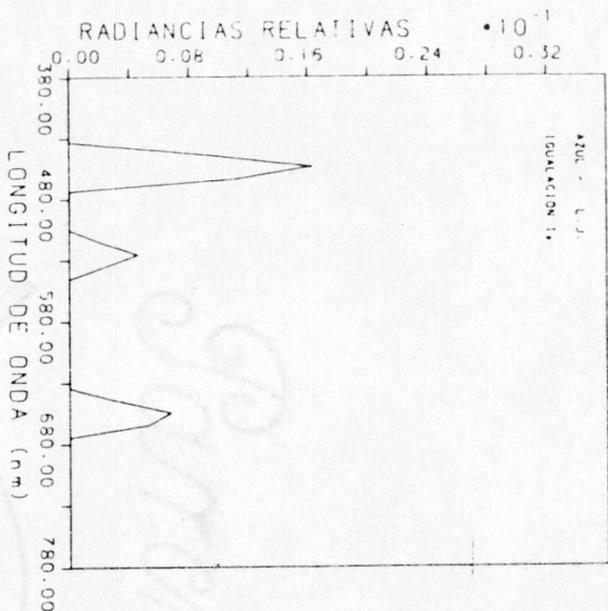


Figura 6.2.a



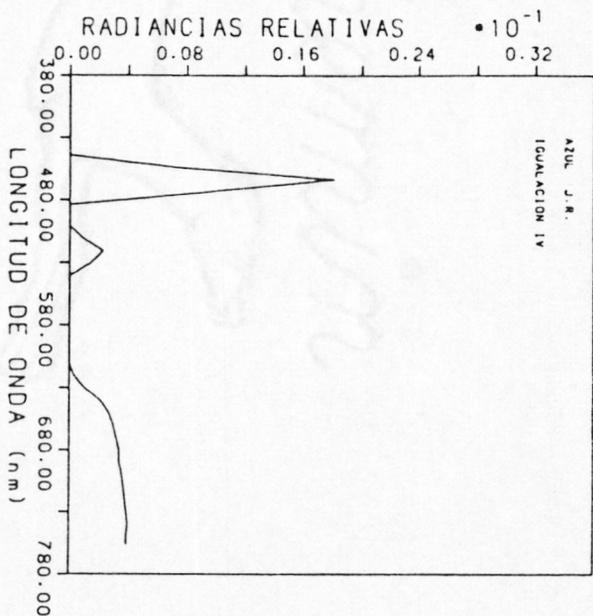
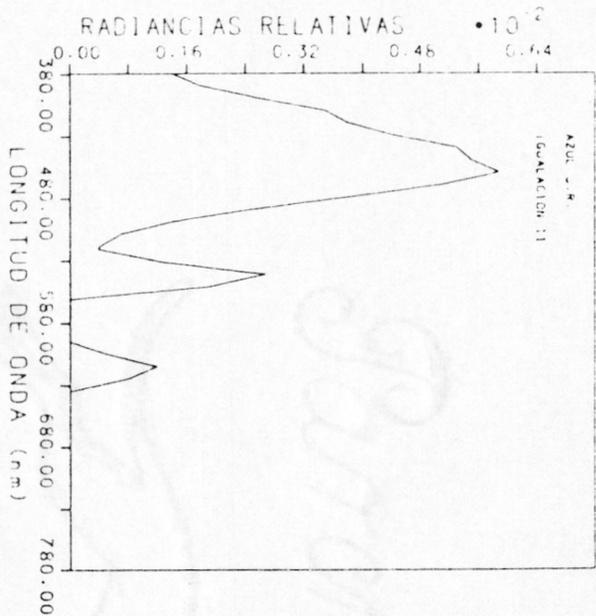


Figura 6.2.b

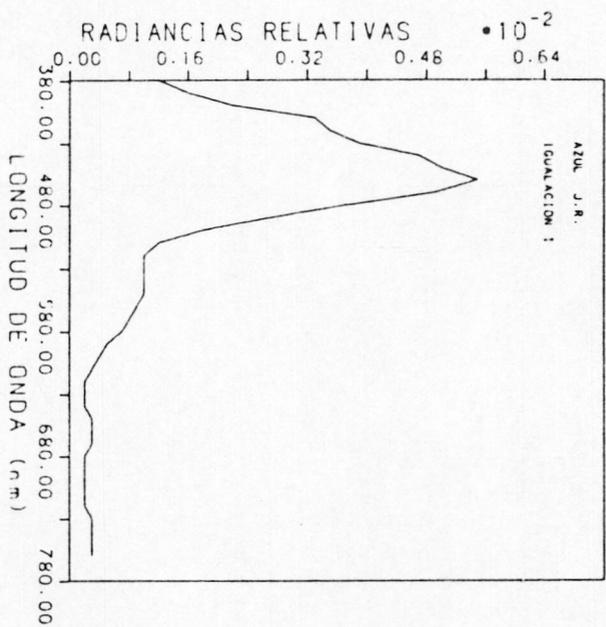
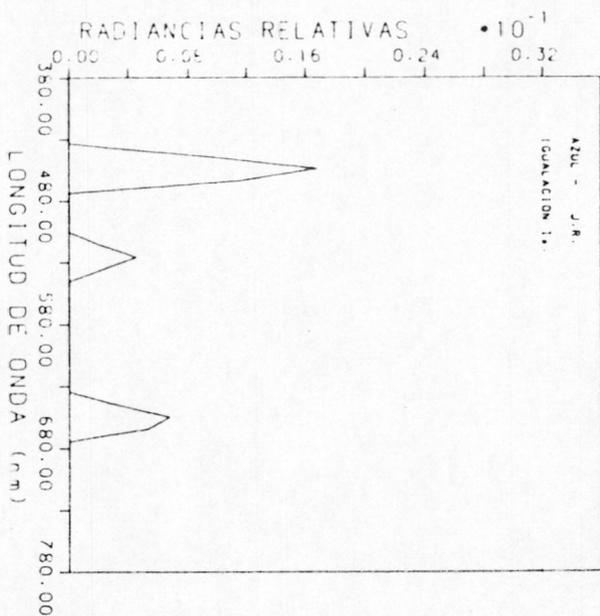


TABLA 6-I. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Nimeroff y Yurow, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo AZUL-PURPURINO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00029	0.00006	0.00047	0.029
	Metám. I	0.0091	0.0123	0.0133	0.186
	Metám. II	0.0099	0.0169	0.0138	0.200
	Metám. IV	0.0084	0.0060	0.0151	0.172
J.R.	"C. Isóm."	0.00023	0.00006	0.00036	0.026
	Metám. I	0.0095	0.0125	0.0139	0.189
	Metám. II	0.0094	0.0166	0.0129	0.197
	Metám. IV	0.0085	0.0065	0.0150	0.173
E.H.	Metám. I	0.0092	0.0125	0.0137	0.188

TABLA 6-VI. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Lozano, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo AZUL-PURPURINO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00009	0.00001	0.00271	0.053
	Metám. I	0.2396	0.0015	5.933	2.485
	Metám. II	0.2399	0.0017	5.938	2.486
	Metám. IV	0.4169	0.0028	10.650	3.326
J.R.	"C. Isóm."	0.00009	0.00001	0.00266	0.053
	Metám. I	0.2397	0.0015	5.936	2.485
	Metám. II	0.2396	0.0017	5.931	2.484
	Metám. IV	0.4169	0.0028	10.650	3.326
E.H.	Metám. I	0.2400	0.0015	5.938	2.486

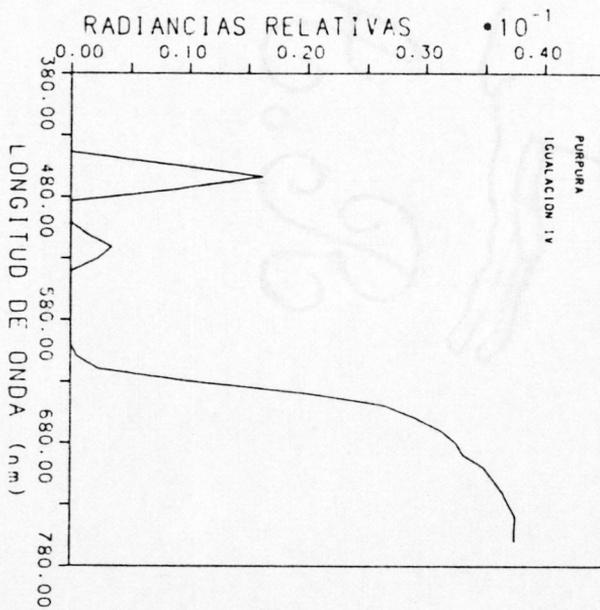
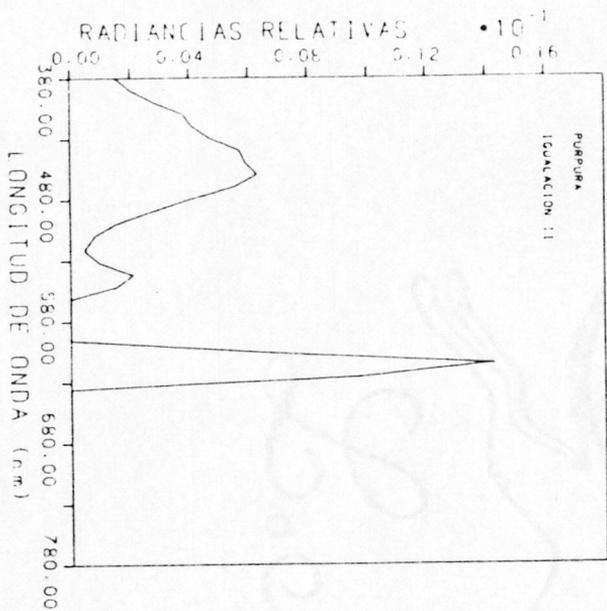
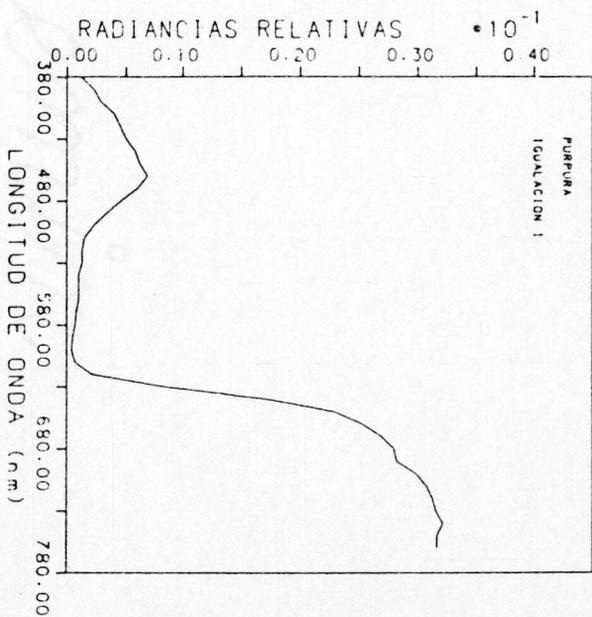
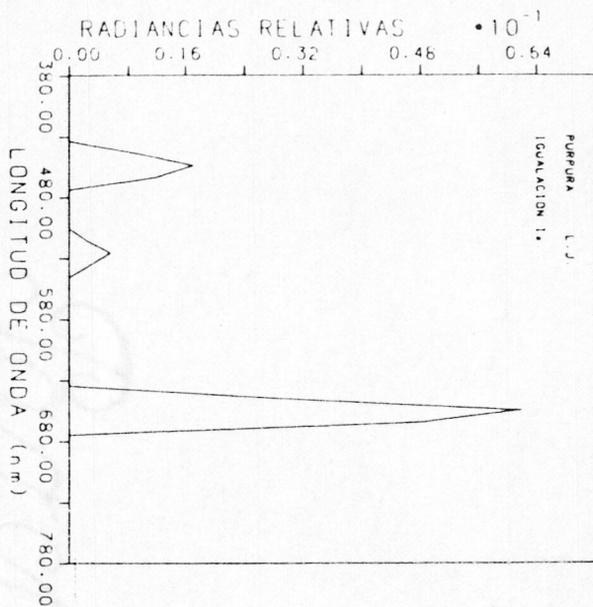


Figura 6.3.a



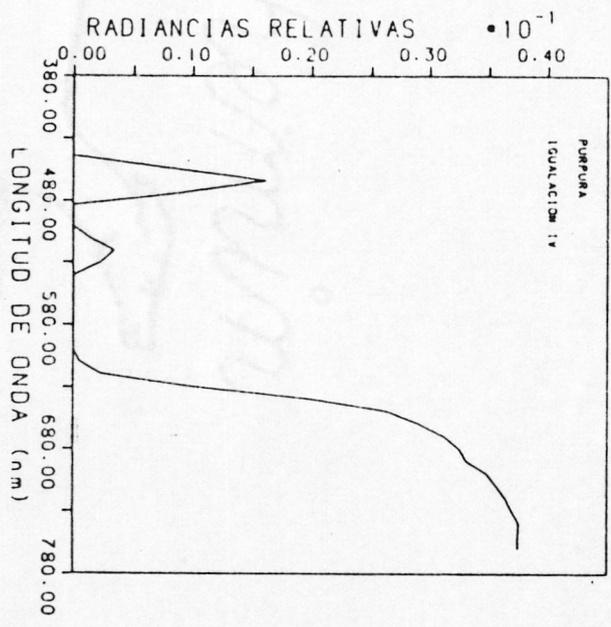
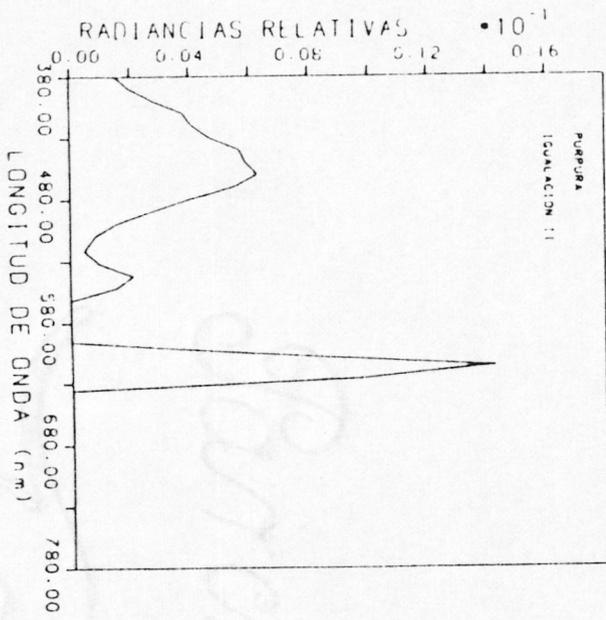


Figura 6.3.b

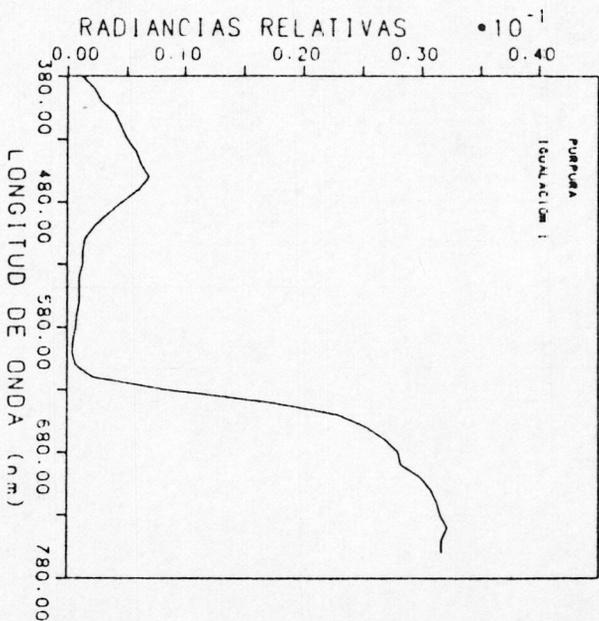
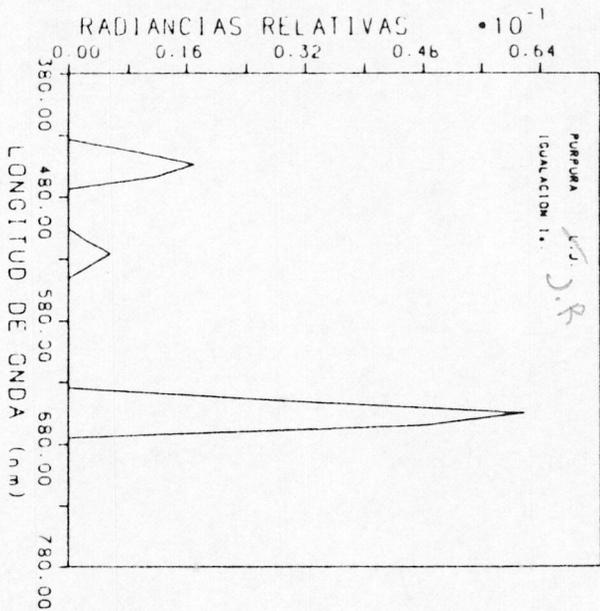


TABLA 6-II. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Nimeroff y Yurow, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo PURPURA-ROJIZO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00025	0.00017	0.00034	0.027
	Metám. I	0.0074	0.0073	0.0115	0.162
	Metám. II	0.0294	0.0249	0.0121	0.258
	Metám. IV	0.0075	0.0054	0.0133	0.162
J.R.	"C. Isóm."	0.00022	0.00015	0.00033	0.026
	Metám. I	0.0074	0.0073	0.0115	0.162
	Metám. II	0.0294	0.0249	0.0121	0.258
	Metám. IV	0.0075	0.0054	0.0133	0.162
E.H.	"C. Isóm."	0.00024	0.00017	0.00033	0.027
	Metám. IV	0.0073	0.0052	0.0133	0.161

TABLA 6-VII. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Lozano, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo PURPURA-ROJIZO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00016	0.00002	0.00283	0.055
	Metám. I	0.2423	0.0020	5.951	2.489
	Metám. II	0.2493	0.0037	5.935	2.488
	Metám. IV	0.4182	0.0032	10.590	3.318
J.R.	"C. Isóm."	0.00017	0.00002	0.00289	0.055
	Metám. I	0.2423	0.0020	5.951	2.489
	Metám. II	0.2493	0.0037	5.935	2.488
	Metám. IV	0.4182	0.0032	10.590	3.318
E.H.	"C. Isóm."	0.00015	0.00002	0.00279	0.054
	Metám. IV	0.4181	0.0032	10.570	3.315

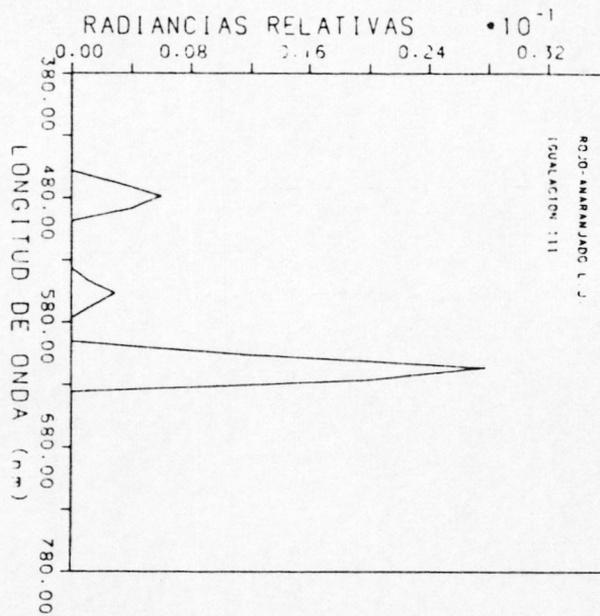
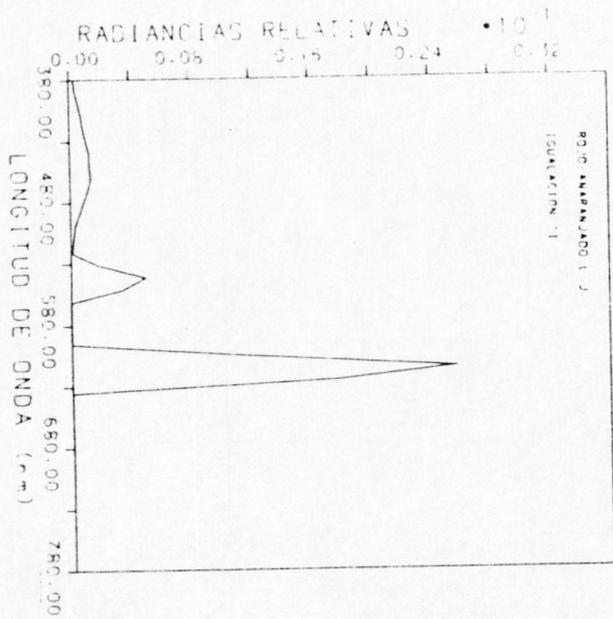
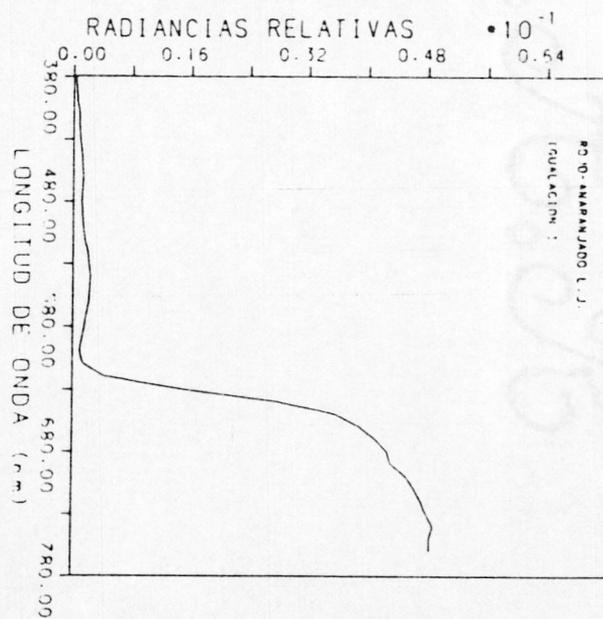
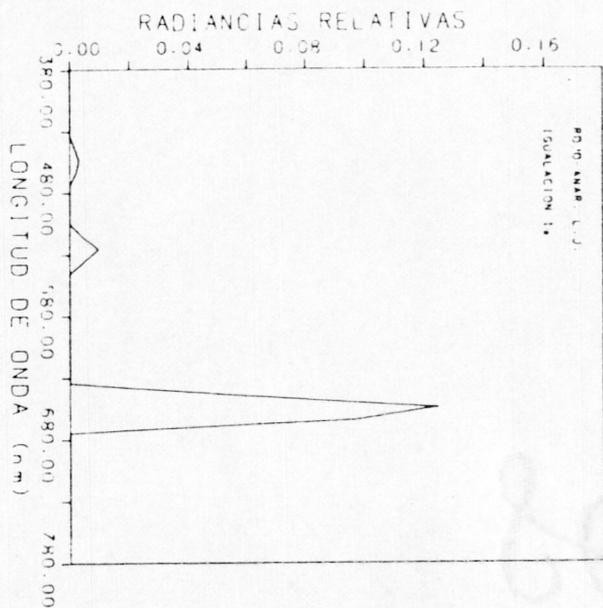


Figura 6.4.a



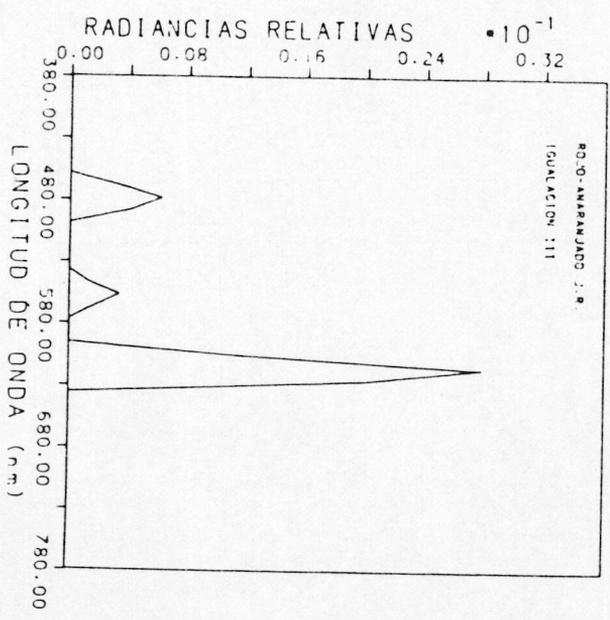
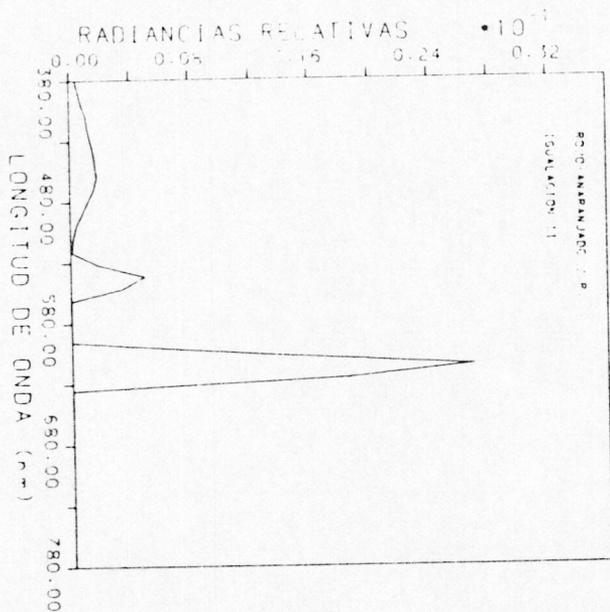


Figura 6.4.b

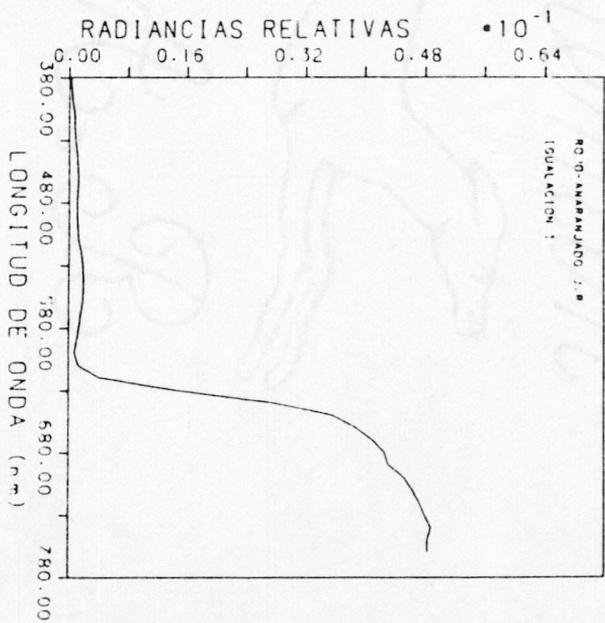
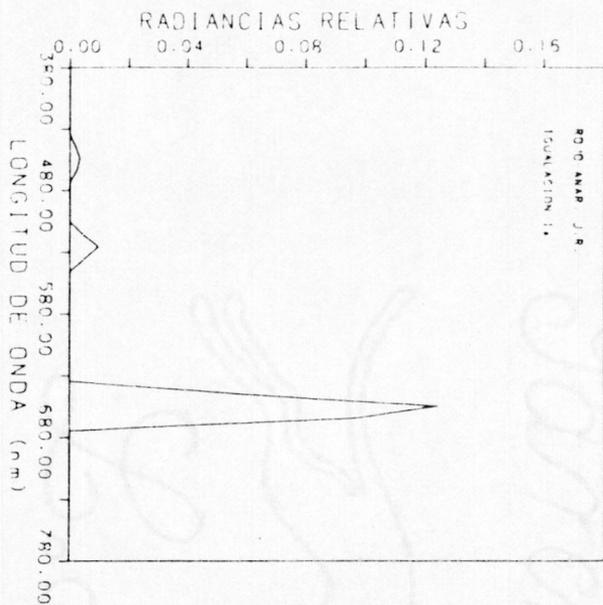


TABLA 6-III. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Nimeroff y Yurow, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo ROJO-ANARANJADO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isom."	0.00049	0.00047	0.00040	0.037
	Metám. I	0.0128	0.0092	0.0090	0.176
	Metám. II	0.0520	0.0340	0.0084	0.307
	Metám. III	0.0552	0.0368	0.0520	0.379
J.R.	"C. Isóm."	0.00049	0.00047	0.0010	0.044
	Metám. I	0.0127	0.0092	0.0090	0.176
	Metám. II	0.0541	0.0355	0.0086	0.315
	Metám. III	0.0552	0.0371	0.0538	0.382
E.H.	Metám. II	0.0538	0.0350	0.0083	0.312

TABLA 6-VIII. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Lozano, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo ROJO-ANARANJADO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C Isóm."	0.00038	0.00035	0.00307	0.062
	Metám. I	0.2554	0.0194	5.937	2.492
	Metám. II	0.3075	0.0420	5.909	2.502
	Metám. III	0.5085	0.0596	12.120	3.563
J.R.	"C. Isóm."	0.00041	0.00022	0.00245	0.056
	Metám. I	0.2558	0.0199	5.937	2.493
	Metám. II	0.3035	0.0392	5.949	2.508
	Metám. III	0.5046	0.0594	12.120	3.562
E.H.	Metám. II	0.3049	0.0411	5.926	2.504

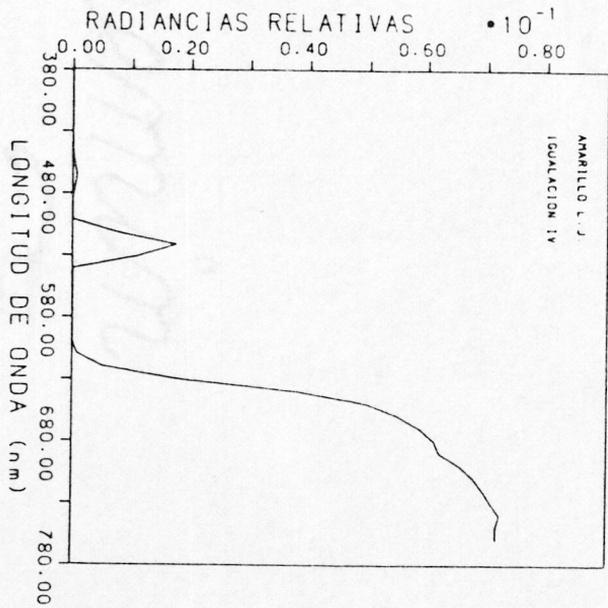
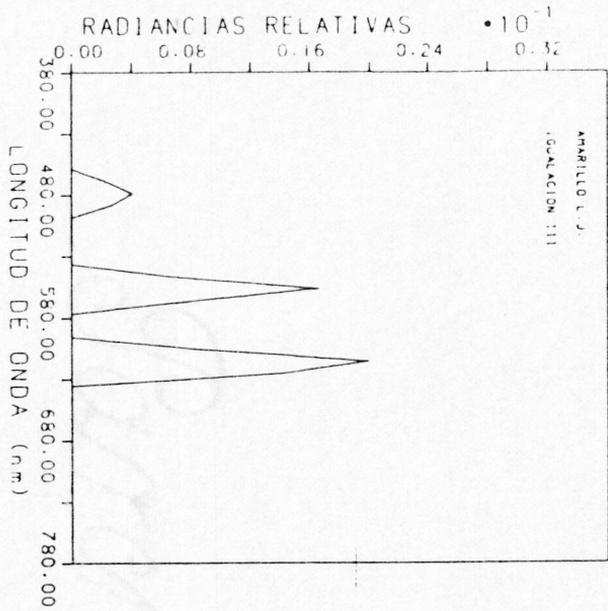
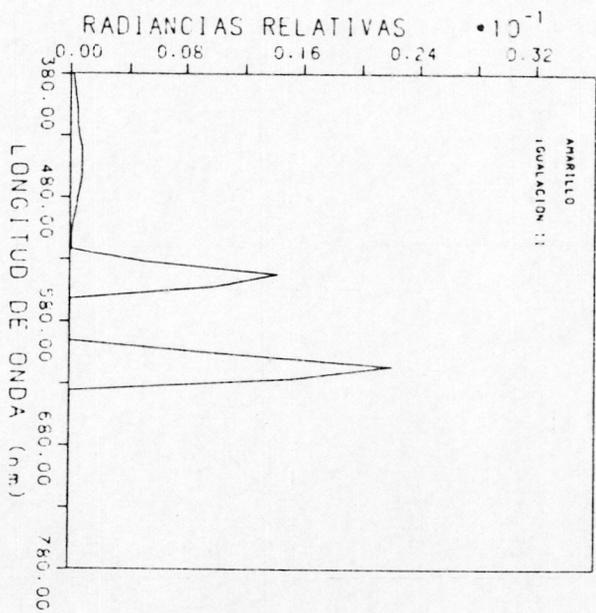
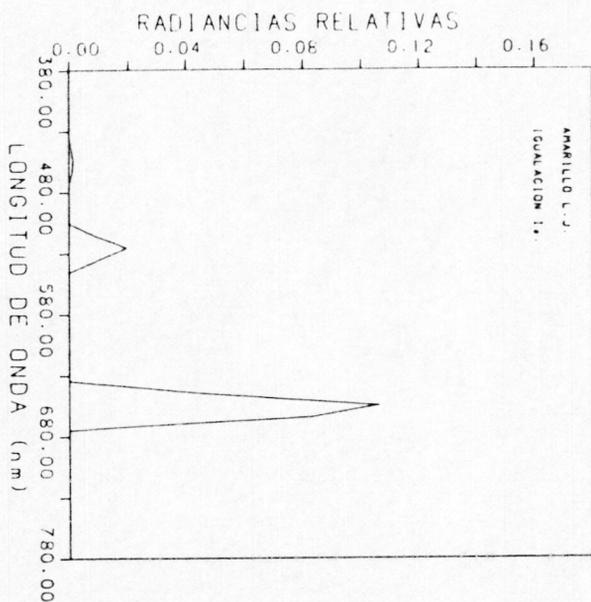


Figura 6.5.a



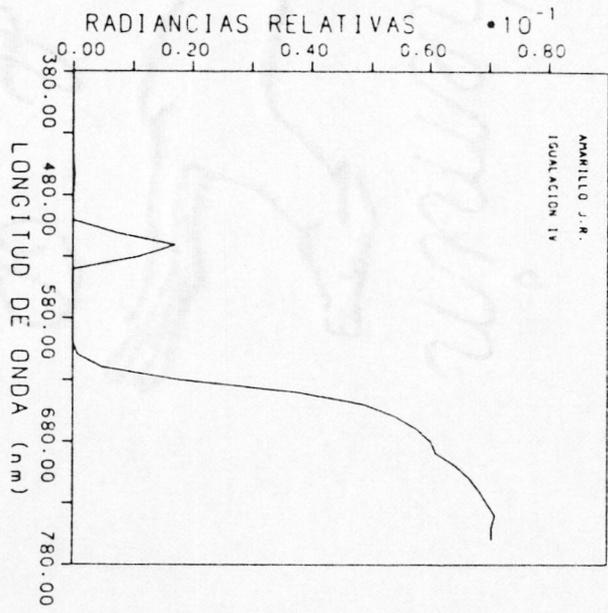
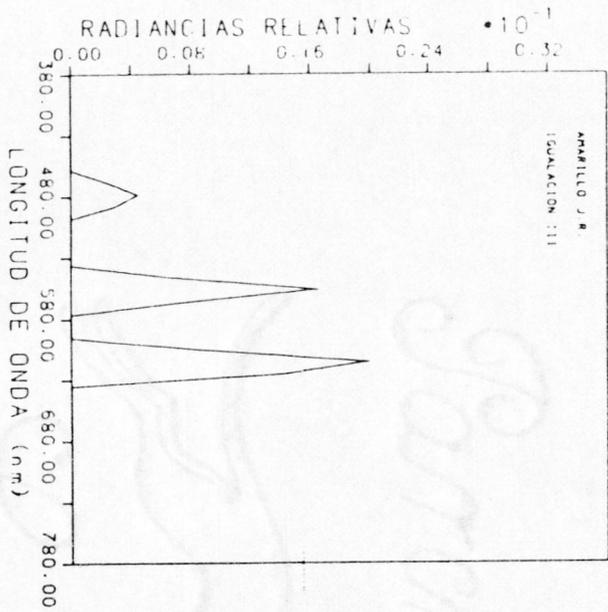


Figura 6.5.b

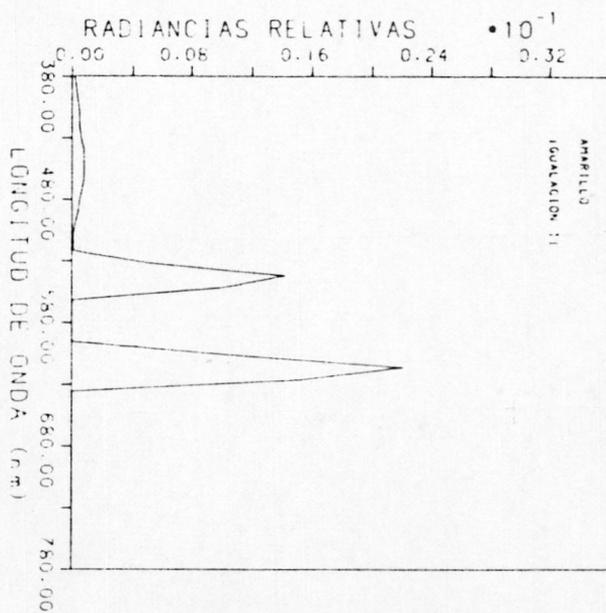
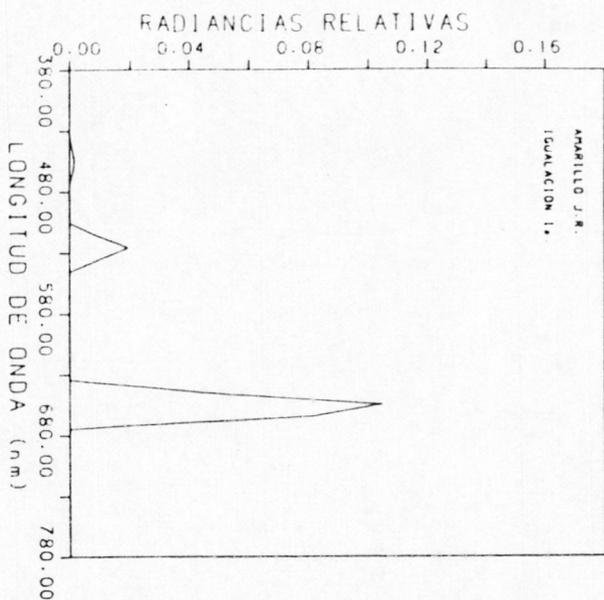


TABLA 6-IV. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Nimeroff y Yurow, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo AMARILLO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00025	0.00015	0.00016	0.024
	Metám. II	0.0471	0.0267	0.0073	0.285
	Metám. III	0.0459	0.0362	0.0473	0.360
	Metám. IV	0.0109	0.0038	0.0096	0.156
J.R.	"C. Isóm."	0.00023	0.00015	0.00040	0.028
	Metám. II	0.0471	0.0267	0.0073	0.285
	Metám. III	0.0459	0.0362	0.0538	0.369
	Metám. IV	0.0109	0.0038	0.0131	0.167
E.H.	Metám. IV	0.0112	0.0038	0.0103	0.159

TABLA 6-IX. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Lozano, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo AMARILLO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00012	0.00090	0.00190	0.054
	Metám. II	0.2739	0.1210	5.9080	2.511
	Metám. III	0.4699	0.1785	12.1100	3.572
	Metám. IV	0.4259	0.0257	10.6400	3.331
J.R.	"C. Isóm. "	0.00011	0.00151	0.00173	0.058
	Metám. II	0.2739	0.1210	5.908	2.511
	Metám. III	0.4680	0.1719	12.110	3.571
	Metám. IV	0.4281	0.0596	10.710	3.346
E.H.	Metám. IV	0.4280	0.0362	10.6100	3.328

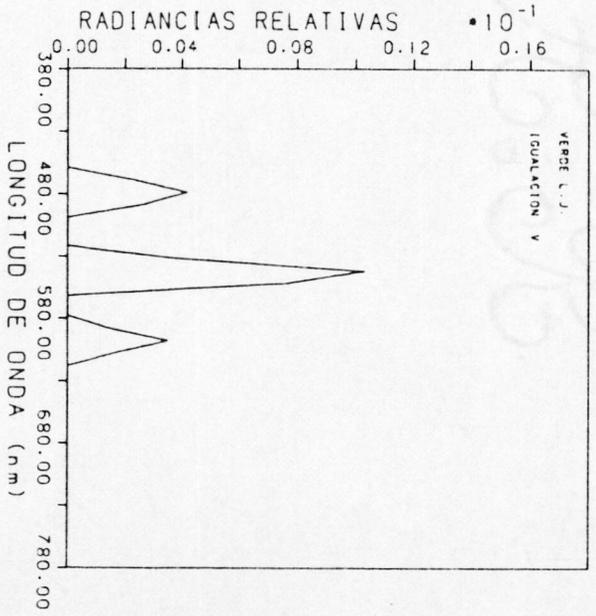
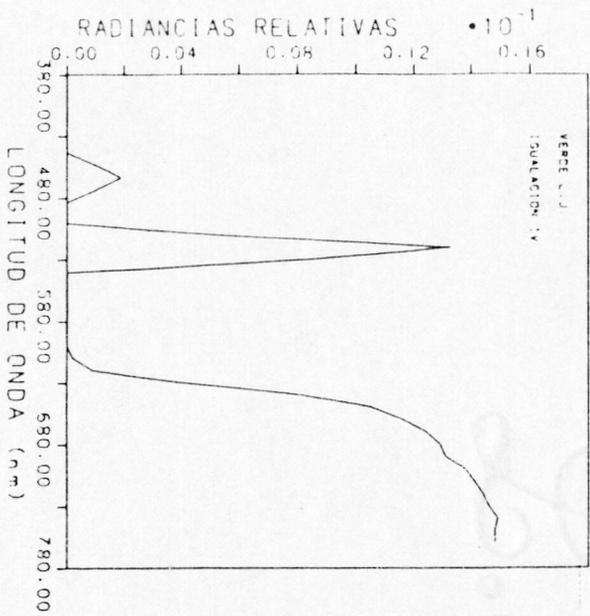
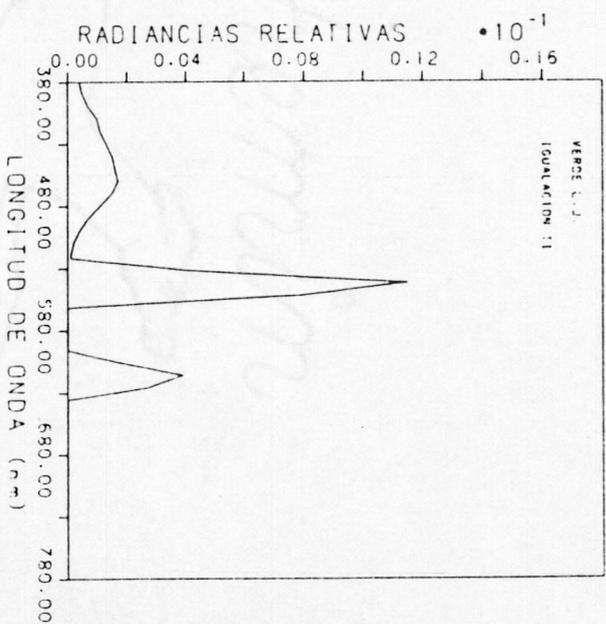
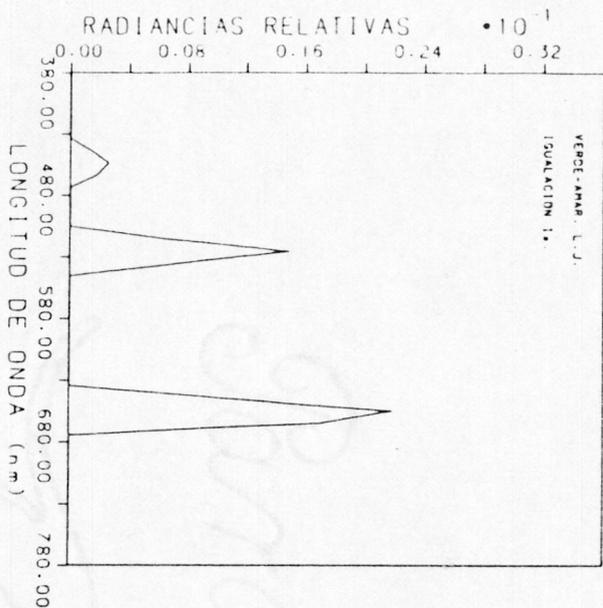


Figura 6.6.a



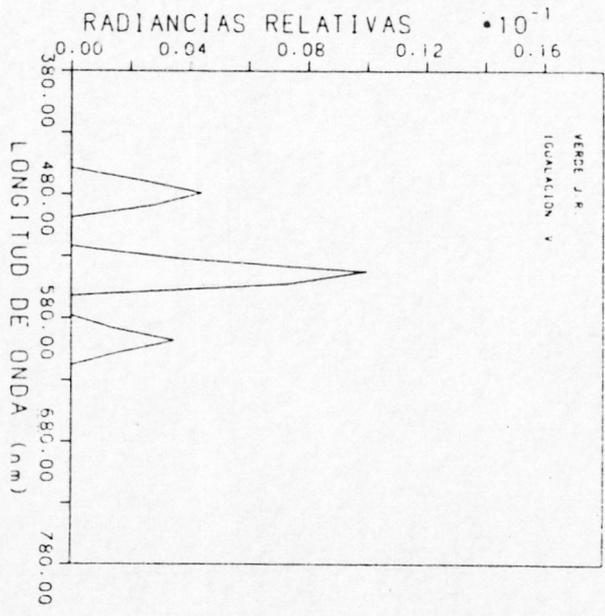
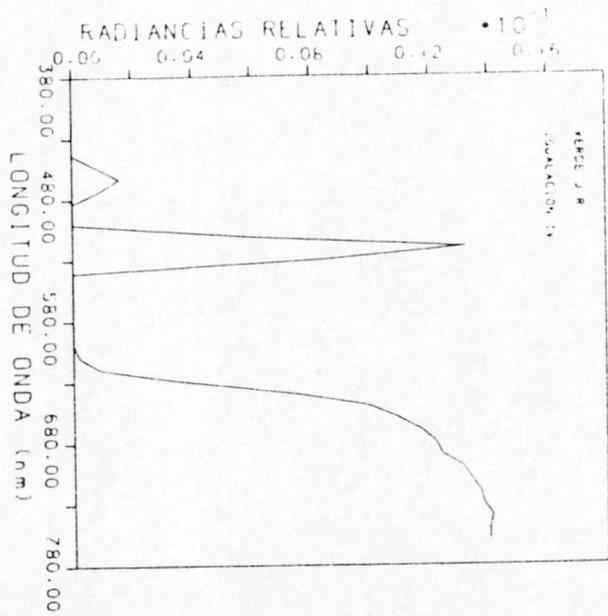


Figura 6.6.b

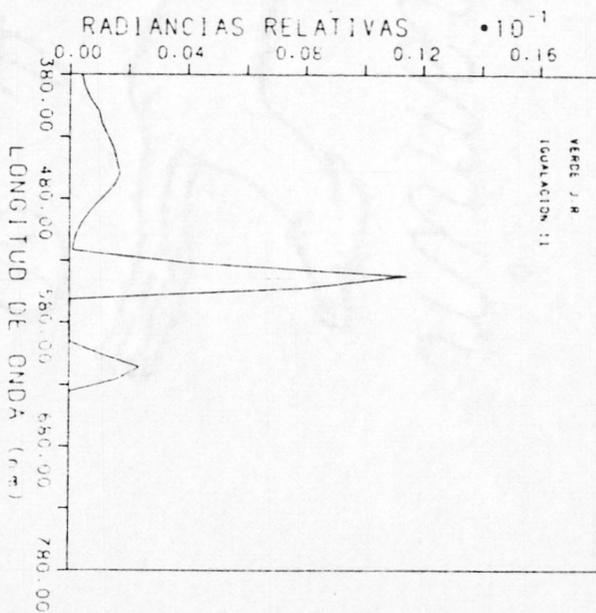
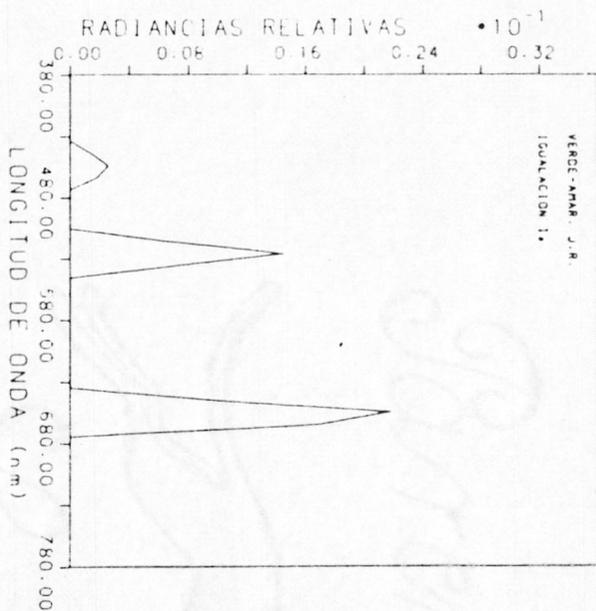


TABLA 6-V. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Nimeroff y Yurow, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo VERDE-AMARILLENTO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00017	0.00031	0.00032	0.028
	Metám. II	0.0316	0.0353	0.0081	0.274
	Metám. IV	0.0065	0.0027	0.0102	0.140
	Metám. V	0.0287	0.0317	0.0341	0.307
J.R.	"C. Isóm."	0.00017	0.00022	0.00032	0.027
	Metám. II	0.0269	0.0349	0.0081	0.264
	Metám. IV	0.0064	0.0027	0.0115	0.144
	Metám. V	0.0282	0.0307	0.0355	0.307
E.H.	Metám. V	0.0280	0.0310	0.0350	0.307

TABLA 6-X. Grados de metamerismo, evaluados según el índice propuesto por Lozano, de las igualaciones realizadas por cada observador para el estímulo VERDE-AMARILLENTO.

OBSERVADOR	IGUALACION	M_x^2	M_y^2	M_z^2	M_t
L.J.	"C. Isóm."	0.00014	0.00031	0.00342	0.062
	Metám. II	0.2446	0.0551	5.922	2.494
	Metám. IV	0.4164	0.0089	10.590	3.319
	Metám. V	0.4315	0.0718	12.040	3.542
J.R.	"C. Isóm."	0.00014	0.00030	0.00342	0.062
	Metám. II	0.2440	0.0550	5.922	2.494
	Metám. IV	0.4167	0.0106	10.600	3.321
	Metám. V	0.4312	0.0699	12.040	3.541
E.H.	Metám. V	0.4310	0.0700	12.040	3.451

6.2 UMBRALES DIFERENCIALES DE CROMATICIDAD

En este apartado exponemos los parámetros característicos resultantes de la determinación experimental de los umbrales diferenciales de cromaticidad para todos los colores estudiados y cada uno de los observadores.

Como ya se indicó, se han realizado tres igualciones metámeras para cada estímulo y una "cuasi-isómera" con objeto de poder comparar los resultados respecto a ésta última. Los umbrales diferenciales correspondientes se han caracterizado por las áreas de las secciones principales del elipsoide de error así como por su centro, área, orientación del semieje mayor de las mismas respecto al eje x y relación de semiejes.

En las tablas 6-XI (a-b-c-d) a 6-XV (a-b-c-d) se presentan los resultados para los estímulos de color estudiados en cada igualación por los observadores L.J. y J.R. (en los cuatro sistemas de representación planteados en las memoria), así como aquellos en los que se ha empleado un tercer observador, E.H., para verificar o no las tendencias aparecidas en los dos anteriores.

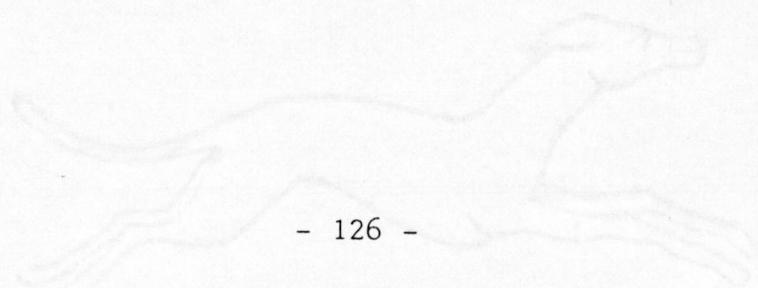
A continuación de dichas tablas se muestran las representaciones gráficas correspondientes a cada uno de ellos, figuras 6.7 (a-b-c) a 6.26 (a-b), donde en uno de los puntos extremos del semieje mayor de cada elipse se ha simbolizado la igualación con la cual se ha medido el umbral diferencial de cromaticidad.

Por último, en las figuras 6.27 (a-b) a 6.30 (a-b) se ha realizado una representación conjunta de todos los resultados de un mismo observador para los cuatro sistemas de especificación del color. También se han representado los puntos

L. A. B.

correspondientes a los colores que se han estudiado como estímulos de referencia (en estas figuras, las elipses se han dibujado con un área cuatro veces mayor que la real con el fin de visualizar mejor las elipses de menor tamaño).

Parochemin



L. A. B.

TABLA 6-XI.a Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AZUL-PURPURINO en el sistema de representación CIE-1931.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C. Isom."	x=0.178 y=0.114 Y=1.020	($\times 10^{-4}$) 1.12	74.4°	0.33
	Metám. I	x=0.181 y=0.142 Y=1.008	0.80	63.0°	0.27
	Metám. II	x=0.180 y=0.136 Y=1.024	0.28	67.4°	0.29
	Metám. IV	x=0.185 y=0.109 Y=0.803	0.76	56.2°	0.42
J.R.	"C. Isom."	x=0.177 y=0.112 Y=1.024	1.30	75.5°	0.32
	Metám. I	x=0.181 y=0.142 Y=1.014	1.25	64.4°	0.22
	Metám. II	x=0.179 y=0.135 Y=1.028	0.28	70.7°	0.14
	Metám. IV	x=0.176 y=0.103 Y=0.739	0.41	66.3°	0.36
E.H.	Metám. I	x=0.180 y=0.142 Y=1.012	0.86	63.9°	0.26

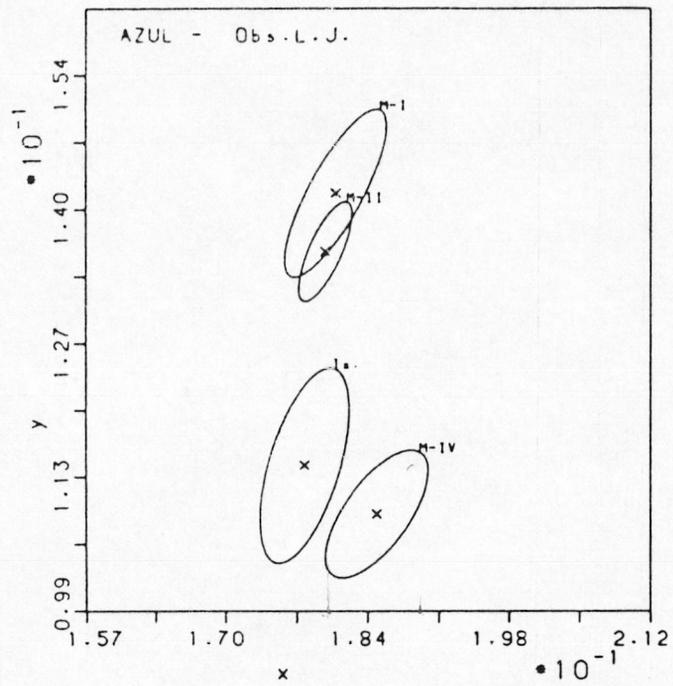


Figura 6.7.a

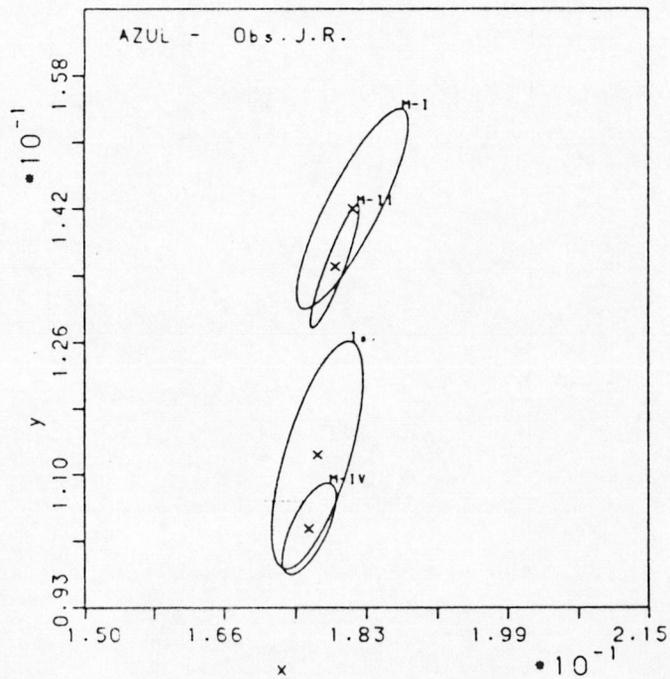


Figura 6.7.b

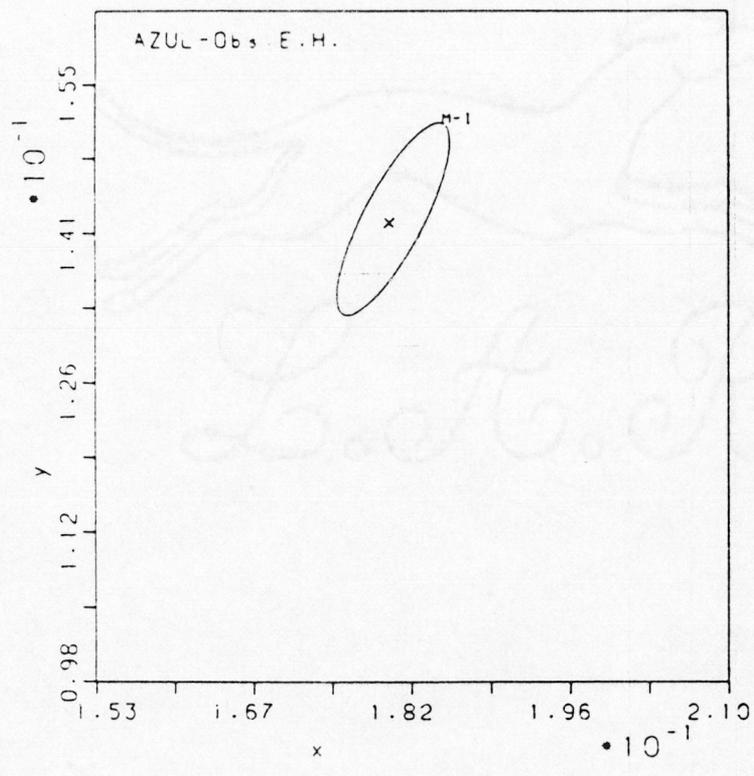


Figura 6.7.c

TABLA 6-XI.b. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AZUL-PURPURINO en el sistema de representación UCS-CIE 1960.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u=0.177 v=0.170 L=1.020	($\times 10^{-4}$) 1.26	106.2°	0.36
	Metám. I	u=0.166 v=0.196 L=1.008	0.70	88.9°	0.38
	Metám. II	u=0.169 v=0.191 L=1.024	0.25	96.0°	0.38
	Metám. IV	u=0.189 v=0.166 L=0.803	0.91	88.7°	0.59
J.R.	"C. Isóm."	u=0.177 v=0.169 L=1.024	1.47	106.0°	0.35
	Metám. I	u=0.166 v=0.196 L=1.014	1.10	90.1°	0.30
	Metám. II	u=0.169 v=0.190 L=1.028	0.26	98.0°	0.18
	Metám. IV	u=0.181 v=0.160 L=0.739	0.50	98.3°	0.43

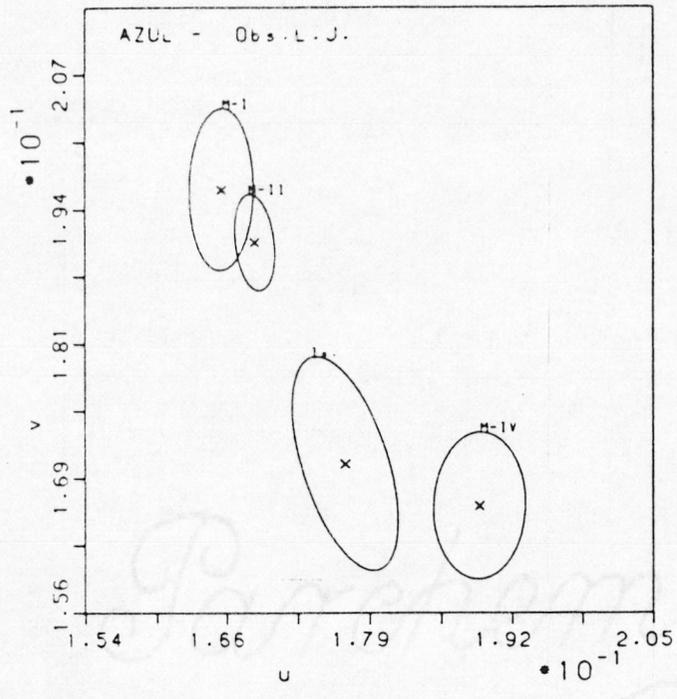


Figura 6.8.a

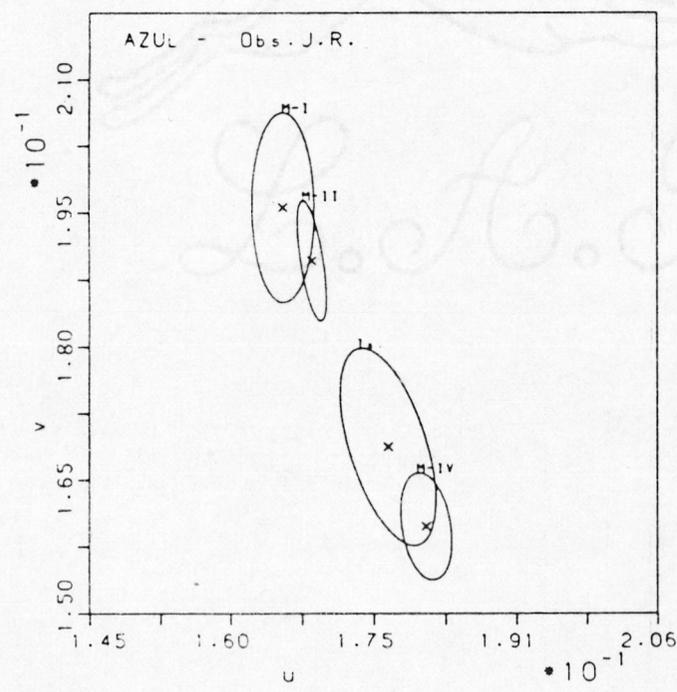


Figura 6.8.b

TABLA 6-XI.c. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AZUL-PURPURINO en el sistema de representación CIELUV.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u* = - 8.55 v* = -55.88 L* = 19.69	12.31	99.9°	0.25
	Metám. I	u* = -11.28 v* = -45.57 L* = 19.56	6.79	89.3°	0.25
	Metám. II	u* = -10.76 v* = -48.01 L* = 19.74	2.54	93.8°	0.25
	Metám. IV	u* = - 4.84 v* = -49.61 L* = 16.96	6.37	88.9°	0.39
J.R.	"C. Isóm."	u* = - 8.66 v* = -56.66 L* = 19.75	14.53	100.1°	0.24
	Metám. I	u* = -11.29 v* = -45.84 L* = 19.63	10.89	90.1°	0.20
	Metám. II	u* = -10.82 v* = -48.54 L* = 19.79	2.59	95.3°	0.12
	Metám. IV	u* = - 6.16 v* = -48.96 L* = 16.07	3.17	94.2°	0.29

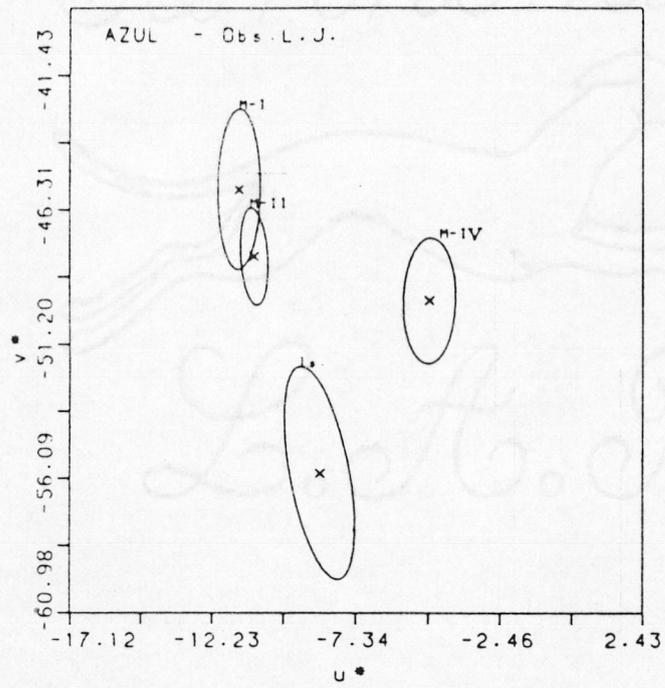


Figura 6.9.a

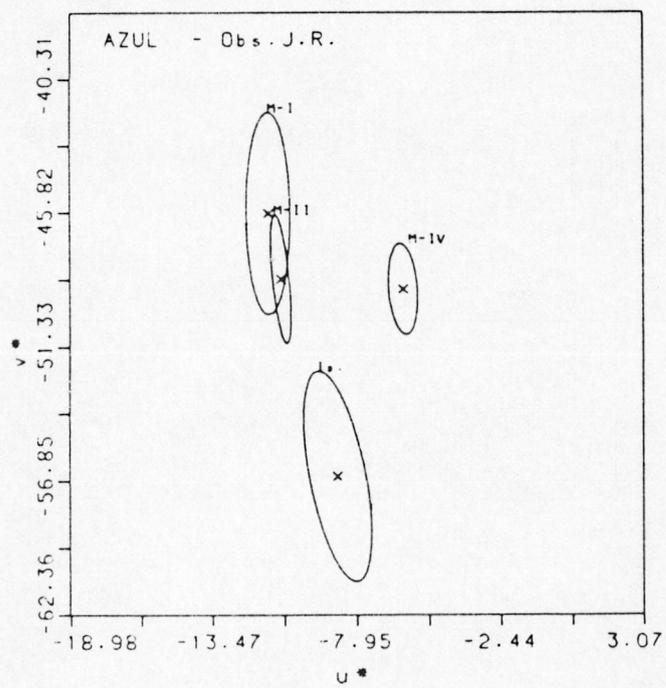


Figura 6.9.b

TABLA 6-XI.d. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AZUL-PURPURINO en el sistema de representación CIELAB.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	a* = 24.62 b* = -51.69 L* = 19.69	17.64	-41.0°	0.16
	Metám. I	a* = 12.70 b* = -41.87 L* = 19.56	8.75	129.7°	0.22
	Metám. II	a* = 15.10 b* = -43.94 L* = 19.74	3.27	133.6°	0.20
	Metám. IV	a* = 27.70 b* = -49.21 L* = 16.96	10.78	-44.8°	0.26
J.R.	"C. Isóm."	a* = 25.11 b* = -52.42 L* = 19.75	21.14	-41.0°	0.15
	Metám. I	a* = 12.85 b* = -42.05 L* = 19.63	13.78	129.6°	0.17
	Metám. II	a* = 15.41 b* = -44.41 L* = 19.79	3.38	133.5°	0.09
	Metám. IV	a* = 26.94 b* = -50.34 L* = 16.07	5.95	-43.2°	0.18

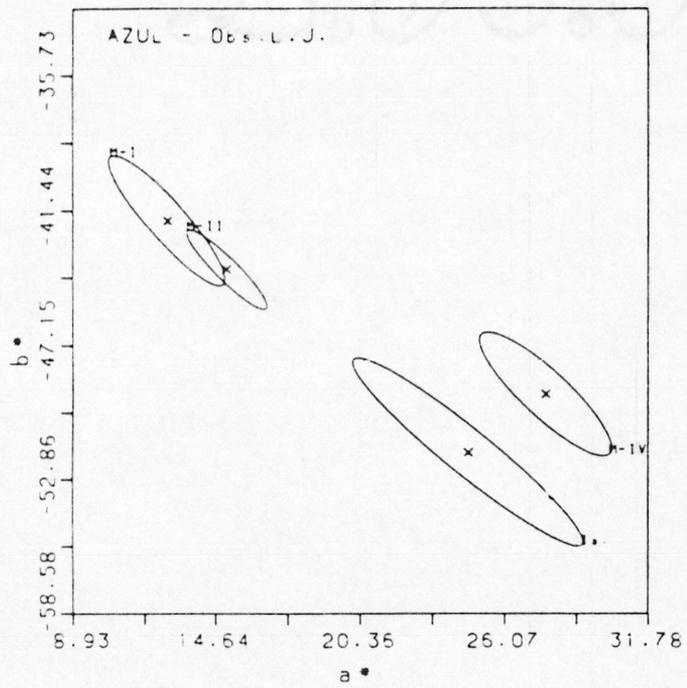


Figura 6.10.a

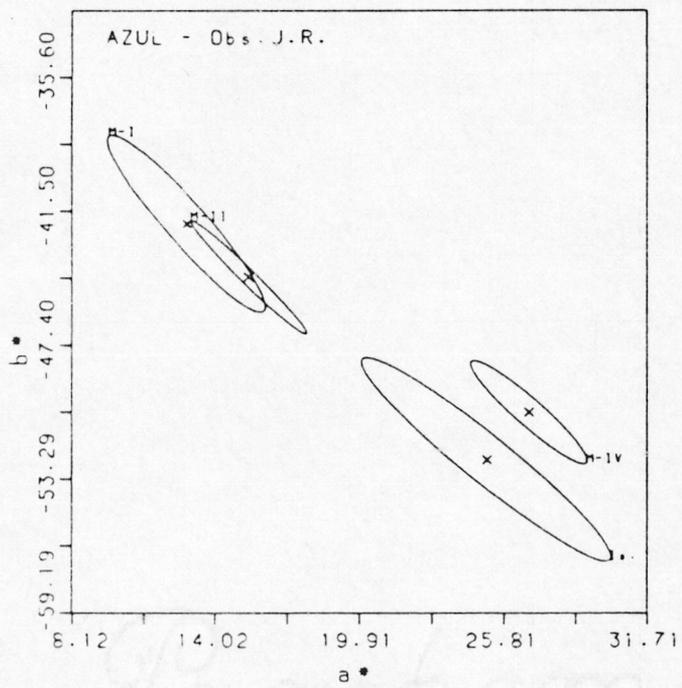


Figura 6.10.b

TABLA 6-XII.a. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo PURPURA-ROJIZO en el sistema de representación CIE-1931

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J	"C.Isom."	x=0.329 y=0.166 Y=2.184	($\times 10^{-4}$) 1.20	39.4°	0.13
	Metám. I	x=0.357 y=0.185 Y=2.339	1.52	26.3°	0.23
	Metám. II	x=0.344 y=0.183 Y=2.192	0.90	23.0°	0.39
	Metám. IV	x=0.385 y=0.186 Y=2.155	1.50	25.2°	0.25
J.R.	"C.Isom."	x=0.328 y=0.164 Y=2.180	2.80	38.7°	0.22
	Metám. I	x=0.358 y=0.186 Y=2.344	2.07	26.4°	0.29
	Metám. II	x=0.344 y=0.183 Y=2.202	2.08	19.5°	0.44
	Metám. IV	x=0.384 y=0.185 Y=2.168	3.34	25.9°	0.25

(continuación TABLA 6-XII.a)

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
E.H.	"C. Isóm."	x=0.327 y=0.165 Y=2.181	1.97	39.3°	0.20
	Metám. IV	x=0.383 y=0.184 Y=2.181	1.99	25.7°	0.25

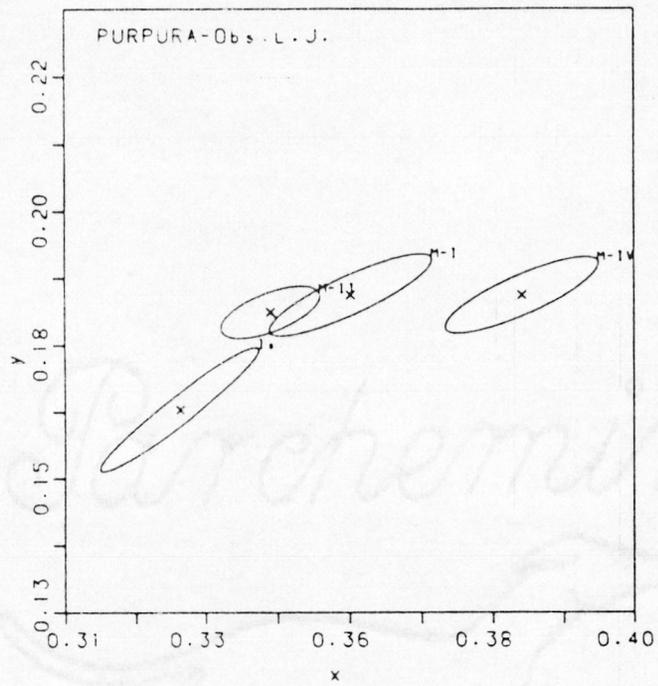


Figura 6.11.a

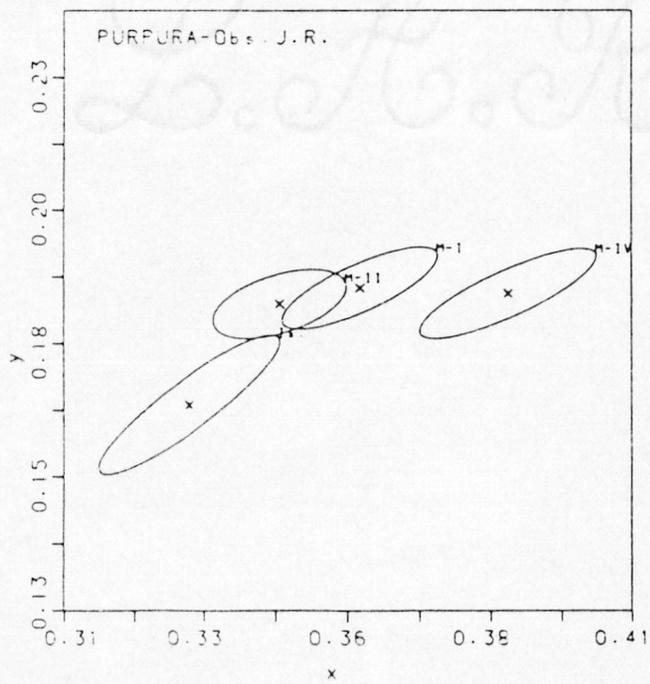


Figura 6.11.b

TABLA 6-XII.b. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo PURPURA-ROJIZO en el sistema de representación UCS-CIE 1960.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u=0.304 v=0.230 L=2.184	($\times 10^{-4}$) 1.06	62.2°	0.30
	Metám. I	u=0.316 v=0.247 L=2.339	1.20	30.5°	0.37
	Metám. II	u=0.305 v=0.244 L=2.192	0.70	16.3°	0.49
	Metám. IV	u=0.345 v=0.250 L=2.155	1.22	27.5°	0.40
J.R.	"C. Isóm."	u=0.303 v=0.228 L=2.180	2.52	59.0°	0.48
	Metám. I	u=0.317 v=0.247 L=2.344	1.62	26.3°	0.46
	Metám. II	u=0.306 v=0.243 L=2.202	1.64	9.8°	0.47
	Metám. IV	u=0.345 v=0.249 L=2.168	1.92	28.8°	0.41

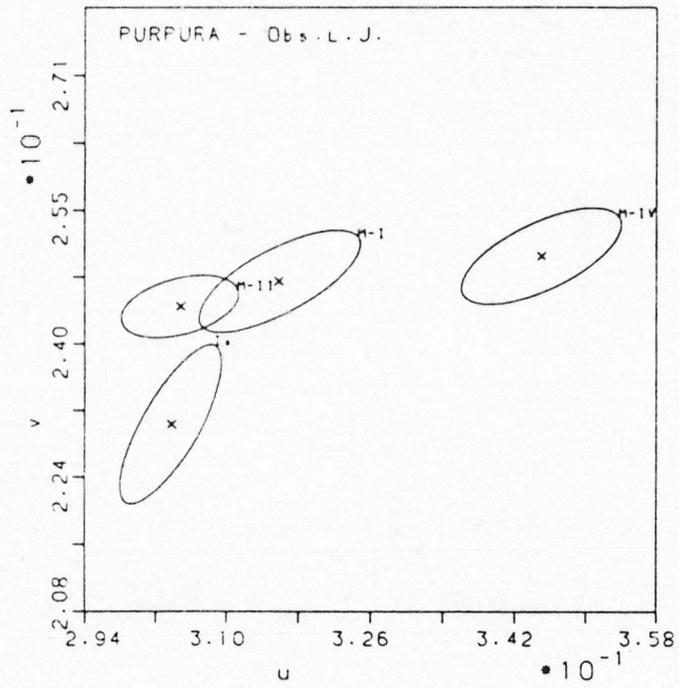


Figura 6.12.a

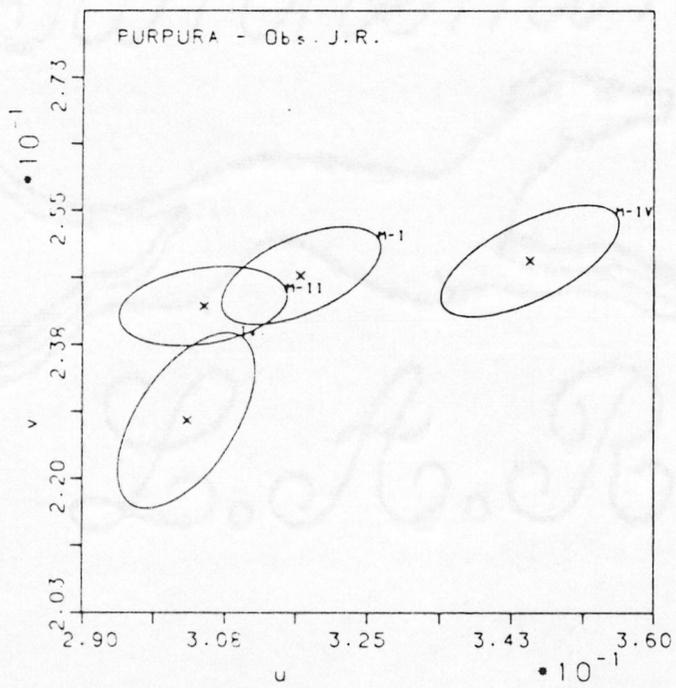


Figura 6.12.b

L.A.B.

TABALA 6-XII.c. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo PURPURA-ROJIZO en el sistema de representación CIELUV.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u* = 36.42 v* = -50.26 L* = 30.01	24.34	71.8°	0.23
	Metám. I	u* = 42.71 v* = -41.90 L* = 31.08	29.06	45.8°	0.40
	Metám. II	u* = 36.88 v* = -42.39 L* = 30.06	16.15	33.2°	0.65
	Metám. IV	u* = 52.15 v* = -38.25 L* = 29.80	27.44	43.6°	0.46
J.R.	"C. Isóm."	u* = 36.19 v* = -51.07 L* = 29.98	56.90	71.5°	0.36
	Metám. I	u* = 43.10 v* = -41.78 L* = 31.10	39.57	44.2°	0.52
	Metám. II	u* = 37.21 v* = -42.50 L* = 30.13	37.73	22.1°	0.66
	Metám. IV	u* = 52.19 v* = -38.84 L* = 29.89	43.74	45.2°	0.46

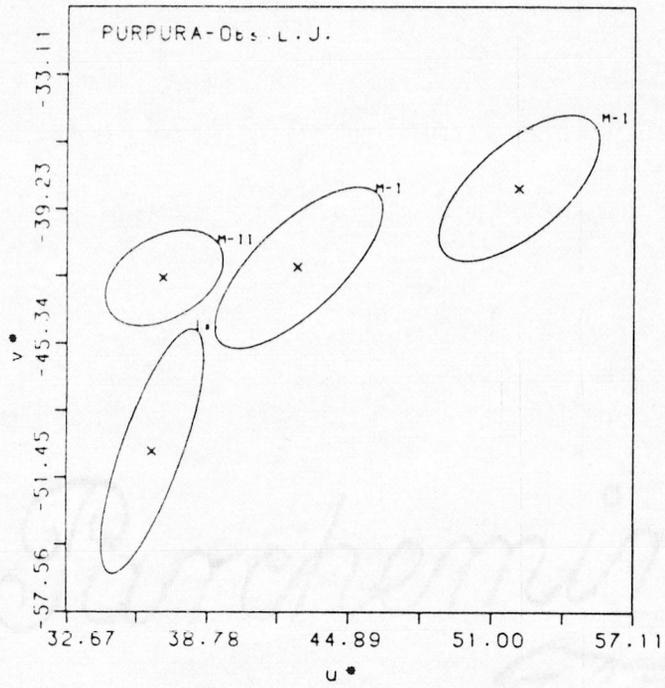


Figura 6.13.a

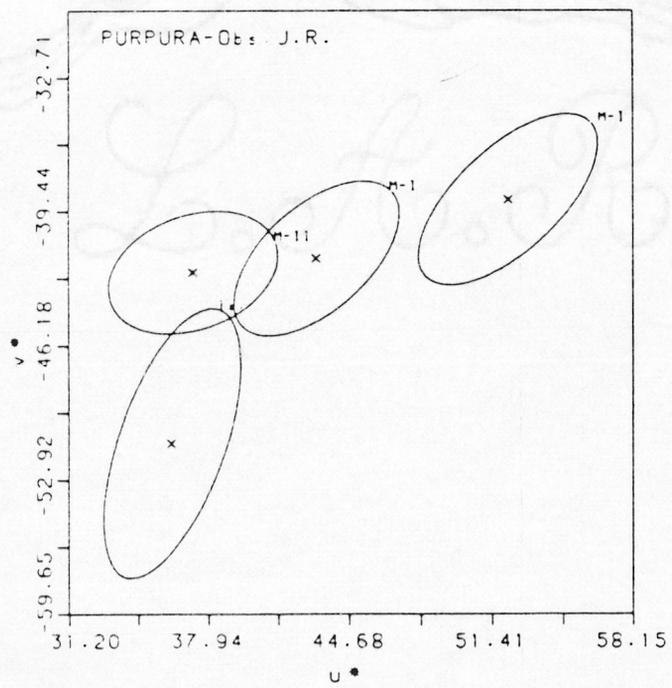


Figura 6.13.b

TABLA 6-XII.d. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo PURPURA-ROJIZO en el sistema de representación CIELAB.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	a* = 50.83 b* = -35.57 L* = 30.01	13.92	118.1°	0.19
	Metám. I	a* = 49.43 b* = -28.52 L* = 31.08	15.45	97.2°	0.57
	Metám. II	a* = 46.43 b* = -29.62 L* = 30.06	8.94	-43.6°	0.79
	Metám. IV	a* = 54.22 b* = -25.43 L* = 29.80	14.33	103.3°	0.60
J.R.	"C. Isóm."	a* = 51.21 b* = -36.22 L* = 29.98	32.71	120.8°	0.29
	Metám. I	a* = 49.61 b* = -28.39 L* = 31.10	20.96	108.7°	0.67
	Metám. II	a* = 46.68 b* = -29.66 L* = 30.13	20.81	-26.0°	0.74
	Metám. IV	a* = 54.53 b* = -25.86 L* = 29.89	22.63	104.8°	0.57

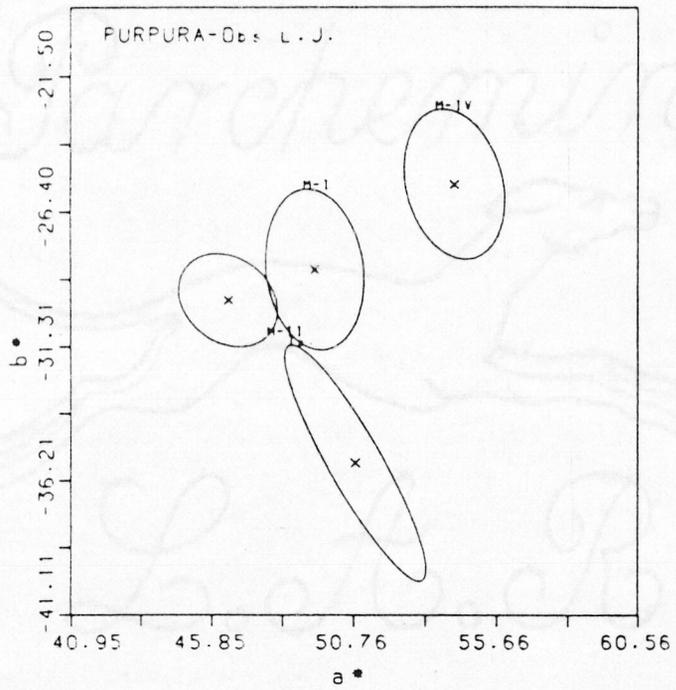


Figura 6.14.a

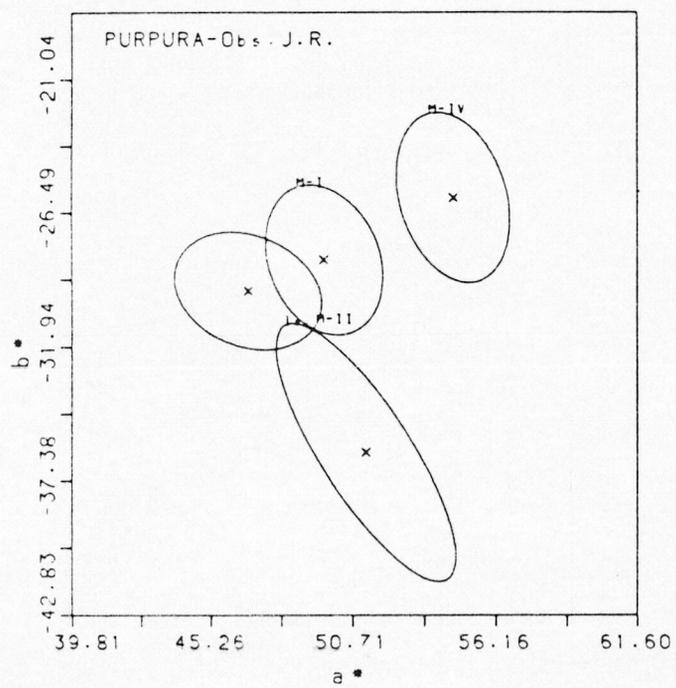


Figura 6.14.b

TABLA 6-XIII.a. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo ROJO-ANARANJADO en el sistema de representación CIE-1931.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C.Isom."	x=0.559 y=0.330 Y=3.355	($\times 10^{-4}$) 4.18	32.0°	0.28
	Metám. I	x=0.568 y=0.322 Y=3.279	3.84	28.1°	0.23
	Metám. II	x=0.541 y=0.332 Y=3.306	2.74	32.4°	0.13
	Metám. III	x=0.567 y=0.317 Y=3.177	1.80	20.4°	0.16
J.R.	"C.Isom."	x=0.554 y=0.326 Y=3.759	6.53	35.4°	0.29
	Metám. I	x=0.567 y=0.321 Y=3.292	2.35	26.8°	0.35
	Metám. II	x=0.532 y=0.324 Y=3.227	3.88	31.3°	0.20
	Metám. III	x=0.562 y=0.321	3.72	19.3°	0.27
E.H.	Metám. II	x=0.536 y=0.322 Y=3.309	3.40	29.4°	0.17

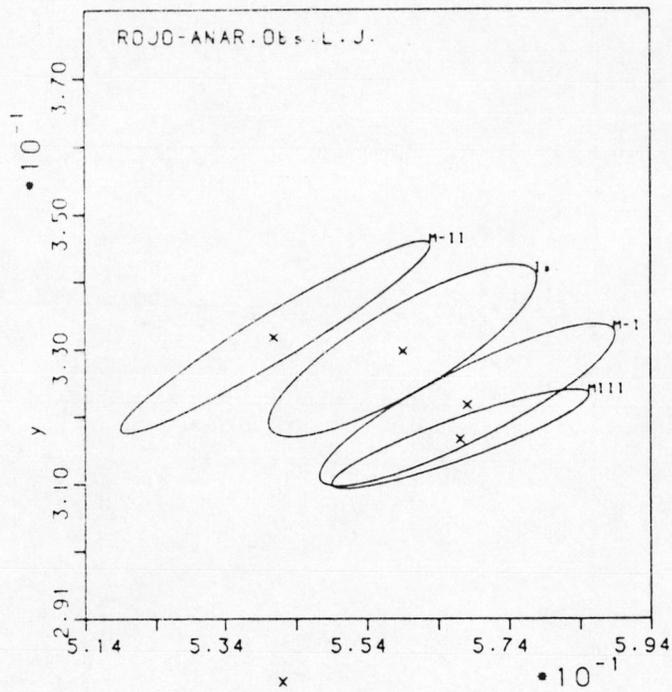


Figura 6.15.a

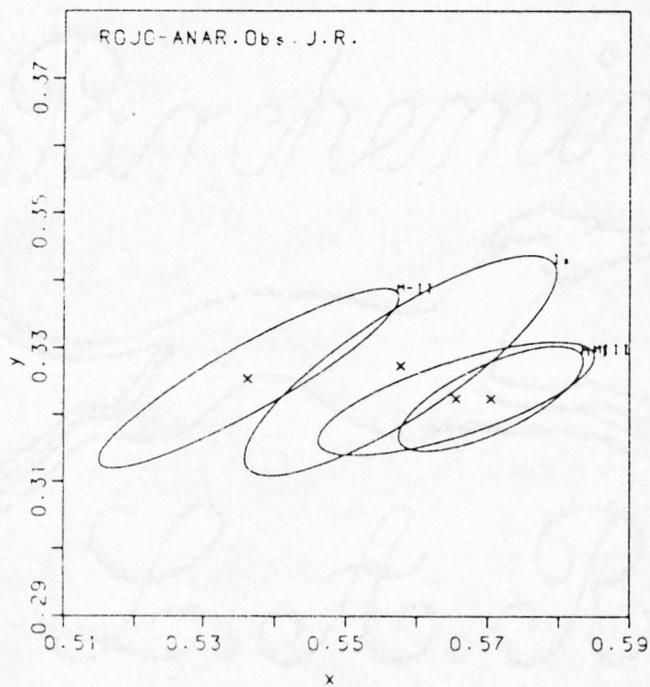


Figura 6.15.b

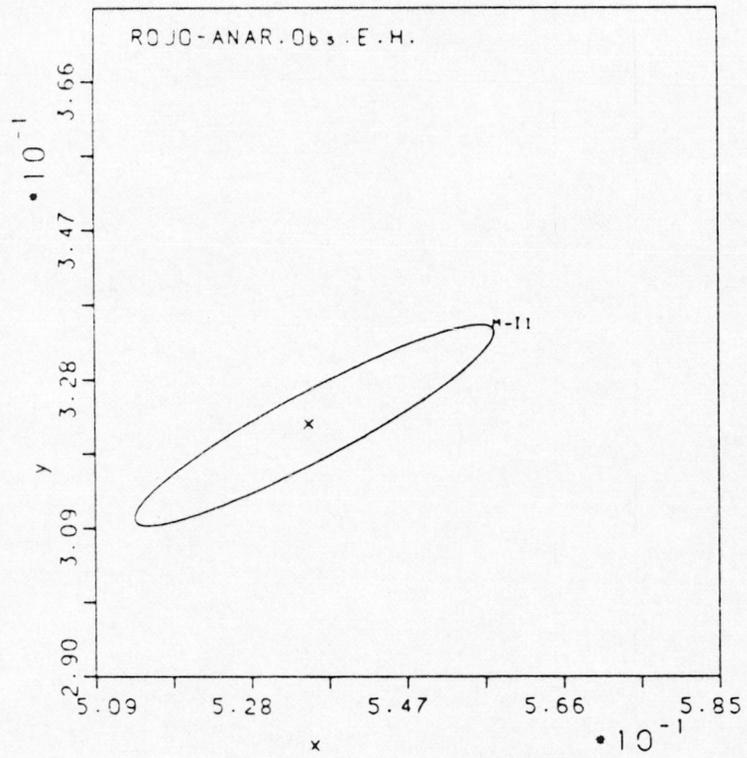


Figura 6.15.c

TABLA 6-XIII.b. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo ROJO-ANARANJADO en el sistema de representación UCS-CIE 1960.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C.Isóm."	u=0.383 v=0.339 L=3.756	($\times 10^{-4}$) 1.50	25.1°	0.52
	Metám. I	u=0.396 v=0.337 L=3.279	1.50	27.2°	0.39
	Metám. II	u=0.367 v=0.338 L=3.306	0.96	40.8°	0.29
	Metám. III	u=0.400 v=0.336 L=3.177	0.72	22.0°	0.19
J.R.	"C.Isóm."	u=0.382 v=0.337 L=3.759	2.42	28.8°	0.62
	Metám. I	u=0.397 v=0.337 L=3.292	0.90	15.1°	0.44
	Metám. II	u=0.366 v=0.334 L=3.227	1.40	34.4°	0.39
	Metám. III	u=0.392 v=0.336 L=3.256	1.41	16.6°	0.27

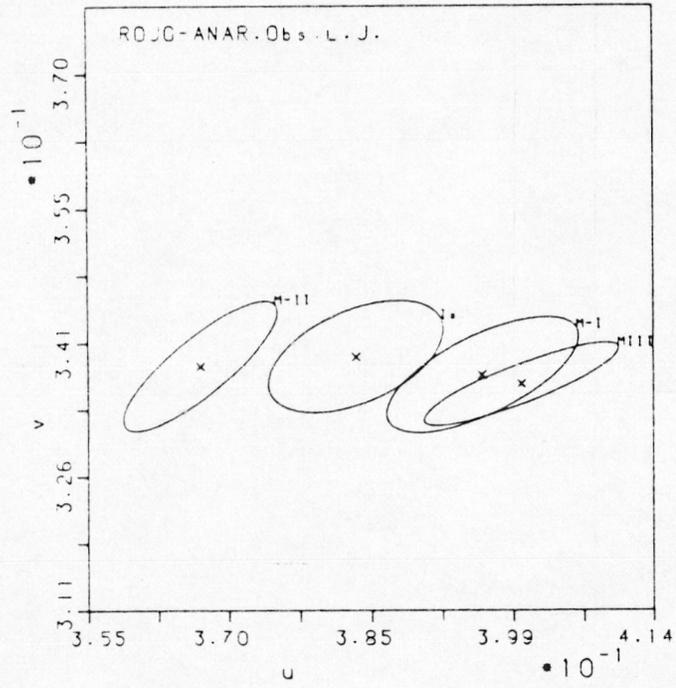


Figura 6.16.a

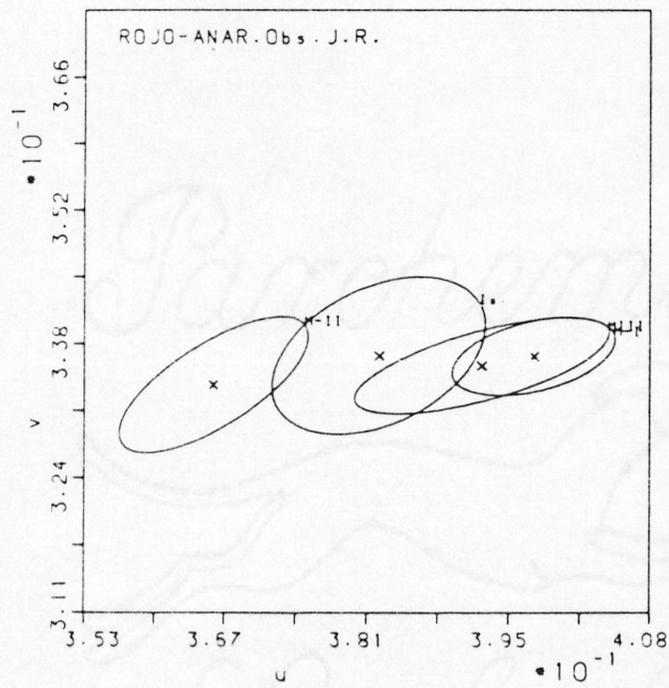


Figura 6.16.b

TABLA 6-XIII.c. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo ROJO-ANARANJADO en el sistema de representación CIELUV.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u* = 87.81 v* = 17.63 L* = 39.12	58.45	46.0°	0.59
	Metám. I	u* = 88.63 v* = 15.39 L* = 36.68	49.96	42.5°	0.45
	Metám. II	u* = 74.82 v* = 15.64 L* = 36.83	32.77	54.5°	0.28
	Metám. III	u* = 88.88 v* = 13.92 L* = 36.13	23.55	32.3°	0.24
J.R.	"C. Isóm."	u* = 87.40 v* = 16.16 L* = 39.14	94.11	56.6°	0.64
	Metám. I	u* = 89.25 v* = 15.02 L* = 36.75	31.02	28.3°	0.59
	Metám. II	u* = 73.52 v* = 12.74 L* = 36.40	47.29	50.4°	0.40
	Metám. III	u* = 86.31 v* = 14.67 L* = 36.56	48.13	26.0°	0.37

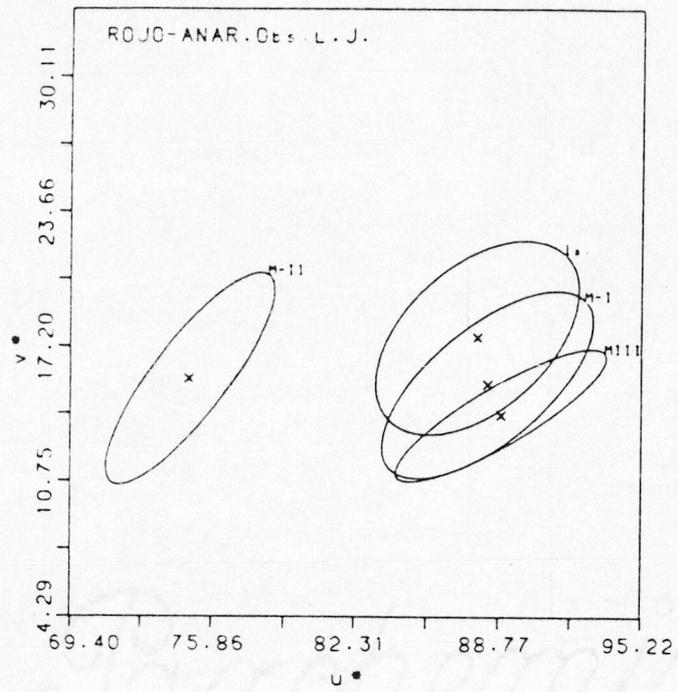


Figura 6.17.a

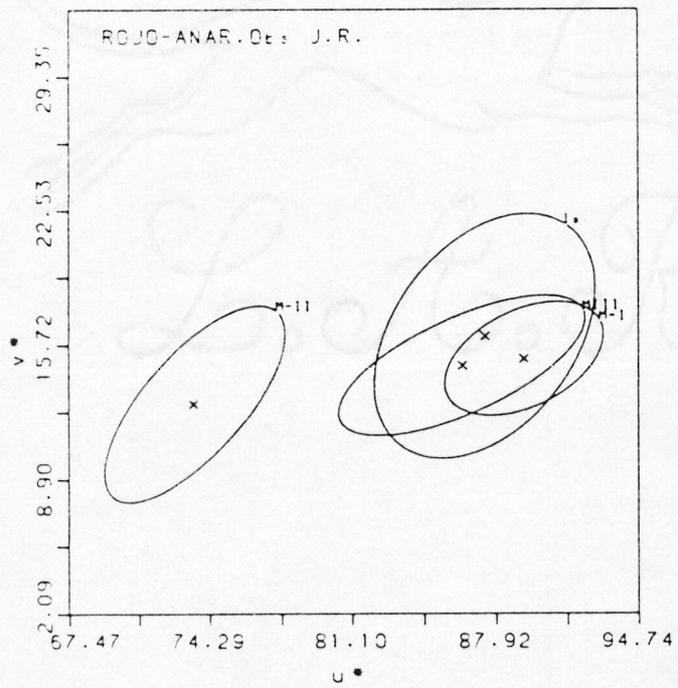


Figura 6.17.b

TABLA 6-XIII.d. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo ROJO-ANARANJADO en el sistema de representación CIELAB.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	a* = 45.75 b* = 29.04 L* = 39.12	43.916	93.6°	0.29
	Metám. I	a* = 47.23 b* = 27.40 L* = 36.68	38.24	89.9°	0.25
	Metám. II	a* = 40.27 b* = 25.11 L* = 36.83	24.18	91.5°	0.15
	Metám. III	a* = 47.97 b* = 25.71 L* = 36.13	17.25	80.0°	0.20
J.R.	"C. Isóm."	a* = 46.08 b* = 27.04 L* = 39.14	62.71	98.1°	0.30
	Metám. I	a* = 47.66 b* = 26.93 L* = 36.75	23.01	91.0°	0.39
	Metám. II	a* = 40.73 b* = 21.45 L* = 36.40	32.64	91.3°	0.24
	Metám. III	a* = 46.39 b* = 26.03 L* = 36.56	35.23	79.8°	0.35

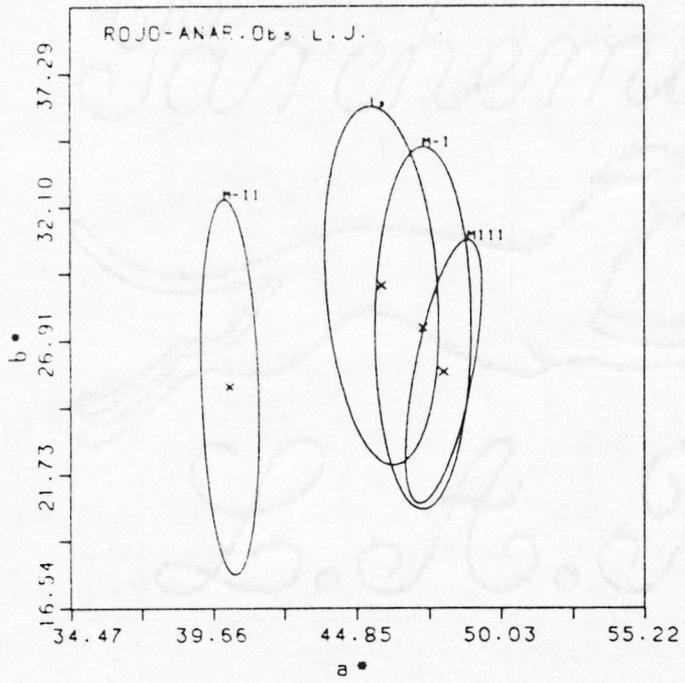


Figura 6.18.a

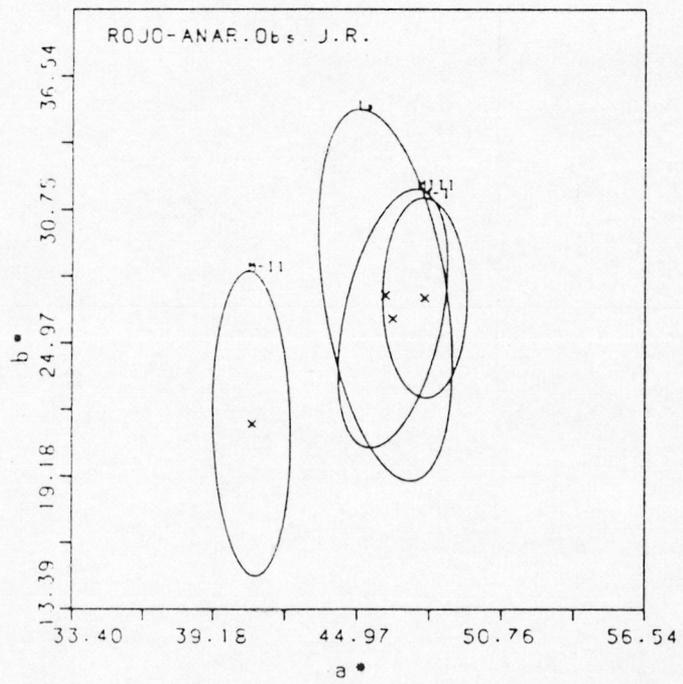


Figura 6.18.b

TABLA 6-XIV.a. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AMARILLO en el sistema de representación CIE-1931.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C.Isom."	x=0.495 y=0.438 Y=4.893	($\times 10^{-4}$) 3.75	50.3°	0.08
	Metám. II	x=0.487 y=0.440 Y=4.782	3.08	47.8°	0.16
	Metám. III	x=0.491 y=0.437 Y=4.993	3.30	44.2°	0.25
	Metám. IV	x=0.556 y=0.408 Y=5.260	3.15	39.1°	0.26
J.R.	"C.Isóm."	x=0.491 y=0.437 Y=4.866	5.20	50.1°	0.14
	Metám. II	x=0.485 y=0.438 Y=4.785	3.56	47.5°	0.18
	Metám. III	x=0.487 y=0.435 Y=5.008	2.75	39.5°	0.26
	Metám. IV	x=0.561 y=0.411 Y=5.170	2.97	35.3°	0.34
E.H.	Metám. IV	x=0.548 y=0.411 Y=5.097	2.82	37.6°	0.30

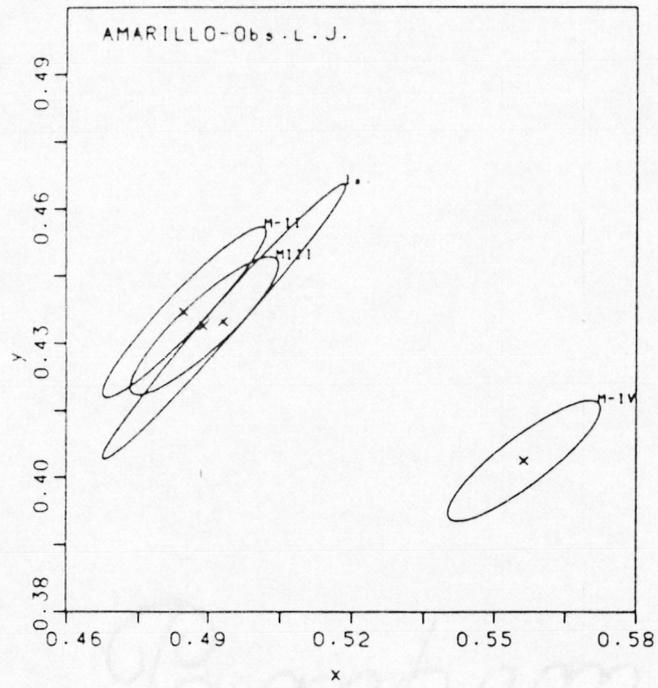


Figura 6.19.a

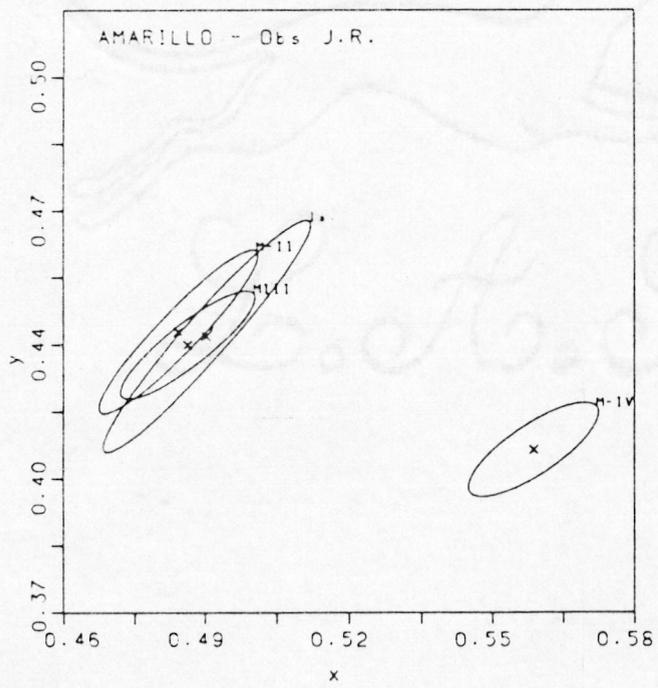


Figura 6.19.b

TABLA 6-XIV.b. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AMARILLO en el sistema de representación UCS-CIE 1960.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C.Isóm."	u=0.273 v=0.362 L=4.893	($\times 10^{-4}$) 0.71	77.0°	0.25
	Metám. II	u=0.267 v=0.361 L=4.782	0.57	63.7°	0.46
	Metám. III	u=0.270 v=0.361 L=4.993	0.62	45.2°	0.58
	Metám. IV	u=0.328 v=0.361 L=5.260	0.73	35.6°	0.58
J.R.	"C.Isóm."	u=0.271 v=0.361 L=4.866	0.97	74.3°	0.43
	Metám. II	u=0.266 v=0.361 L=4.785	0.66	61.8°	0.50
	Metám. III	u=0.269 v=0.360 L=5.008	0.52	36.1°	0.46
	Metám. IV	u=0.329 v=0.362 L=5.170	0.67	21.7°	0.51

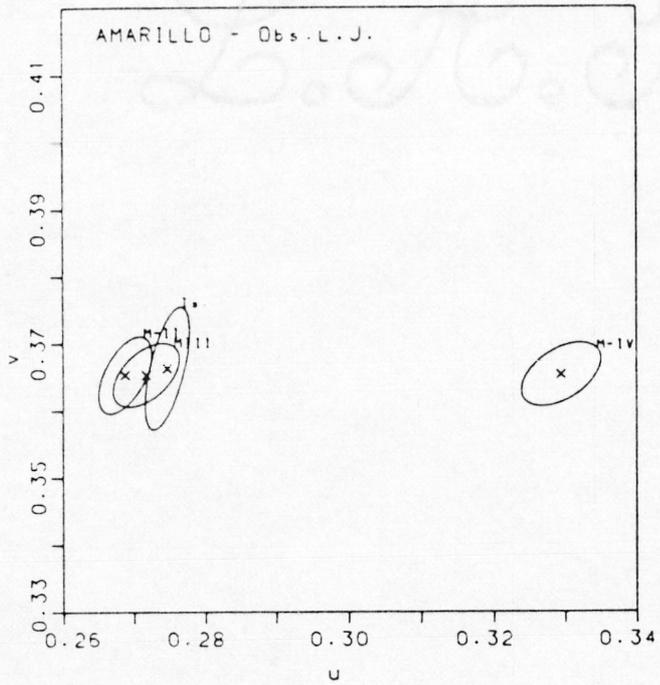


Figura 6.20.a

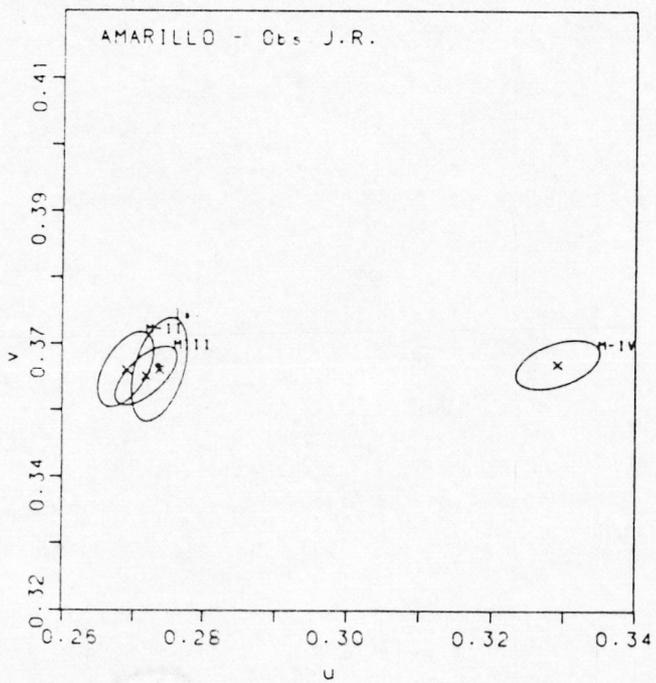


Figura 6.20.b

TABLA 6-XIV.c. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AMARILLO en el sistema de representación CIELUV.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u* = 35.71 v* = 39.47 L* = 44.20	35.40	81.5°	0.18
	Metám. II	u* = 31.95 v* = 38.93 L* = 43.74	27.81	74.3°	0.34
	Metám. III	u* = 34.72 v* = 39.39 L* = 44.61	31.29	64.9°	0.50
	Metám. IV	u* = 69.66 v* = 40.08 L* = 45.67	38.63	58.5°	0.56
J.R.	"C. Isóm."	u* = 34.39 v* = 38.96 L* = 44.09	47.72	80.7°	0.30
	Metám. II	u* = 31.70 v* = 38.36 L* = 43.76	32.26	73.6°	0.37
	Metám. III	u* = 33.95 v* = 38.77 L* = 44.67	26.32	54.0°	0.46
	Metám. IV	u* = 69.88 v* = 40.98 L* = 45.32	35.18	41.7°	0.61

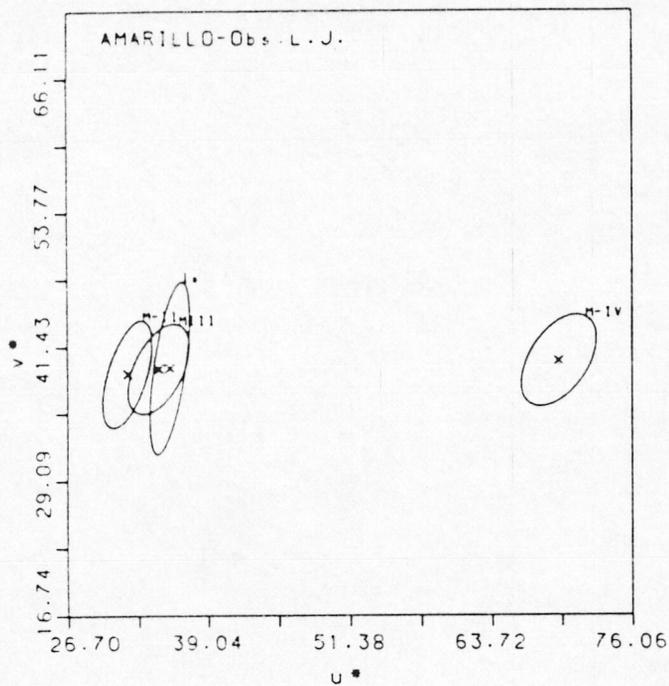


Figura 6.21.a

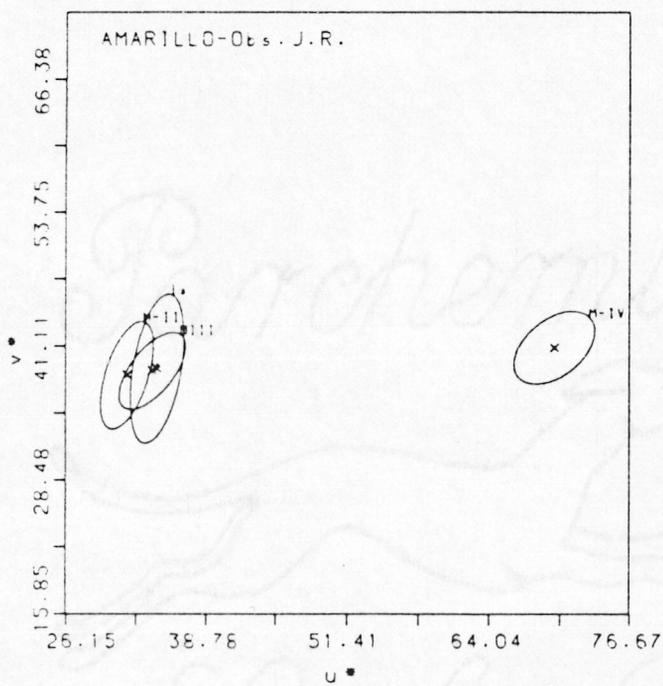


Figura 6.21.b

TABLA 6-XIV.d. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo AMARILLO en el sistema de representación CIELAB.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	a* = 10.88 b* = 48.97 L* = 44.20	47.52	95.3°	0.05
	Metám. II	a* = 8.87 b* = 46.77 L* = 43.74	32.30	94.1°	0.11
	Metám. III	a* = 10.32 b* = 47.38 L* = 44.61	38.19	91.9°	0.16
	Metám. IV	a* = 28.91 b* = 59.25 L* = 45.67	57.02	91.7°	0.12
J.R.	"C. Isóm."	a* = 10.27 b* = 47.39 L* = 44.09	64.23	95.0°	0.08
	Metám. II	a* = 8.88 b* = 45.60 L* = 43.76	36.57	94.0°	0.13
	Metám. III	a* = 10.06 b* = 45.91 L* = 44.67	30.34	88.9°	0.18
	Metám. IV	a* = 28.76 b* = 62.95 L* = 45.32	59.99	90.1°	0.14

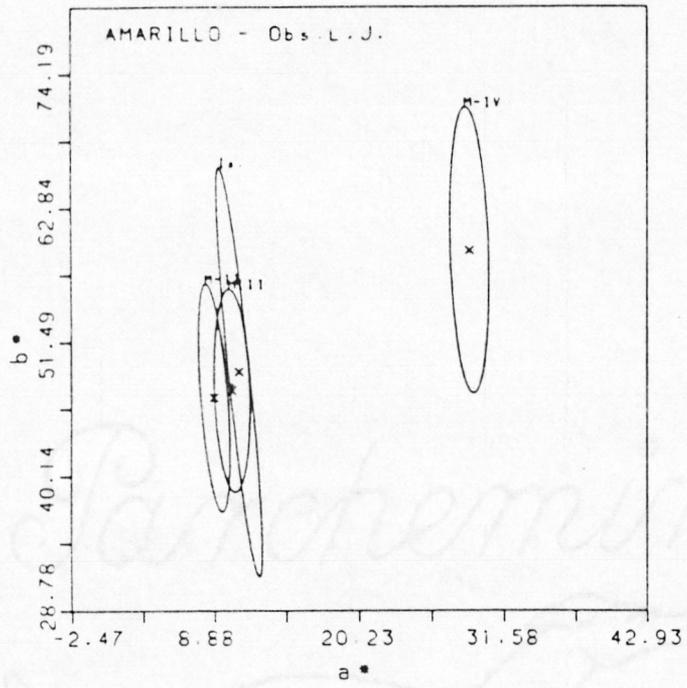


Figura 6.22.a

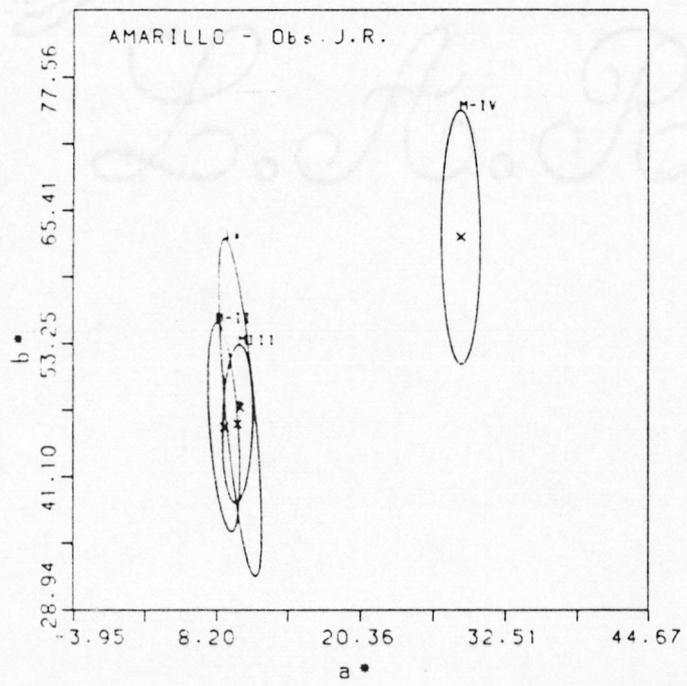


Figura 6.22.b

TABLA 6-XV.a. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo VERDE-AMARILLENTO en el sistema de representación CIE-1931.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C.Isóm."	x=0.293 y=0.496 Y=2.712	(x10 ⁻⁴) 6.90	77.6°	0.43
	Metám. II	x=0.276 y=0.466 Y=2.533	8.09	72.6°	0.10
	Metám. IV	x=0.344 y=0.501 Y=2.567	13.20	66.2°	0.14
	Metám. V	x=0.305 y=0.528 Y=2.652	5.50	66.4°	0.38
J.R.	"C.Isóm."	x=0.294 y=0.497 Y=2.707	7.20	88.9°	0.62
	Metám. II	x=0.274 y=0.460	4.77	73.2°	0.11
	Metám. IV	x=0.343 y=0.519 Y=2.531	17.60	68.0°	0.08
	Metám. V	x=0.304 y=0.521 Y=2.598	7.30	66.2°	0.33
E.H.	Metám. V	x=0.304 y=0.519 Y=2.608	6.84	67.1°	0.34

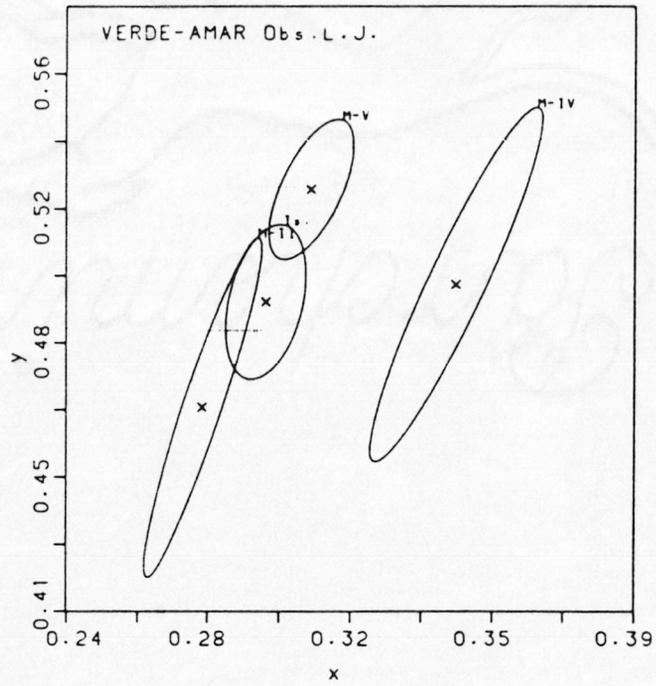


Figura 6.23.a

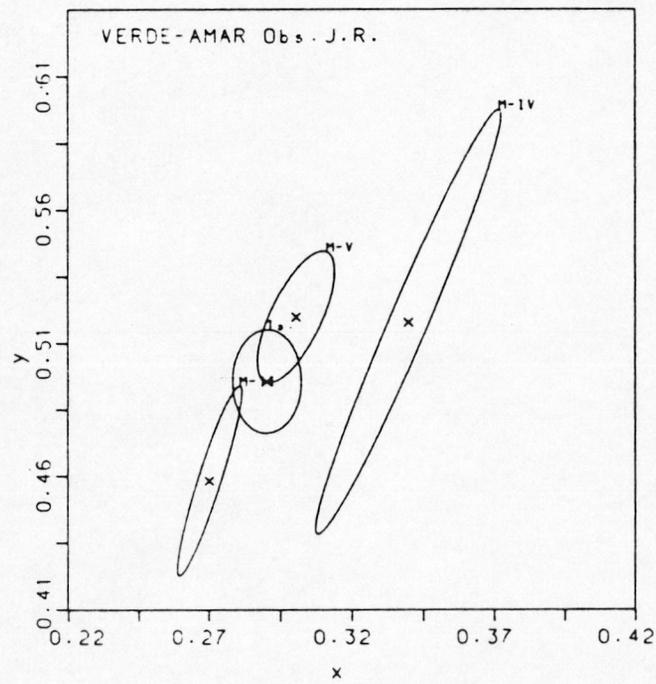


Figura 6.23.b

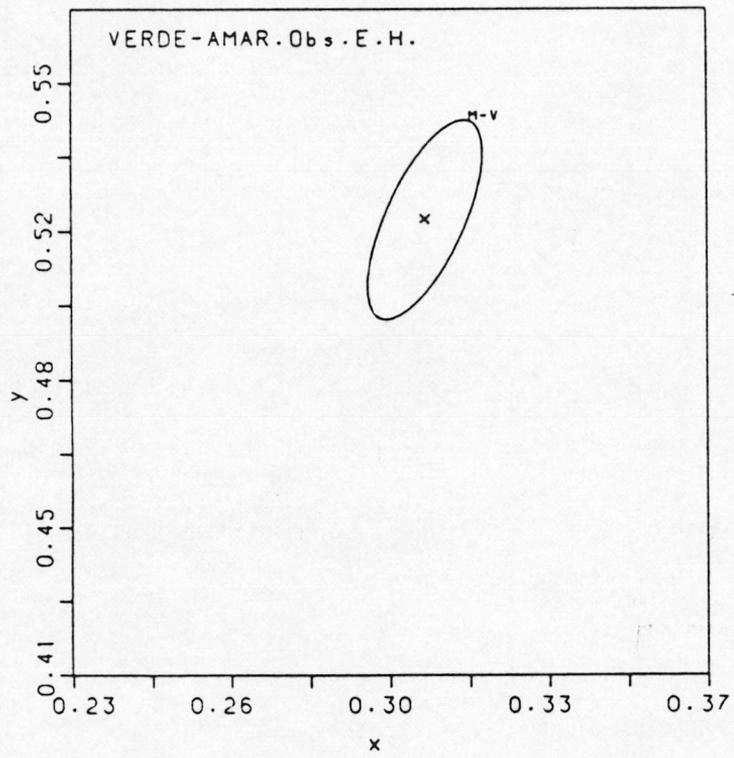


Figura 6.23.c

TABLA 6-XV.b Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo VERDE-AMARILLENTO en el sistema de representación UCS-CIE 1960.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMIEJES
L.J.	"C. Isóm."	u=0.140 v=0.356 L=2.712	($\times 10^{-4}$) 0.85	-32.4°	0.74
	Metám. II	u=0.137 v=0.348 L=2.533	1.10	99.3°	0.24
	Metám. IV	u=0.166 v=0.361 L=2.567	1.65	93°	0.37
	Metám.V	u=0.140 v=0.363 L=2.652	0.59	52.3°	0.90
J.R.	"C. Isóm."	u=0.140 v=0.356 L=2.707	0.88	-13.5°	0.52
	Metám. II	u=0.138 v=0.346 L=2.533	0.67	100.6°	0.26
	Metám.IV	u=0.161 v=0.364 L=2.531	2.05	96.0°	0.21
	Metám. V	u=0.141 v=0.362 L=2.598	0.81	72.2°	0.83

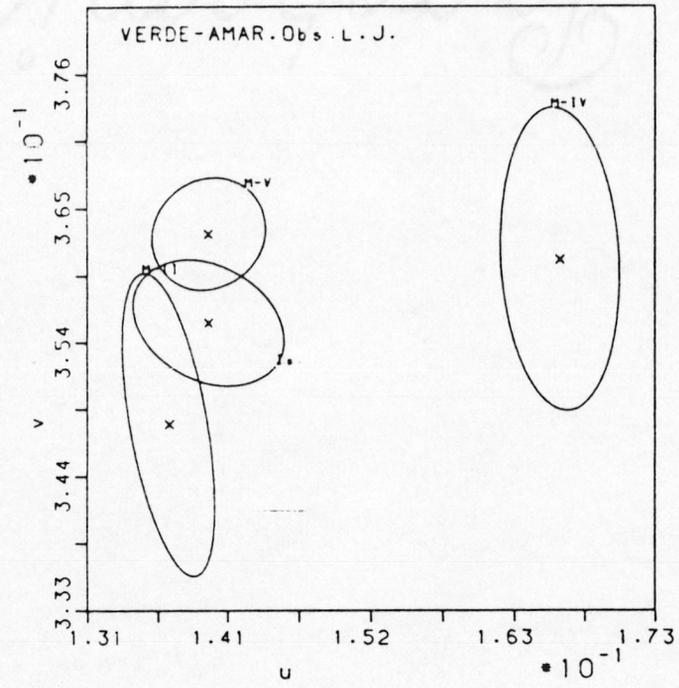


Figura 6.24.a

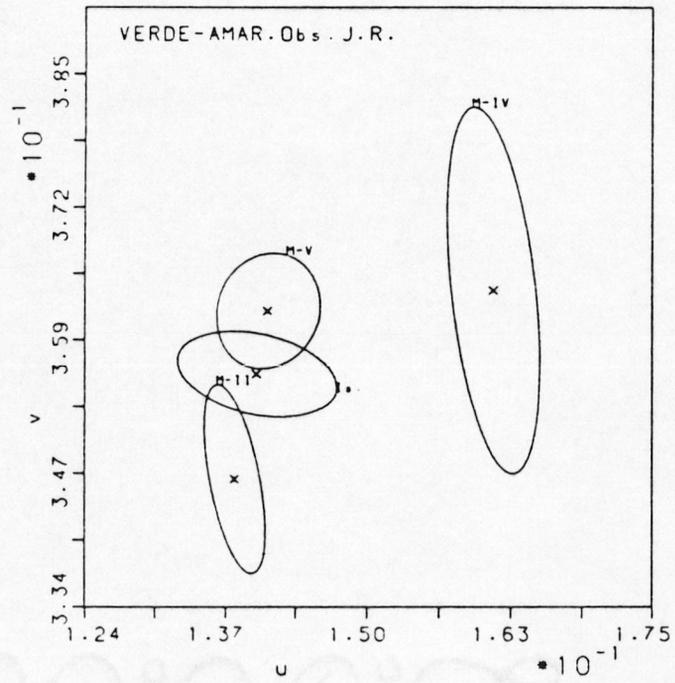


Figura 6.24.b

TABLA 6-XV.c. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo VERDE-AMARI--LLENTO en el sistema de representación CIELUV.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	u* = -30.63 v* = 26.06 L* = 33.45	24.23	111.8°	0.67
	Metám. II	u* = -30.80 v* = 20.10 L* = 32.34	29.00	96.1°	0.16
	Metám. IV	u* = -19.06 v* = 28.66 L* = 32.55	44.19	91.9°	0.25
	Metám. V	u* = -30.37 v* = 30.50 L* = 33.08	16.46	83.9°	0.64
J.R.	"C. Isóm."	u* = -30.51 v* = 26.19 L* = 33.42	24.87	-31.9°	0.71
	Metám. II	u* = -30.66 v* = 19.21 L* = 32.34	17.82	96.9°	0.18
	Metám. IV	u* = -21.00 v* = 30.55 L* = 32.33	54.10	94.0°	0.14
	Metám. V	u* = -29.68 v* = 29.23 L* = 32.75	21.96	84.9°	0.57

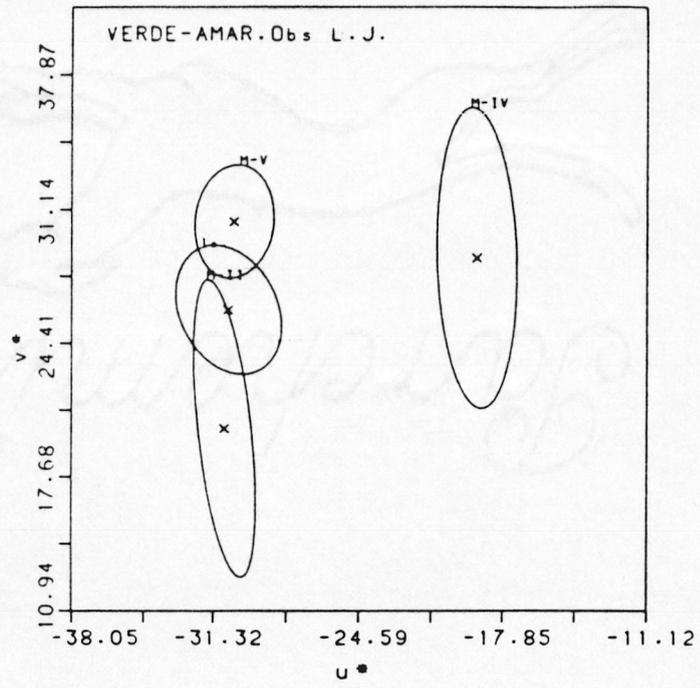


Figura 6.25.a

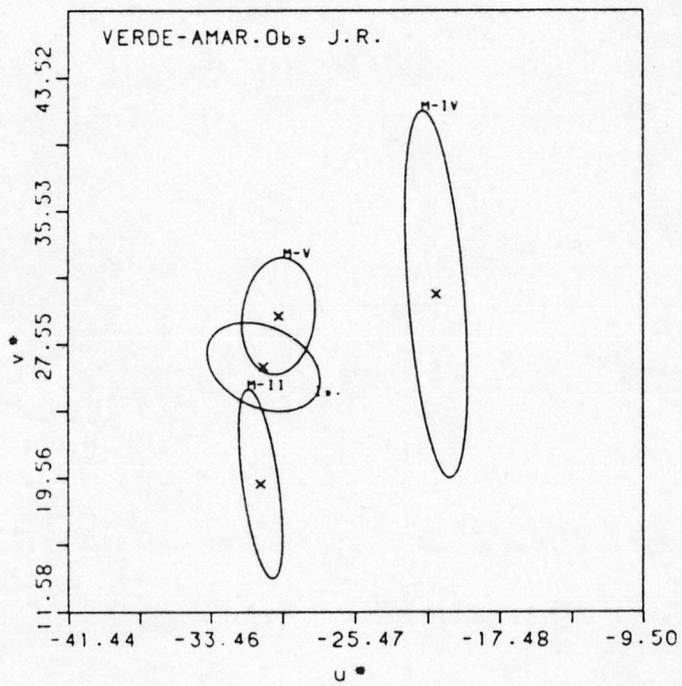


Figura 6.25.b

TABLA 6-XV.d. Resultados de los parámetros característicos de la sección elíptica principal, representativa del umbral diferencial de cromaticidad, para el estímulo VERDE-AMARILLENTO en el sistema de representación CIELAB.

OBSERVADOR	IGUALACION	CENTRO	AREA	ORIENTACION	RELACION DE SEMEJES
L.J.	"C. Isóm."	a* = -34.31 b* = 21.17 L* = 33.45	28.61	117.9°	0.56
	Metám. II	a* = -33.38 b* = 14.92 L* = 32.34	33.27	109.1°	0.15
	Metám. IV	a* = -24.55 b* = 27.18 L* = 32.55	61.09	101.3°	0.15
	Metám. V	a* = -35.33 b* = 27.02 L* = 33.08	22.90	96.8°	0.46
J.R.	"C. Isóm."	a* = -34.24 b* = 21.35 L* = 33.42	30.09	-38.8°	0.70
	Metám. II	a* = -33.00 b* = 13.99 L* = 32.33	19.35	110.8°	0.16
	Metám. IV	a* = -26.82 b* = 30.21 L* = 32.33	91.65	100.7°	0.08
	Metám. V	a* = -34.47 b* = 25.61 L* = 32.75	30.33	97.4°	0.41

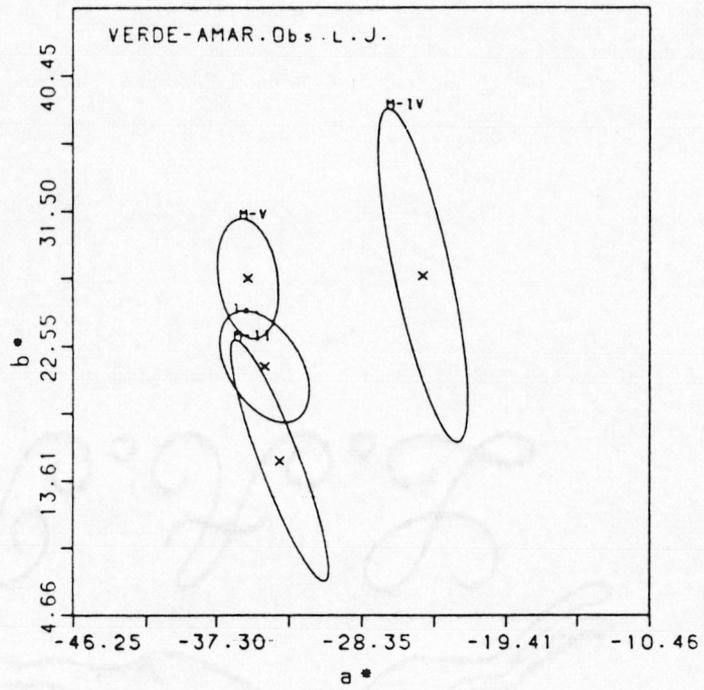


Figura 6.26.a

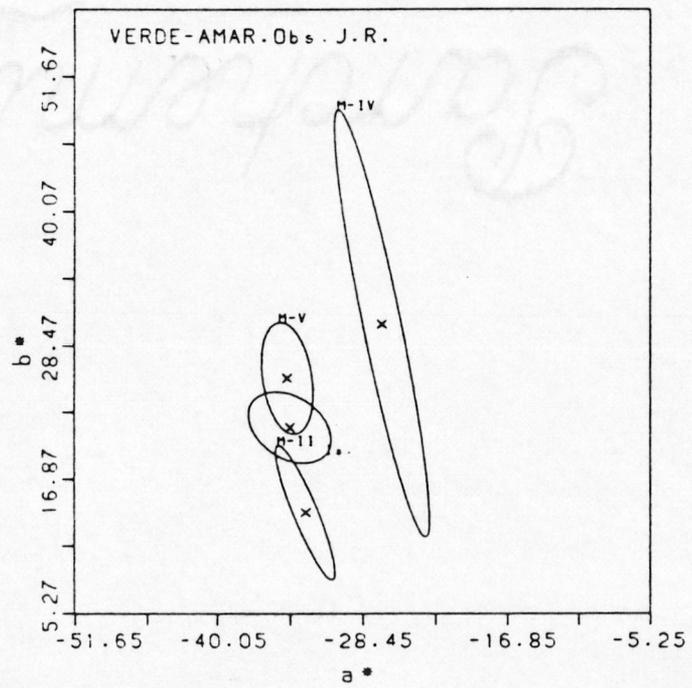


Figura 6.26.b

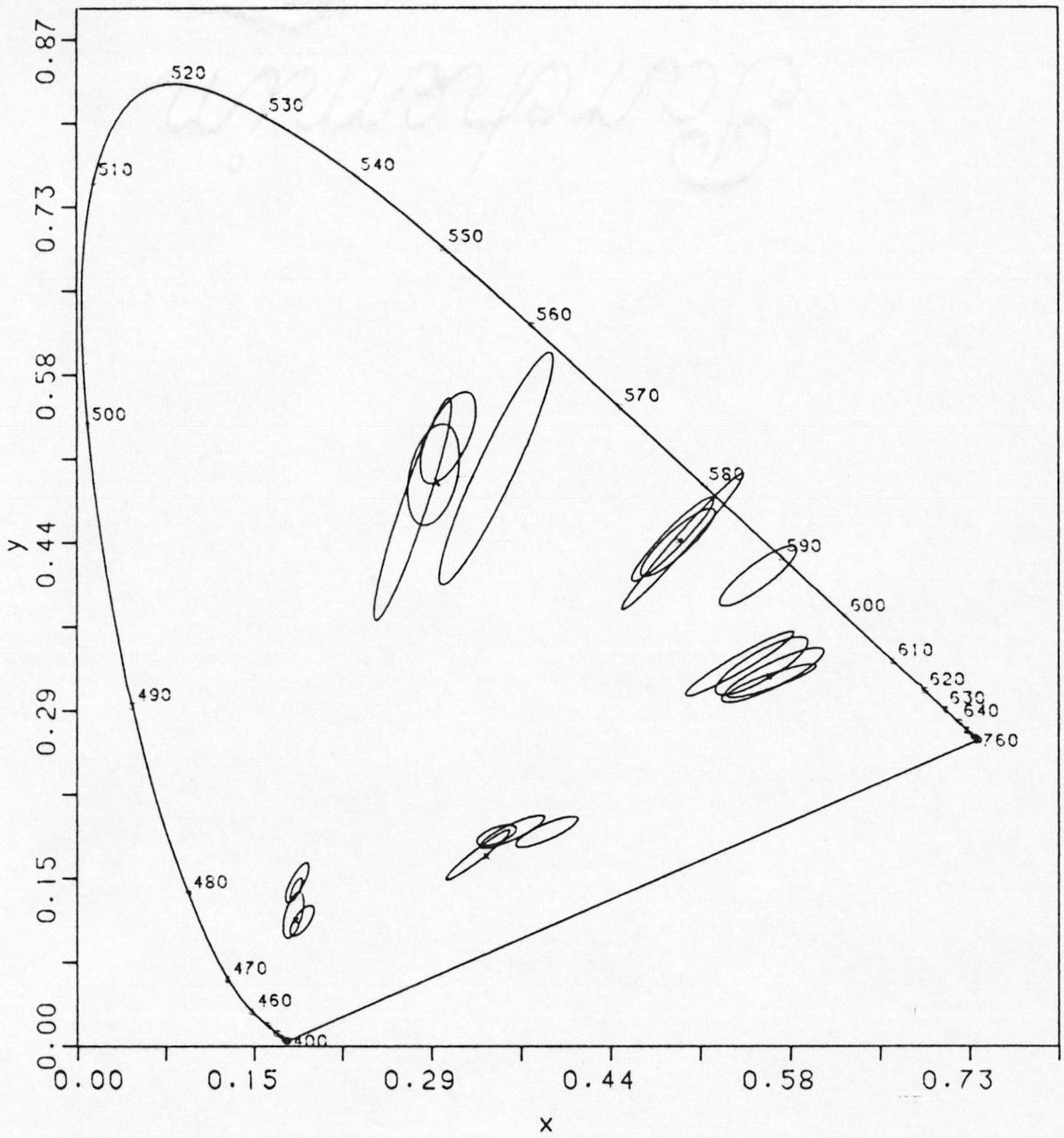


Figura 6.27.a Resultados del observador L.J. en el sistema CIE-1931 (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

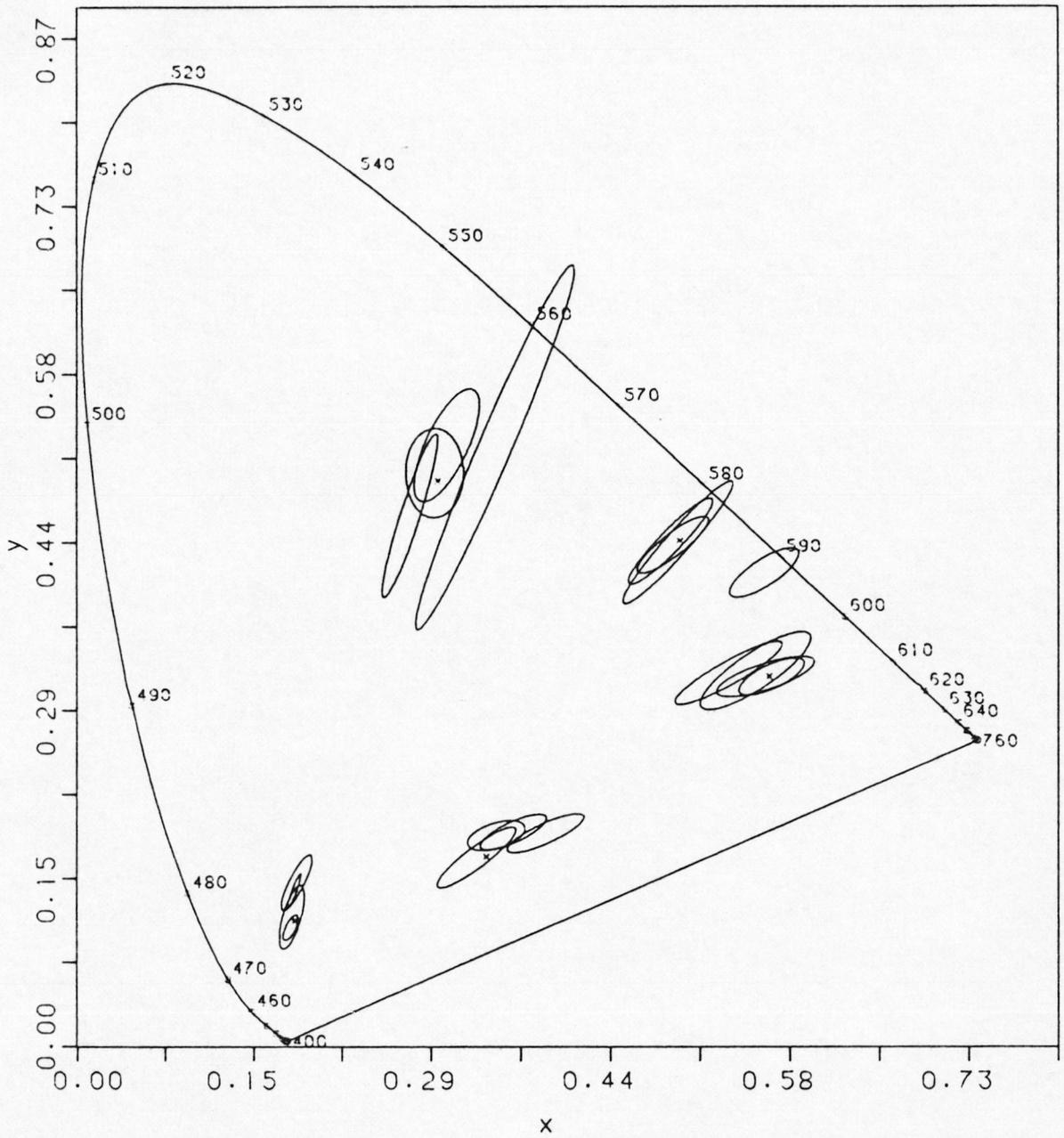


Figura 6.27.b Resultados del observador J.R. en el sistema CIE-1931 (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

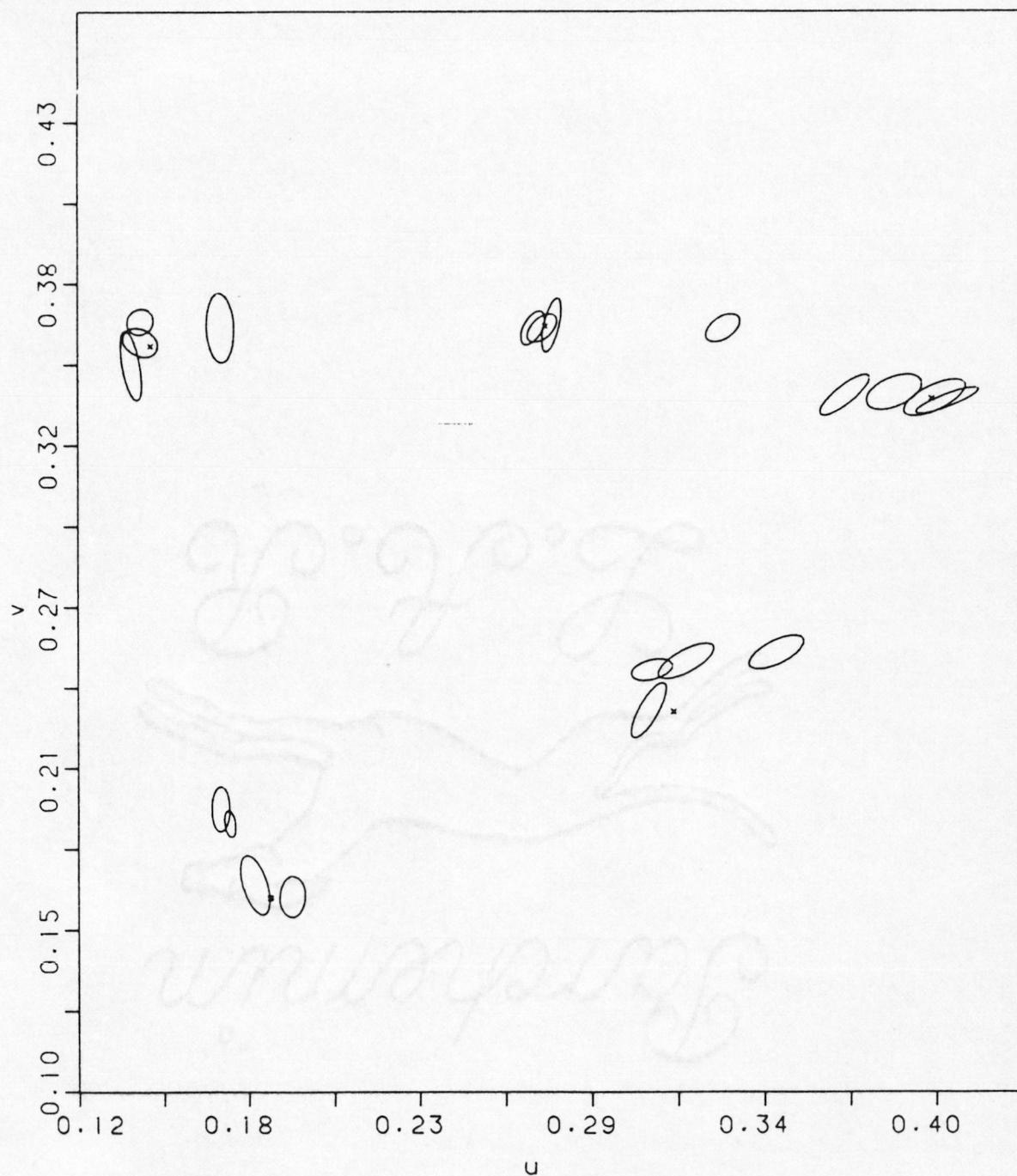


Figura 6.28.a Resultados del observador L.J. en el sistema UCS-CIE 1960. (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

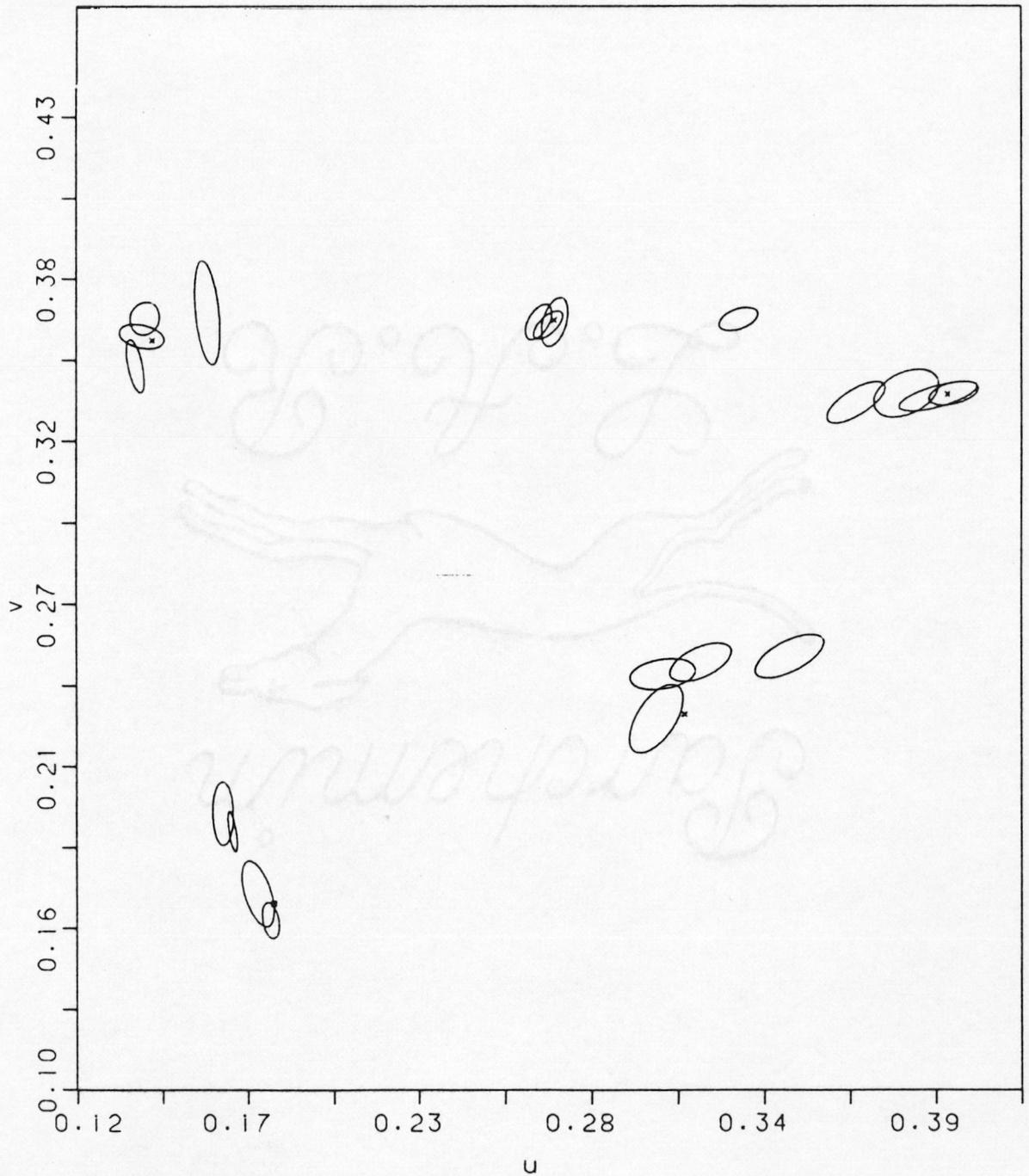


Figura 6.28.b Resultados del observador J.R. en el sistema UCS-CIE 1960. (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

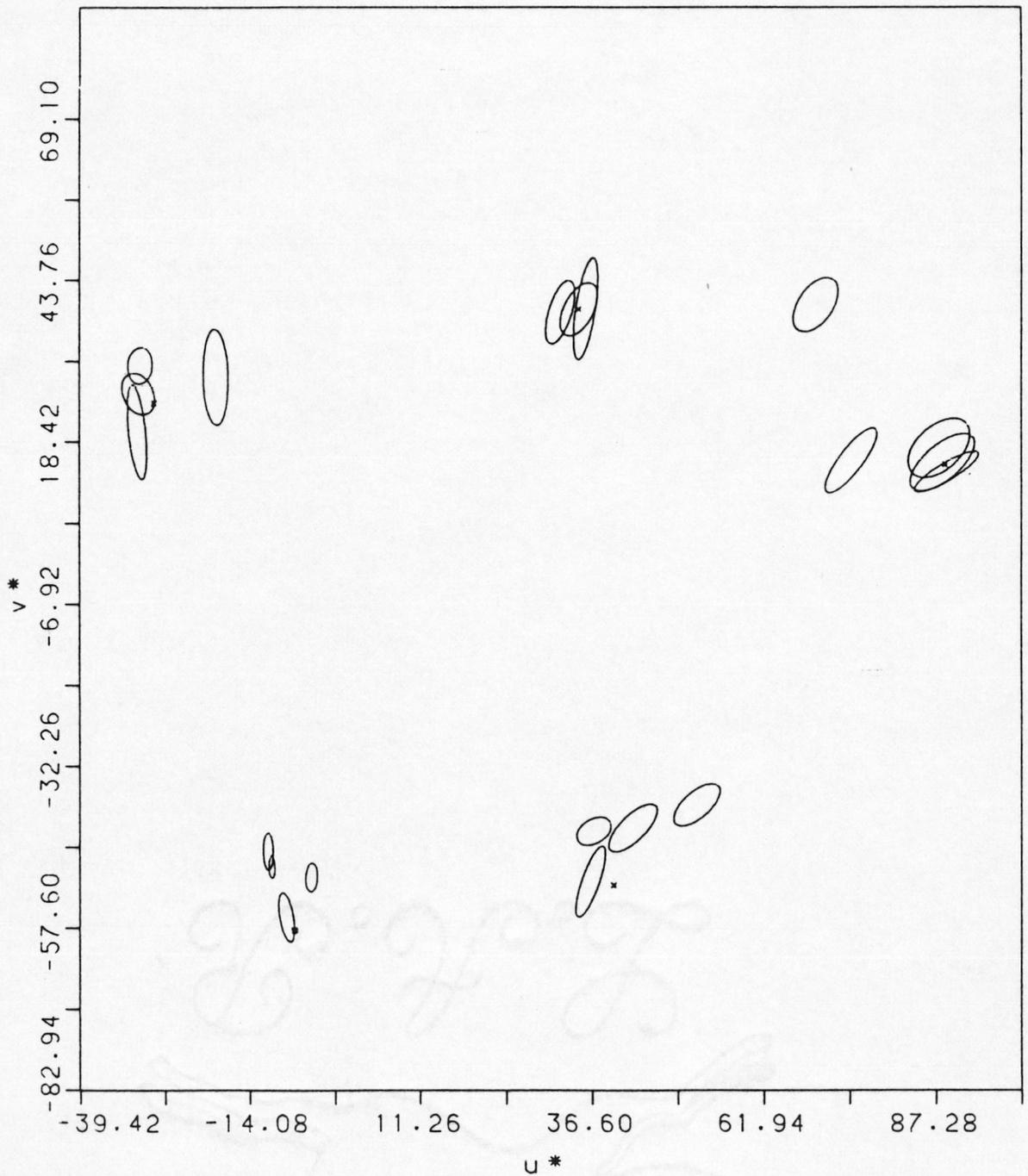


Figura 6.29.a Resultados del observador L.J. en el sistema CIELUV.
 (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

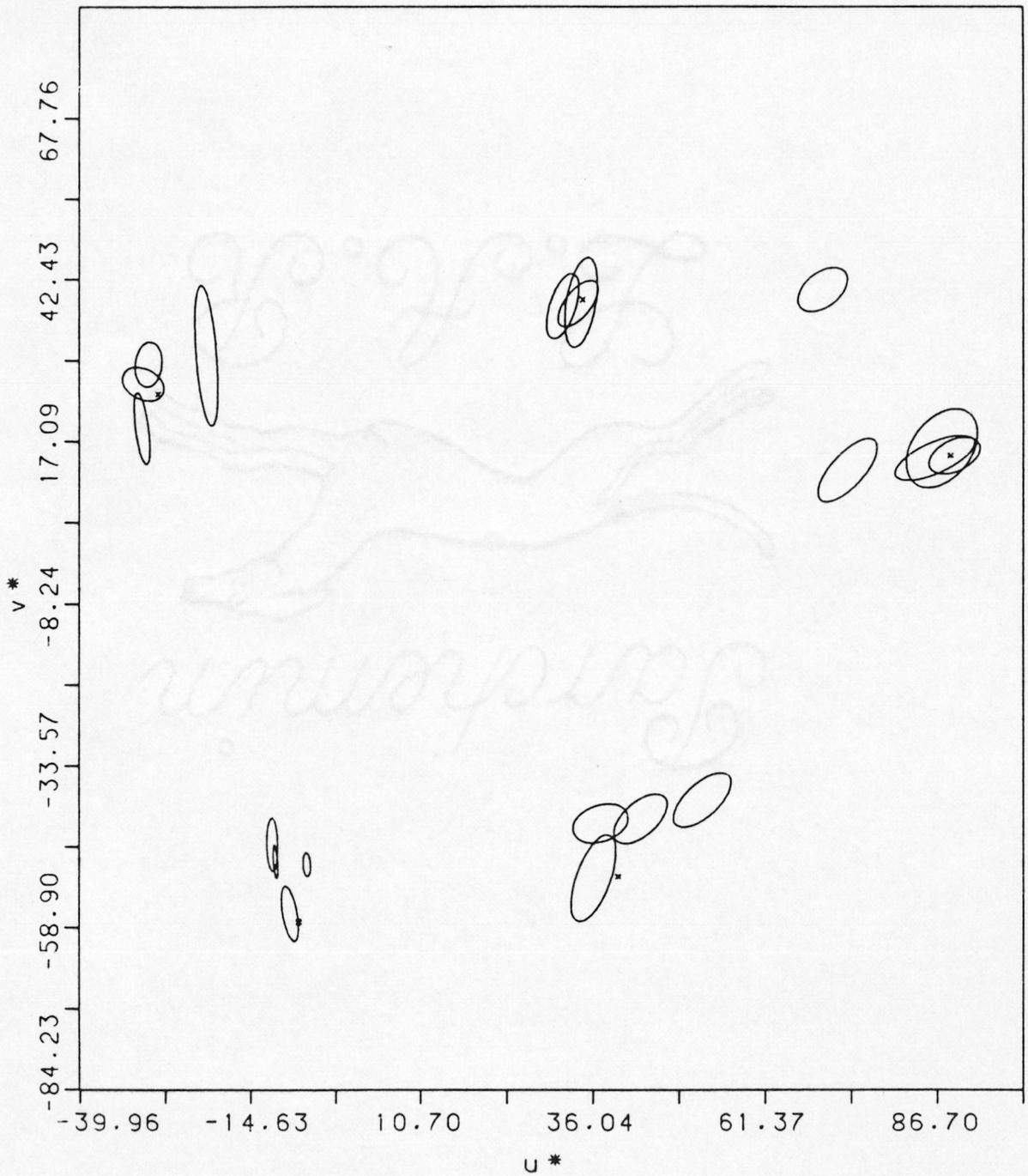


Figura 6.29.b Resultados del observador J.R. en el sistema CIELUV.
 (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

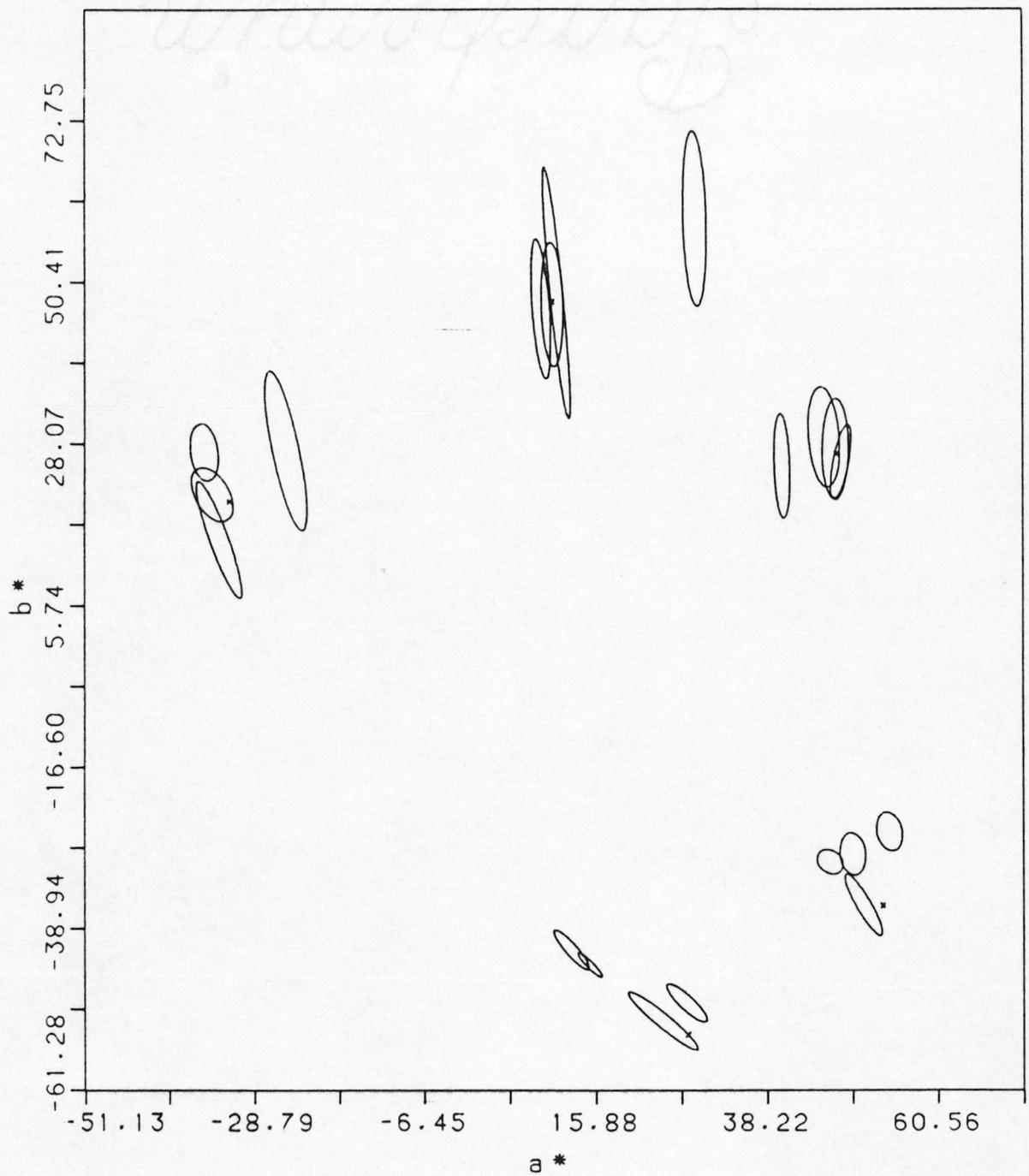


Figura 6.30.a Resultados del observador L.J. en el sistema CIELAB.
(secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

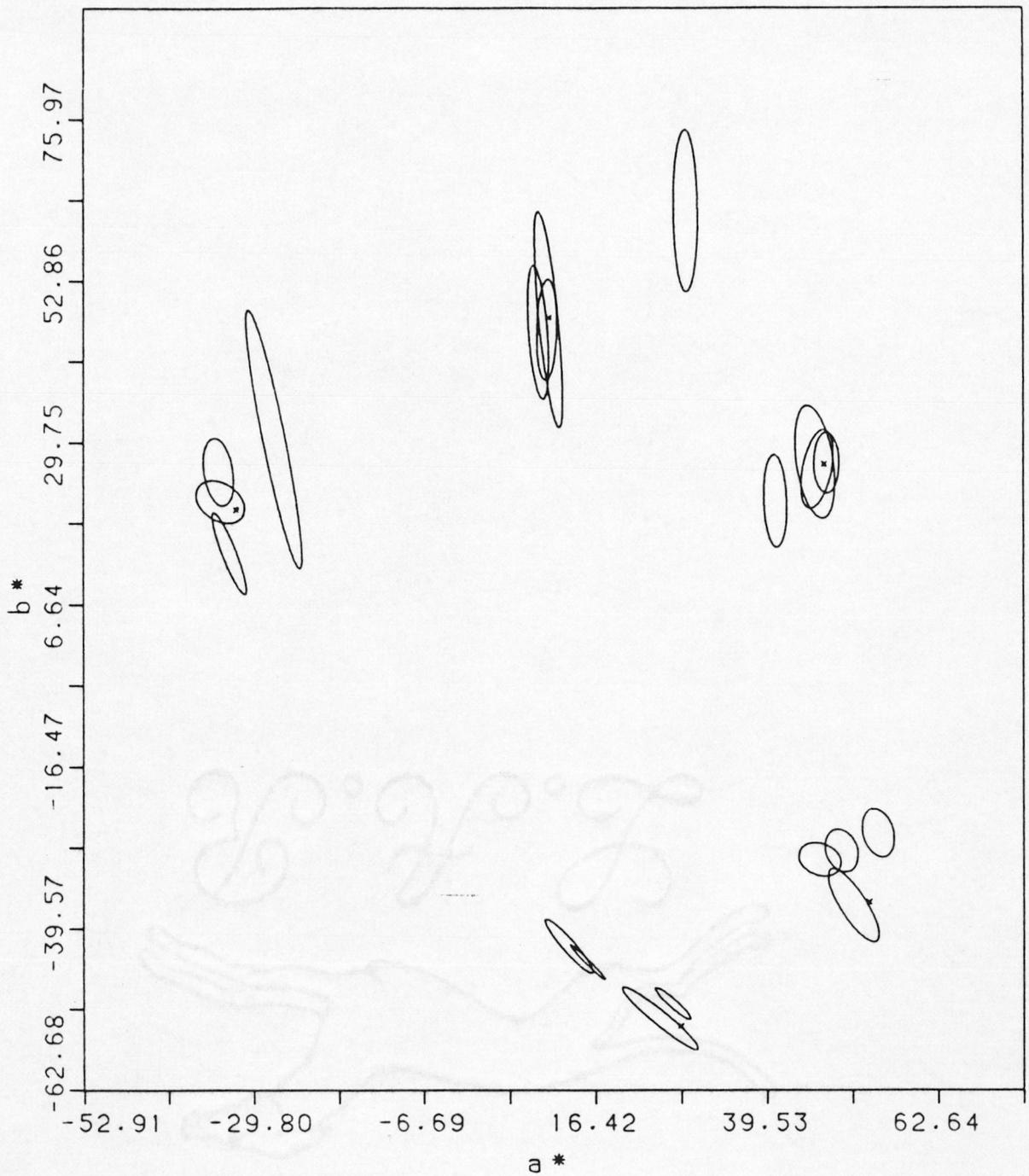


Figura 6.30.b Resultados del observador J.R. en el sistema CIELAB.
 (secciones elípticas ampliadas cuatro veces).

6.3 UMBRALES DIFERENCIALES DE COLOR Y LUMINANCIA

En la tabla 6-XVI se presentan los volúmenes de los elipsoides de error (en el sistema CIE-1931), asociados al proceso de discriminación cuando se varían simultáneamente la cromaticidad y la luminancia, como resultado del ajuste de la nube de puntos estudiados de forma que contenga en su interior el 95% de las igualaciones.

Asimismo se han calculado los umbrales diferenciales de luminancia mediante el método explicado anteriormente. Los resultados se muestran en la tabla 6-XVII (para el sistema CIE-1931), donde se han estimado dichos umbrales mediante el logaritmo de la fracción de Weber.

TABLA 6-XVI. Volúmenes relativos ($\times 10^{-5}$), asociados al umbral diferencial de color. (CIE-1931).

OBSERVADOR	IGUALACION	AZUL	PURPURA	ROJO-AN.	AMARILLO	VERDE-AM.
L.J.	"C. Isóm."	0.78	0.82	6.59	2.49	6.82
	Metám. I	0.58	2.09	6.52	-	-
	Metám. II	0.17	1.21	5.48	3.39	16.40
	Metám. III	-	-	4.32	6.66	-
	Metám. IV	0.42	1.75	-	4.02	21.00
	Metám. V	-	-	-	-	12.50
J.R.	"C. Isóm."	1.09	3.43	13.60	4.52	13.40
	Metám. I	1.30	3.54	4.19	-	-
	Metám. II	0.33	4.49	9.93	4.23	13.90
	Metám. III	-	-	11.70	4.80	-
	Metám. IV	0.28	3.40	-	4.90	25.00
	Metám. V	-	-	-	-	22.00
E.H.	"C. Isóm."	-	1.79	-	-	-
	Metám. I	0.93	-	-	-	-
	Metám. II	-	-	7.69	-	-
	Metám. IV	-	2.08	-	4.10	-
	Metám. V	-	-	-	-	22.70

TABLA 6-XVII. Logaritmo de la fracción de Weber.
(CIE-1931).

OBSERVADOR	IGUALACION	AZUL	PURPURA	ROJO-AN.	AMARILLO	VERDE-AM.
L.J.	"C. Isóm."	-0.99	-1.38	-1.20	-1.76	-1.26
	Metám. I	-0.98	-1.06	-1.11	-	-
	Metám. II	-1.10	-1.15	-1.19	-1.49	-0.98
	Metám. III	-	-	-0.98	-1.23	-
	Metám. IV	-1.03	-1.11	-	-1.46	-1.19
	Metám. V	-	-	-	-	-0.93
J.R.	"C. Isóm."	-0.92	-1.12	-1.11	-1.59	-1.03
	Metám. I	-0.81	-1.02	-1.14	-	-
	Metám. II	-1.09	-1.00	-1.01	-1.45	-0.94
	Metám. III	-	-	-0.84	-1.32	-
	Metám. IV	-1.07	-1.01	-	-1.41	-1.26
	Metám. V	-	-	-	-	-0.84
E.H.	"C. Isóm."	-	-1.23	-	-	-
	Metám. I	-0.91	-	-	-	-
	Metám. II	-	-	-1.15	-	-
	Metám. IV	-	-1.04	-	-1.39	-
	Metám. V	-	-	-	-	-0.93

7. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

La discusión de los resultados aportados en este trabajo implica necesariamente el análisis detallado de dos aspectos fundamentales derivados de los mismos: la evaluación cuantitativa de sus repercusiones por un lado y la posible justificación de los mismos en base a los modelos sobre percepción cromática por otro.

Un aspecto de sumo interés en los mismos radica en la concordancia de evoluciones encontradas para los dos observadores utilizados, así como la confirmación de tendencias por parte del tercer observador en aquellos casos en que aparecen variaciones más significativas.

Aunque la utilización de un número mayor de observadores hubiese sido deseable en aras de conseguir una mayor generalización de conclusiones, lo apuntado en el párrafo anterior ha venido a paliar esta limitación que, por otro lado, es muy frecuente en la literatura específica, Ronchi y Ferrara-Mori (1963), donde se pone de manifiesto que el número de observadores empleados en trabajos de este tipo presenta un máximo

muy acusado para dos, lo que, por otro lado es justificable en base a las dificultades que se presentan en estas experiencias por lo tedioso y lento de su realización así como la escasa disponibilidad de observadores con práctica en este tipo de experiencias. A título de ejemplo cabe mencionar que los resultados aportados originalmente en trabajos tan trascendentes como el de McAdam (1942) y que han servido de base para la Colorimetría Diferencial, fueron obtenidos solamente con un observador.

Una consideración interesante que se desprende de la observación directa de los resultados anteriores es la clara dependencia de la discriminación cromática con el grado de metamerismo de las igualaciones de partida.

De hecho se puede establecer que, en mayor o menor grado, para todos los casos analizados aparecen desplazamientos y variaciones significativas de los elipsoides de discriminación al variar el grado de metamerismo de la igualación de partida.

La explicación de estas variaciones es sencilla en su base pero difícil en su justificación cuantitativa. Obsérvese que el hecho de que los umbrales obtenidos en cada caso pueden llegar a no ser coincidentes en ningún punto, lo que es frecuente en gran parte de los resultados, implica necesariamente que estímulos vistos como iguales por el observador utilizado, nunca lo hubieran sido para el el observador patrón. La justificación de este hecho puede explicarse en función de las diferencias existentes entre las funciones de mezcla del observador patrón y las del observador real, pero las diferencias encontradas llegan a ser de tal magnitud que en algunos casos cabe plantearse la necesidad de revisión de algunos aspectos clásicos considerados como básicos en el estudio de la Colorimetría.

En efecto, el objetivo fundamental de la Colorimetría radica en la especificación del color percibido y el de la Colorimetría Diferencial en estudiar los límites de tal especificación, basados en el conocimiento de los umbrales diferenciales de color como representativos de la limitación en la capacidad de discriminación de observadores reales. Bajo estos puntos de vista hay que considerar como normal que una igualación de color realizada por dos observadores distintos puede ser representada por puntos diferentes del diagrama cromático, basándonos en las diferencias existentes en las funciones de mezcla de ambos observadores, más aún si las igualaciones son metámeras, pero si la Colorimetría ha de ser útil, ambos puntos de especificación deben pertenecer a un mismo umbral "generalizado", entendiéndose por tal aquel que se considera representativo de las tolerancias fijadas por el observador medio y a lo sumo serían aceptables pequeñas desviaciones de este planteamiento; si bien, dado el carácter promedio del observador patrón, cabría esperar una contemplación de estas desviaciones, al menos en el estudio de umbrales normales, aunque podrían presentarse desviaciones más significativas en el estudio de los supraumbrales.

Las consecuencias de los resultados que se han obtenido pueden ser muy significativas a la hora de revisar conceptos primarios en la Ciencia del Color. En efecto, una de las leyes de Grassmann, o ley transitiva, establece que si un color A es igual a otro B y éste a un tercero C, A y C son iguales. Si tenemos en cuenta la limitación en la capacidad de discriminación y la representación que suponen los umbrales diferenciales de cromaticidad en un determinado diagrama cromático, a partir de las normas de especificación del color, ello se puede considerar contemplado en la figura 7.1. En este caso queda suficientemente explicado el hecho de que si dos colores A y D son percibidos como diferentes, entonces sus umbrales diferenciales de cromaticidad y los puntos que los representan en el espacio

sicofísico del color estarán lógicamente localizados en zonas diferentes del diagrama cromático, todo esto cuando se trata de igualaciones isómeras. No obstante, se presentan zonas fronterizas de solapamiento, lo cual es una cuestión inherente al propio método de representación del umbral con los problemas que supone en cuanto a la métrica del espacio de color y estructura matemática del mismo, Hita et al (1977), Alvarez-Claro e Hita (1978).

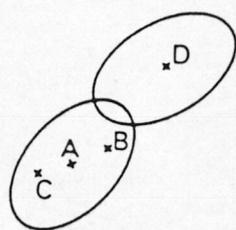


Figura 7.1

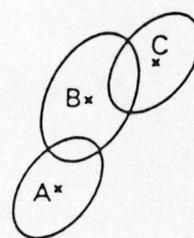


Figura 7.2

Por el contrario, si la igualación realizada es metámera, casos como los que se representan en la figura 7.2, muy frecuentes en los resultados de la presente memoria, suponen que tres colores que han sido vistos como iguales por un observador real, y para los que se ha determinado su umbral diferencial de cromaticidad, quedan representados por diferentes puntos del diagrama de cromaticidad. De ello podría inferirse una no adecuación de las funciones de mezcla del observador patrón a las de observadores reales, al menos cuando se trata de igualaciones metámeras y parecería lógico pensar que las distorsiones y desplazamientos encontrados dejarían de serlo si en cada experiencia y para cada observador se utilizasen sus propias funciones de mezcla. Esto último implicaría la necesidad de su medida en cada caso, lo que no es fácil y, por otro lado, restaría generalidad al planteamiento básico de la Colormetría, pues se haría necesario un control indivi-

dual de resultados experimentales, lo que no parece lógico teniendo en cuenta la similitud de comportamientos del sistema visual para diferentes individuos (con visión cromática normal), y desde luego cambiarían los razonamientos básicos de toda posible ambición generalizadora, objetivo de cualquier planteamiento científico.

Por otra parte, la similitud de resultados obtenidos para los tres observadores, hace pensar que, al menos bajo unas mismas condiciones experimentales (composiciones espectrales fijadas en una misma igualación), las diferencias entre las funciones de mezcla de un conjunto de observadores normales no son tan significativas.

En este sentido cabe analizar los resultados bajo la perspectiva de las desviaciones que se presentan, respecto al comportamiento medio, en el conjunto de las funciones de mezcla de los individuos que se emplearon para establecer el observador patrón. En la tabla 7-I se presentan estas desviaciones calculadas sobre el conjunto de observadores que se utilizaron al definir el observador patrón CIE-1964 y que han sido publicadas por Allen (1969).

TABLA 7-I

λ	$\Delta\bar{x}$	$\Delta\bar{y}$	$\Delta\bar{z}$	λ	$\Delta\bar{x}$	$\Delta\bar{y}$	$\Delta\bar{z}$
390	-.0031 ^a	-.0001	-.0100	560	-.0491	-.0242	-.0056 ^a
400	-.0135	-.0005	-.0433	570	-.0708	-.0324	-.0045 ^a
410	-.0338	-.0014	-.1070	580	-.0815	-.0360	-.0039 ^a
420	-.0441	-.0026	-.1414	590	-.0872	-.0366	-.0030 ^a
430	-.0353	-.0051	-.1149	600	-.0758	-.0318	-.0024 ^a
440	-.0194	-.0039	-.0688	610	-.0590	-.0250	-.0018 ^a
450	.0155	.0027	.0484	620	-.0455	-.1054	-.0033 ^a
460	.0462	.0101	.1389	630	-.0126	-.0052	-.0008 ^a
470	.0374	.0151	.0941	640	-.0029	-.0012	-.0002 ^a
480	.0325	.0216	.0674	650	.0016	.0007	.0001
490	.0278	.0316	.0441	660	.0032	.0014	.0001
500	.0215	.0330	.0240	670	.0052	.0024	.0001
510	.0167	.0206	.0172	680	.0017	.0007	.0000
520	.0105	.0191	.0057	690	.0009	.0004	
530	-.0043	-.0058	-.0027	700	.0005	.0002	
540	-.0193	-.0206	-.0057	710	.0002	.0001	
550	-.0035	-.0225	-.0063 ^a	720	.0001	.0001	

En ellas se puede observar que las mayores variaciones se localizan precisamente en las zonas del espectro correspondientes a tonalidades azules, lo cual no deja de ser significativo en relación a algunas tendencias aparecidas en los resultados de la presente memoria cuando se emplean primarios de color de estas tonalidades con características espectrales muy diferentes a las de los primarios del colorímetro de referencia.

Hemos creído interesante modificar las funciones de mezcla del observador patrón adicionándoles un término correctivo, dado por las desviaciones calculadas por Allen, y comprobar la variación cuantitativa con que se traducirían en las coordenadas de cromaticidad (el autor referido mantiene que estas mismas desviaciones pueden ser satisfactorias para el observador patrón CIE-1931). Según esto:

$$\begin{aligned}\bar{x}_{\lambda \text{ mod}} &= \bar{x}_{\lambda} + \Delta \bar{x}_{\lambda} \\ \bar{y}_{\lambda \text{ mod}} &= \bar{y}_{\lambda} + \Delta \bar{y}_{\lambda} \\ \bar{z}_{\lambda \text{ mod}} &= \bar{z}_{\lambda} + \Delta \bar{z}_{\lambda}\end{aligned}$$

Los resultados que hemos obtenido con esta modificación han puesto de manifiesto que nunca aparecen, en las coordenadas de cromaticidad, variaciones superiores a una unidad en la segunda cifra significativa con que se expresan, nunca llegando a alcanzar las dos unidades de la misma. Ello está de acuerdo con nuestros resultados para una misma igualación y diferentes observadores, tanto cuando la igualación ha sido cuasi-isómera como metámera.

En este mismo sentido, una cuantificación del problema

que supondrían las variaciones de las funciones de mezcla, que permitiese obtener las mismas coordenadas de cromaticidad que el observador patrón por un observador real, se podría plantear de la siguiente forma:

Sea $M_{i\lambda}$ uno de los términos correspondientes a una de las componentes de un índice general de metamerismo que evalúa el grado de una igualación metámera realizada por el observador patrón sicofísico, y $M'_{i\lambda}$ el correspondiente a un observador real, con:

$$\begin{aligned} M_{i\lambda} &= \bar{x}_{i\lambda} \cdot (L_{e\lambda}^{\circ} - L'_{e\lambda}) \\ M'_{i\lambda} &= \bar{x}_{i\lambda} \cdot (L''_{e\lambda} - L'_{e\lambda}) \end{aligned} \quad (7.1)$$

donde:

$\bar{x}_{i\lambda}$ = coeficiente de distribución ó función de mezcla para la longitud de onda λ ($i=1,2,3$ / $\bar{x}_1 = \bar{x}_\lambda$, $\bar{x}_2 = \bar{y}_\lambda$, $\bar{x}_3 = \bar{z}_\lambda$).

$L_{e\lambda}^{\circ}$ = Radiancia espectral relativa con que iguala el observador patrón, en el colorímetro variable, la correspondiente al color producido por el colorímetro de referencia , $L'_{e\lambda}$.

$L''_{e\lambda}$ = Radiancia espectral relativa con que iguala el observador real, en el colorímetro variable, la correspondiente al color producido por el colorímetro de referencia , $L'_{e\lambda}$.

entonces podemos plantear la diferencia metamérica del observador real respecto al observador patrón sicofísico, en la forma:

$$\Delta M_{i\lambda} = M'_{i\lambda} - M_{i\lambda} = \bar{x}_{i\lambda} (L''_{e\lambda} - L^{\circ}_{e\lambda}) \quad (7.2)$$

Considerando la hipótesis de que las diferencias en las igualaciones de ámbos es debida a variaciones en las funciones de mezcla del observador real respecto al patrón, se puede expresar:

$$M_{i\lambda} = \bar{x}_{i\lambda} (L^{\circ}_{e\lambda} - L'_{e\lambda}) \quad (7.3)$$

$$M'_{i\lambda} = \bar{x}''_{i\lambda} (L^{\circ}_{e\lambda} - L'_{e\lambda})$$

donde $\bar{x}''_{i\lambda}$ serían las funciones de mezcla del observador real que permiten igualar un color con la misma radiancia espectral $L^{\circ}_{e\lambda}$ con que lo hace el observador patrón.

Con lo cual, según las ecuaciones (7.3):

$$\Delta M_{i\lambda} = M'_{i\lambda} - M_{i\lambda} = (\bar{x}''_{i\lambda} - \bar{x}_{i\lambda}) (L^{\circ}_{e\lambda} - L'_{e\lambda}) \quad (7.4)$$

e igualando las expresiones (7.2) y (7.4)

$$\bar{x}_{i\lambda} (L''_{e\lambda} - L^{\circ}_{e\lambda}) = (\bar{x}''_{i\lambda} - \bar{x}_{i\lambda}) (L^{\circ}_{e\lambda} - L'_{e\lambda})$$

de donde:

$$\bar{x}''_{i\lambda} = \bar{x}_{i\lambda} \cdot \left[1 + \frac{(L''_{e\lambda} - L^{\circ}_{e\lambda})}{(L^{\circ}_{e\lambda} - L'_{e\lambda})} \right]$$

obteniéndose así las funciones de mezcla del observador real como una función de las del observador patrón y de las radiancias espectrales relativas que intervienen en las igualaciones métricas realizadas por ambos.

No obstante, el hecho de que las variaciones de las coordenadas de cromaticidad correspondientes a un mismo estímulo tomen valores, para las distintas igualaciones metámeras, que superan las que cabía esperar de las desviaciones propias entre observadores (evaluadas según los cálculos realizados por Allen, antes referidos), hace que deban contemplarse otras vías de análisis e interpretación. De hecho, los cálculos que proponemos suponen un método matemático de cuantificar indirectamente el problema pero no una explicación del mismo.

Una posibilidad más de enfocar esta cuestión puede radicar en el hecho, ya clásico, de reconsiderar la posibilidad de que la elipse y el elipsoide no sean las formas más adecuadas de representar los umbrales diferenciales de cromaticidad y color, pudiéndose aceptar formas geométricas más complejas para los mismos, Parra (1970), Hita et al (1982-b), que tienen en cuenta las asimetrías que se presentan en la capacidad de discriminación cromática en diferentes direcciones del espacio de color, como se puede observar en la figura 7.3. Los resultados de Crawford (1970) apuntan en este mismo sentido y dicho autor manifiesta la necesidad de realizar un estudio experimental del metamerismo.

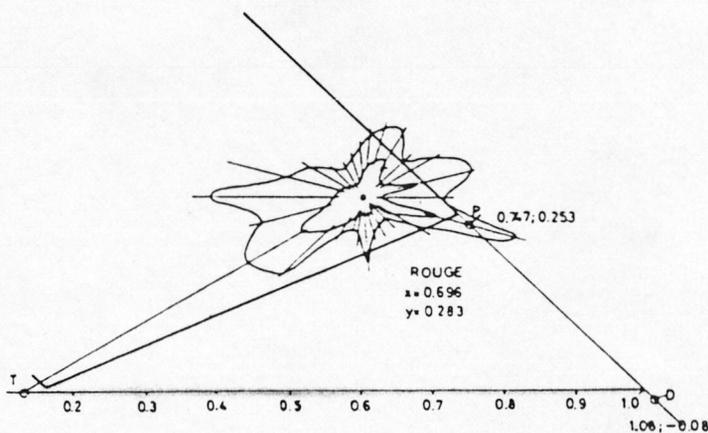


Figura 7.3 (resultados de Parra).

La posible existencia de formas no convexas de los umbrales diferenciales de cromaticidad, por ejemplo, podría englobar algunos de los resultados aquí aportados, y que se enmascararían al forzar a una elipse el umbral, ya sea por el método estadístico de ajuste de la nube de puntos representativa en el caso de emplear el método de los estímulos constantes, Wysocki (1959), o bien por el método experimental utilizado en la determinación del mismo, método del error medio, por ejemplo, utilizado por McAdam.

Finalmente y en lo referente a los desplazamientos que sufren los umbrales diferenciales respecto al obtenido en condiciones isómeras de partida, cabe plantearse la interpretación de los mismos bajo un punto de vista no colorimétrico, aunque íntimamente relacionado con él en cuanto a las consecuencias que de ello pueden derivarse. En este sentido es de esperar un comportamiento diferente de los mecanismos de la visión del color dependiendo de la composición espectral de la energía radiante que los excite.

La mayoría de los modelos de visión cromática propuestos hasta la fecha, Hering (1878), Jameson y Hurvich (1968), Vos y Walraven (1971), Ingliind (1982), se basan en la existencia de dos zonas (modelos zonales), una primera con tres sistemas de conos receptores seguida de otra zona en que las señales de estos receptores son combinadas para extraer la información correspondiente a luminancia y cromaticidad con un posterior procesamiento neural.

Hemos de destacar que no existe un conocimiento completo del funcionamiento de estos mecanismos, tanto de los fotorreceptores como de sus fotorreceptores, y la mayoría de los modelos han sido elaborados "ad-hoc" para explicar el comportamiento de fenómenos visuales concretos.

En esta línea, el trabajo de Estevez (1979) ha revelado la intrusión de bastones en las medidas colorimétricas para campos inferiores a 2° , ya puesta de manifiesto anteriormente para campos superiores y en visión periférica, Moreland y Cruz (1959), Wyszecki y Stiles (1967), originando ello algunos fallos en las leyes de aditividad colorimétrica.

Esto último, unido a que la presente investigación se ha desarrollado con adaptación previa a la oscuridad y el nivel de luminancia de los estímulos estudiados cae dentro del fotópico bajo, hace plantearse de alguna forma una posible influencia de los bastones en los mecanismos de visión cromática con su correspondiente traducción en las medidas colorimétricas. De hecho es posible su relación con el conocido fenómeno de que el umbral absoluto disminuye en la zona roja del espectro visible, lo cual supone la equivalencia de la adaptación a estímulos rojos con la adaptación a la oscuridad. Ello explica en cierta medida los acusados desplazamientos que aparecen en la igualdad designada como "metámera-IV" donde se ha empleado un vidrio de color, de gran ancho de banda, para producir por transmisión el primario rojo del colorímetro variable.

Por otra parte cabe esperar que la responsividad espectral de los mecanismos de la visión cromática acusen diferencias cuando son excitados por estímulos luminosos de distinto ancho de banda espectral. Ello equivaldría a aceptar la no aditividad de respuestas espectrales dentro del rango de frecuencias en las que el fotorreceptor es sensible. Aunque este hecho no está estudiado mediante otro tipo de análisis experimental directo o indirecto, podría no obstante explicar nuestros resultados.

En efecto, si aceptamos las curvas de sensibilidad propuestas por Jameson y Hurvich (1968), por ejemplo, como representativas de la sensibilidad de los ftopigmentos presentes en la

retina, se observa que cada uno de ellos tiene una curva espectral (figura 7.4):

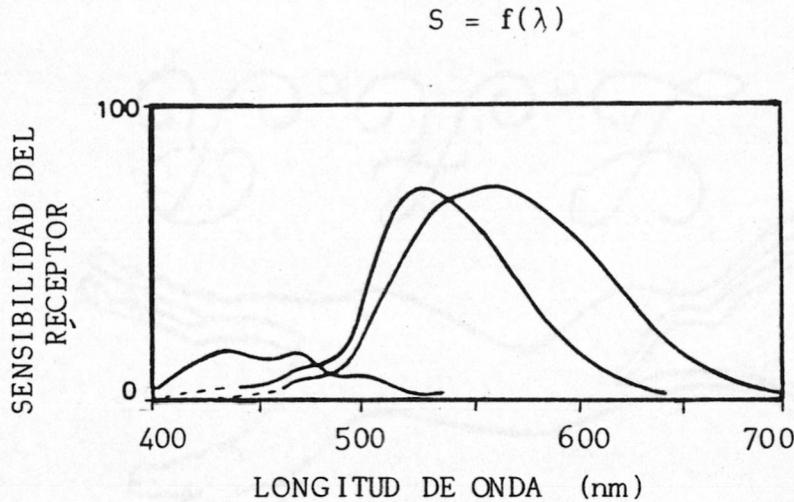


Figura 7.4

Si uno de estos fotorreceptores se excita con un estímulo monocromático cabe esperar que su respuesta sea proporcional a dicho estímulo y a la sensibilidad espectral según:

$$R_{\lambda} = k S_{\lambda} L_{e\lambda}$$

y en principio la respuesta para un estímulo no monocromático de ancho de banda amplio sería:

$$R_{\lambda} = \sum_{\lambda} k S_{\lambda} L_{e\lambda}$$

lo que implicaría un cumplimiento de la ley de aditividad y que si se acepta $k = \text{Cte.}$ para toda λ se podría poner:

$$R_{\lambda} = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} L_{e\lambda}$$

Ahora bien, este hecho no parece justificarse en base a

nuestros resultados, siendo necesario aceptar, al menos en principio, que la constante k toma distintos valores para cada intervalo espectral, con lo cual:

$$R_{\lambda} = \sum_{\lambda} k_{\lambda} S_{\lambda} L_{e\lambda}$$

o lo que es igual, una misma cantidad de energía produce distintos resultados en la respuesta del fotorreceptor cuando está concentrada en un intervalo estrecho de longitudes de onda, que cuando está más disperso.

Ello podría justificar nuestros resultados ya que la mayor distorsión de los mismos se produce cuando uno de los primarios interferenciales es sustituido por filtros de vidrio de las mismas tonalidades, o bien, cuando aunque los primarios estén originados por filtros interferenciales también sus longitudes de onda de máxima transmisión están muy desplazadas con respecto a los filtros utilizados para establecer el estímulo de referencia.

Por otro lado es posible también suponer que la constante de respuesta K_{λ} sea función no solo de λ sino también de $L_{e\lambda}$ variando para distintos niveles de energía de excitación, lo cual es lógico en base a la curva de responsividad espectral luminosa del ojo humano.

Lo anterior nos hace pensar en la necesidad de, en alguna medida revisar el observador patrón en el sentido de utilizar técnicas experimentales indirectas que permitiesen la utilización de estímulos no espectrales en su determinación. Esta necesidad es justificable también en base a que las leyes colorimétricas se basan en las leyes de Grassmann cuya verificación experimental se llevó a cabo inicialmente para estímulos no monocromáticos.

Nuestros resultados parecen estar de acuerdo con los obtenidos por Nimeroff y Stiles y Wyszecki ya comentados en el planteamiento de esta memoria.

Estos autores realizan un estudio de este tipo pero limitándose exclusivamente a la realización de una única igualación metámera para distintos puntos del diagrama cromático, lo cual no deja de plantear la posible influencia del metamerismo cuando para un mismo estímulo se efectúan diferentes igualaciones, como es el caso de esta investigación. Con relación a la discusión de nuestros resultados junto a los obtenidos por estos autores es interesante destacar que en ambos aparecen tendencias similares a las aquí presentadas; de hecho, obsérvense los acusados desplazamientos que obtienen en los puntos simbolizados con los números 9 y 18 (figura 2.3) correspondientes a tonalidades verde y púrpura respectivamente.

En este mismo sentido es interesante destacar que (al contrario de las condiciones experimentales de esta memoria) sus experiencias se plantean a partir de las igualaciones realizadas con un colorímetro tipo Donaldson de tres primarios respecto a colores producidos por un solo filtro que posee gran ancho de banda, lo cual puede observarse en la figura 7.5. En ella aparecen rayadas las zonas en que se han presentado diferencias entre observadores y es de mencionar que éstas se acusar mucho más en la región del espectro correspondiente a tonalidades azules.

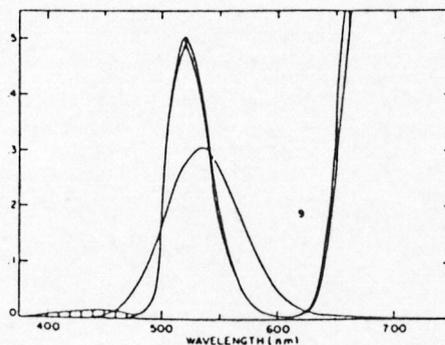


Figura 7.5. Spectral irradiance distributions for trial filter #9 and range of observers' matches.

Respecto a las variaciones que experimentan el resto de los parámetros característicos del proceso de discriminación (área, relación de semiejes, orientación, volumen y umbral diferencial de luminancia) hemos de señalar que no se observa ninguna pauta general en tales evoluciones al variar el grado de metamerismo respecto a la igualación cuasi-isómera (*).

Ello era en parte de esperar en base a que, como comentan Billmeyer y Saltzman (1981), los índices generales de metamerismo no proporcionan información sobre las diferencias de color sino sobre la magnitud de las mismas referente a sus diferencias en composiciones espectrales. No obstante, son bastante significativas las variaciones que aparecen en las componentes de dichos índices, cuando son evaluados mediante las expresiones propuestas por Nimeroff y Yurow ó Lozano, siendo interesante destacar el comportamiento del índice de este último autor que parece acusar mayores diferencias en la componente M_z , lo cual está bastante de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por otros autores, ya comentados, puesto que la zona de mayores divergencias suele ser la correspondiente a las longitudes de onda cortas del espectro visible.

(*) Un hecho experimental de interés aquí fué el encontrado por Donaldson, al modificar su colorímetro inicial de tres estímulos al de seis estímulos. La bondad en el funcionamiento de estos dispositivos, que se justifica simplemente por la mayor posibilidad de análisis de diferentes tonalidades, se ve ahora reforzada por el hecho de que aumentar el número de primarios equivale, en principio, a aumentar las posibilidades de disminuir el grado de metamerismo de las igualaciones cuasi-isómeras. Ello quizás hubiera evitado que (si bien en general el umbral diferencial obtenido en las igualaciones cuasi-isómeras contiene el estímulo de referencia estudiado) en el caso de los colores de tonalidades azul y púrpura el color de referencia se descentre respecto a su umbral. En lo cual puede también influir la mayor variabilidad que se obtiene en esta zona del diagrama cromático. No obstante este desplazamiento en concreto no es comparable con los obtenidos al variar el grado de metamerismo.

Por último hemos de resaltar que en todos los sistemas de representación del color adoptados las evoluciones son siempre similares, si bien es destacable el hecho de que la relación de semejez experimenta variaciones en unos sistemas frente a otros. Ello, como indicamos en el capítulo V, supone un comportamiento diferente en cuanto a la uniformidad de los mismos y un análisis de éste supone tener en cuenta dos factores: de una parte el valor que toma la relación de semejez para la elipse asociada al umbral de un estímulo de color determinado en cada sistema, y de otra las variaciones que presentan las áreas de las secciones elípticas en las distintas zonas del diagrama cromático en cuestión.

En el primero de los aspectos apuntados hemos de resaltar que, si bien se han realizado estudios de este tipo por otros autores, Pointer (1981), Hita et al (1984), los resultados obtenidos en esta investigación denotan que los sistemas UCS-CIE 1960 y CIELUV presentan una mayor relación de semejez pero, teniendo en cuenta el segundo de los factores apuntados anteriormente, el sistema CIELAB parece acusar menos diferencias en cuanto a las variaciones del área de las elipses en las distintas zonas estudiadas. No obstante este último sistema está fundamentalmente recomendado para la especificación de colores cuando se trabaja en modo de objeto y no en modo de apertura (como es el caso de la presente memoria), y por ello puede que las relaciones de semejez tomen valores más pequeños.

8. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones y aportaciones de la investigación presentada en esta memoria podemos resumirlas en los siguientes apartados:

1) Se ha realizado un estudio experimental de la influencia que sobre los procesos de discriminación cromática presenta la propiedad del metamerismo. Esta investigación se enmarca en el estudio de la dependencia que presentan los umbrales diferenciales de color con las condiciones experimentales que pueden influir en los mismos. Su justificación se basa en la escasez de trabajos de investigación, en la literatura científica, que abordan este problema mediante el empleo de colorímetros visuales, así como en la importancia del mismo con relación a las propias bases de la Colorimetría Diferencial.

2) Se ha puesto a punto un dispositivo experimental que permite la medida de los umbrales diferenciales de color, así como la especificación colorimétrica de estímulos de color con sufi-

cientes garantías en la reproducibilidad de los mismos dentro de las exigencias que se plantean en este tipo de investigación. Su diseño y funcionalidad permite la comparación de resultados con los obtenidos clásicamente en esta disciplina de la Ciencia del Color.

3) Las medidas efectuadas se han llevado a cabo con un total de tres observadores, con visión normal del color y práctica en este tipo de experiencias, para los cuales se han determinado los umbrales diferenciales de color bajo condiciones experimentales diferentes en cuanto al carácter metamérico de las igualaciones en color se refiere. Para ello se han estudiado cinco estímulos de color, suficientemente representativos, para cada uno de los cuales se han realizado cuatro igualaciones colorimétricas caracterizadas por sus diferencias en composición espectral medidas a través de índices generales de metamerismo.

4) En general, se observan variaciones significativas de los parámetros que caracterizan el proceso de discriminación cromática, a partir de los umbrales diferenciales de color, cuando estos se representan geoméricamente mediante sus elipsoides de error. En principio estas variaciones son difíciles de correlacionar con el valor que toma el grado de metamerismo y ello debido en parte a que los índices generales para la medida del mismo no proporcionan información sobre las diferencias de color, sino sobre las que toman sus composiciones espectrales.

5) De esto último se desprende la necesidad de nuevas investigaciones encaminadas al establecimiento de índices de metamerismo que tiendan a resolver estos problemas en base a un estudio teórico riguroso que explique satisfactoriamente los resul-

tados experimentales obtenidos por diferentes autores bajo ciertas condiciones experimentales. De hecho, en los resultados aportados en la presente memoria, se observan diferentes comportamientos de los índices calculados propuestos en la literatura científica, para unas mismas condiciones experimentales, lo cual ratifica la necesidad del establecimiento de un conjunto de criterios internacionales, como ya los hay en otros tipos de metamerismo distintos al estudiado, que permitan la comparación general de resultados obtenidos por distintos autores.

6) Se detectan prácticamente en todos los casos deslocalizaciones de los elipsoides de discriminación obtenidos para cada uno de los grados de metamerismo analizados respecto al caso de cuasi-isomerismo, llegando incluso a superar en algunos casos varias veces el umbral diferencial de cromaticidad asociado en en la dirección en que se presentan.

Estas deslocalizaciones no se correlacionan con el grado de metamerismo, posiblemente por las razones dadas en la conclusión cuarta. No obstante, presentan distinta magnitud para las distintas tonalidades estudiadas.

7) Los resultados obtenidos puede interpretarse que están en concordancia con las ideas apuntadas por Parra (1970), referente a las formas geométricas asociadas a los umbrales diferenciales de cromaticidad, ello en base a la posibilidad de obtener un umbral diferencial global de cromaticidad por superposición de los umbrales obtenidos para cada uno de los grados de metamerismo empleados, si bien no cabría asociar estos resultados al estudio de supraumbrales.

8) En casi todos los casos analizados las máximas desviaciones encontradas se producen cuando uno de los primarios present

ta características de ancho espectral muy elevado. Produciéndose las desviaciones mencionadas, en los sistemas de representación utilizados, precisamente hacia las zonas representativas de las tonalidades de dichos primarios.

9) Los resultados aquí aportados son independientes del observador utilizado y del sistema de representación adoptado, encontrándose evoluciones muy similares en todos los casos estudiados. No obstante, aparecen diferencias entre sistemas de representación que son función del mayor o menor comportamiento uniforme de los mismos, pero que en ningún caso afectan a las conclusiones de este trabajo.

10) Una explicación de los fenómenos apuntados en las conclusiones anteriores radica en la posibilidad de un comportamiento no lineal en la aditividad de las respuestas espectrales de los fotorreceptores del sistema visual, caso de aceptarse ésta, con una función espectral de proporcionalidad estímulo-respuesta, no constante. De hecho podría inferirse también una falta de linealidad en la respuesta radiancia espectral-sensibilidad, de dichos fotorreceptores.

Este hecho está en consonancia con los problemas más recientes relacionados con la elaboración de modelos visuales.

11) En base a lo expuesto parece desprenderse la necesidad de revisión del observador patrón CIE, en lo referente al establecimiento de las funciones de mezcla del mismo con determinaciones experimentales de ellas a partir de estímulos de ancho espectral alto, a fin de adaptar este patrón a condiciones experimentales más generales que las hasta ahora utilizadas en su determinación.

9. BIBLIOGRAFIA

ALLEN, E.- An Index of Metamerism for Observer Differences.

Proc. Int. Color Meeting "Color 69". Stockholm (1969)

ALVAREZ-CLARO, M.- Influencia de la adaptación cromática en la igualdad de colores metámeros.

Tesis Doctoral, Universidad de Madrid (1971)

ALVAREZ-CLARO, E. HITA y G. PARDO.- Espacio de color y estructura matemática (Primera parte).

Opt. Pur. Apl., 9, 109-111 (1976)

ALVAREZ-CLARO y HITA, E.- Espacio de color y estructura matemática (Segunda parte)

Opt. Pur. Apl., 11, 119-122 (1978)

BEZOLD, W.- Über das Gesetz der Farbenmischung und der physiologischen: Grundfarben

Pogg. Ann. 150, 221-247 (1873)

- BERNS, R.S. y BILLMEYER, F.W.- Proposed Indices of Metamerism with
Constant Chromatic Adaptation.
Color Res. Appl. 8 (3), 186 (1983)
- BILLMEYER, F.W. y SALTZMAN, M.- Observer Metamerism.
Color Res. Appl. 5, 72 (1980)
- BILLMEYER, F.W. y SALTZMAN, M.- Principles of Color Technology
John Wiley & Sons - New York. (1981)
- BILLMEYER, F.W.- Proposed New Terminology for Metamerism.
Color Res. Appl. 8 (3), 192 (1983)
- BROWN, W.R.J. y MacADAM, D.L.- Visual sensitivities to combined
chromaticity and luminance differences.
J.Opt. Soc. Am., 39, 808-834 (1949)
- BROWN, W.R.J.- The influences of luminance level on visual sensitivities to colour differences.
J. Opt. Soc. Am., 41, 684-688 (1951)
- CIE.- Special metamerism index: change in illuminant.
Publicación N° 15a. (1972)
- CIE.- Method of measuring and specifying colour rendering of light sources.
Publicación N° 13-2. (1974)
- CLARKE, F.J.J.- Extrafoveal colour metrics.
Opt. Acta. 7 (4), 355-274 (1960)
- CLARKE, F.J.J.- Further studies of extrafoveal colour metrics.
Opt. Acta. 10, 257-274 (1963)
- 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)
- ESTEVEZ, O.- On the fundamental data-base of normal and dichromatic color vision.
Tesis de Doctorado en Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad de Amsterdam (1979)
- GUILD, J.- The colorimetric properties of the spectrum.
Phil. Trans. Roy. Soc. (London), A230, 149-187 (1931)
- GRASSMANN, H.- Zur Theorie der Farbmischung.
Ann. Phys. Leipzig, 89, 69-84 (1853)
- HELMHOLTZ, H. von, Handbuch der Physiologischen.
Optik, 2. (Hamburg: Vos 1896)
- HALSTEAD, M.B.- Colour Rendering: Past, Present and Future.
A.I.C. Color 77, 97-127 Adam Hilger. Bristol (1978)
- HERING, E.- Zur Lehre von Lichtsinn
C. Gerald's Sohn, Viena (1878)
- HITA, E., ALVAREZ-CLARO, M., PARDO, G. y JIMENEZ, E.- Influencia del metamerismo y tipo de fusión de primarios en los umbrales diferenciales de color.
Opt. Pur. Apl., 9, 53-60, (1976)
- HITA, E., ALVAREZ-CLARO, M. y GUERRERO, M.- Differential thresholds representation of color.
Atti Fond. Giorgio Ronchi, 5, 882-893 (1977)
- 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. y JIMENEZ, E.- Differential threshold of color from isometric matching.
Atti Fond. Giorgio Ronchi, 35, 511-526 (1980)
- 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. 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., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L. y MARTINEZ, R.- Temporal aspects of color discrimination.
J. Opt. Soc. Am., 72, 578-582 (1982)
- HITA, E., GONZALEZ-CABALLERO, F. y CERVANTES, A.- On the geometric structure of color discrimination thresholds.
Farbe, 30, 55-64 (1982-b)
- HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO y CARRILLO, A.- Experimental study of color specification systems.
Farbe, (en prensa) (1984)
- INGLIND, C.- "Minutas de la Conferencia Colour-1982"
en Cambridge. Ed. Mollon, J.D. y Sharpe, T.D.
(pendiente de publicación en Academic Press)
- JAMESON, D. y HURVICH, L.M.- Opponent-response function related to measured cone photopigments.
J. Opt. Soc. Am., 58(3), 429-430 (1968).

- 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.- Problemas actuales del color.
Ed. Instituto de Optica "Daza de Valdés". Madrid (1954)
- JUDD, D.B. y WYSZECKI, G.- Color in Business, Science and Industry.
J. Wiley. Nueva York (1ª ed. 1963, 2ª ed. 1975)
- KEITZ, H.A.E.- Light calculation and measurement.
Eindoren Philips T. Library (1955)
- 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)
- KUEHNI, R.G.- A practical look at illuminant metamerism and color constancy.
AIC, "Color 77", 428-432. Adam Hilger. New York (1977)
- KUEHNI, R.G.- Advances in color-difference formulas.
Color Res. Appl., 7, 19-23 (1982)

- KUEHNI, R.G.- Metamerism exact and approximate.
Color Res. Appl., 8 (3), 193 (1983)
- 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., DRIU, J.R. y YASAN, E.D.- Estudio sobre diferentes ca-
bezales 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)
- MORELAND, J.D.- Thesis, Imperial College, University of London.
(1955)
- MORELAND, J.D. y CRUZ, A.- Colour perception with the peripheral retina
Optica Acta, 6, 117 (1959)

- NAYATANI, Y., TAKAHAMA, K. y SOBAGAKI, H.- Ultraviolet Assessment of Artificial Daylight by use of Fluorescent Metamers. AIC, "Color 77", 441-445. Adam Hilger. New York (1977)
- NAYATANI, Y., TAKAHAMA, K. y SOBAGAKI, H.- Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation. Color Res. Appl. 6, 161-171 (1981)
- NAYATANI, Y., TAKAHAMA, K. y SOBAGAKI.- Color Matching Function and Observer Metamerism. AIC. "Color 81". Proc. 4th. Congress of AIC. Berlin (1981)
- NIMEROFF, I.- Propagation of error in tristimulus colorimetry. J. Opt. Soc. Am., 47, 697-702 (1957)
- NIMEROFF, I.- Colorimetry in Parafoveal Fields. II. Additivity Failure. J. Opt. Soc. Am., 54 (6), 833-838 (1964)
- NIMEROFF, I. y YUROW, A.- Degree of Metamerism. J. Opt. Soc. Am., 55 (2), 185-189 (1965)
- OSA. (OPTICAL SOCIETY OF AMERICA). Psychophysics of color. Committee on Colorimetry. J. Opt. Soc. Am., 34 (5), 245-266 (1944)
- OHTA, N. y WYSZECKI, G.- Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers viewed under different illuminants. J. Opt. Soc. Am., 65 (3), 327-333 (1975)
- PARRA, F.- Seuils différentiels de couleur. Proc. Intern. Color Congr. "Color 69". Stockholm (Gottingen: Musterschmidt 1970) 727-733

- PLAZA, L.- La colorimetría y los observadores psicofísicos.
Libro Homenaje Dr. Durán (Madrid: Universidad Complutense, 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)
- PURDY, D. McL.- Spectral hue as a function of intensity.
Am. J. Psychol., 43, 541-559 (1931)
- ROBERTSON, A.R.- Critical Review of Definitions of Metamerism.
Color Res. Appl., 8 (3), 189-190 (1983)
- RODRIGUES, A.B. y BESNOY, R.- What is Metamerism?
Color Res. Appl., 5 (4), 220-221 (1980)
- RONCHI, L. y FERRARA MORI, G.- On the characteristics of observers employed in visual research.
Atti Fond. Giorgio Ronchi, 18, 203-219 (1963)
- SALTZMAN, M. y KEAY, A.M.- Colorant identification.
J. Paint. Tech., 39 (509), 360-367 (1967)
- SCHMITT, F.J.M.- A method for the treatment of metamerism in colorimetry.
J. Opt. Soc. Am., 66 (6), 601-608 (1976)

- SCHMITT, F.J.M.- A Statistical Generation of Metamers.
AIC "Color 77", 436-438. Adam Hilger. New York (1977)
- SCHROEDINGER, E.- Grundlinien einer theorie der farbemetri-
k in tagessehen.
Ann. Physik, 63, 481-520 (1920)
- SEVE, R.- Erreurs systematiques liees 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)
- STILES, W.S.- A modified Helmholtz line element in brightness-co-
lour space.
Proc. Phys. Soc. (London), 58, 41-65 (1946)
- STILES, W.S. y BURCH, J.M. NPL colour-matching investigation. Mean
results for pilot group of ten subjects.
Opt. Acta, 2 (4), 176-181 (1955)
- STILES, W.S. y WYSZECKI, G.- Counting metameric object colors.
J. Opt. Soc. Am., 52 (3), 313-328 (1962)
- STILES, W.S. y WYSZECKI, G.- Field trials of color mixture-functions.
J. Opt. Soc. Am., 52, 313 (1962)
- STROCKA, D.- Possibilities for Specifying an index of Observer Me-
tamerism.
AIC, "Color 77", 432-436. Adam Hilger. New York (1977)

- TAKAHAMA, K. y NAYATANI, Y.- New Method for generating. Metameric Stimuli of Object Colors.
J. Opt. Soc. Am., 62 (12), 1516-1520 (1972)
- TAKAHAMA, K. y NAYATANI, Y.- Adequateness of using 12 metameric gray object colors in appraising the Color-Matching Property of Lamps.
J. Opt. Soc. Am., 62 (1), 140-143 (1972)
- VOS, J.J. y WALRAVEN, P.L.- An analitical description of the line element in the zone fluctuation model of colour vision. Repport No. IZF 1970-5 (Soesterberg: Iustitute for Perception RVO-INO 1970)
- VOS, J.J. y WALRAVEN, P.L.- Derivation of foveal receptor primaries. Vision Res., 11, 799 (1971)
- 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, 389-383 (1959)

WYSZECKI, G.- Metameric object colors.
Acta chromatica, 1, 1 (1962)

WYSZECKI, G.- General discussion. III. Colour Metrics
(Soesterberg Vos, Friele y Walraven 1972-b) 330-338.

WYSZECKI, 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
New York. John Wiley. (1ª ed. 1967; 2ª ed. 1982)

WYSZECKI, G.- Color matching and color-difference matching.
J. Opt. Soc. Am., 62, 117-128 (1972)

ZAIDEL, A.N., OSTROVSKAYA, G.V. y OSTROVSKI.- Técnica y Práctica
de Espectroscopía.
(Moscú. Mir 1974)