

III. COLORIMETRIA Y SU APLICACION EN TELEVISION

INTRODUCCION

El estudio de la colorimetría es en sí una disciplina interesante pero a la vez compleja debido a su raíces. El fenómeno del color involucra mecanismos físicos, químicos (fisiológicos) y psicológicos; son los diferentes lenguajes que usan cada una de estas disciplinas los que, en gran medida, dificultan su comprensión global.

Nuestro análisis y descripción del fenómeno se restringirá a lo necesario para comprender su aplicación en televisión; aún cuando nuestra pretensión primaria es limitada y simple, en ocasiones mencionaremos aspectos que interesan a disciplinas especializadas y que resultan, para nuestro caso, en información fácil de alcanzar.

El sistema adoptado para la incorporación del color en la televisión constituye una "obra maestra de compromisos" entre las características del fenómeno, el mecanismo de la visión, la tecnología electrónica disponible y los requerimientos impuestos para su desarrollo.

La solución final es también el mejor ejemplo de lo que se ha denominado "economía de representación": en todo sistema en que el patrón final de evaluación es uno de los sentidos humanos, no es necesario proporcionar más estímulos que los que los órganos pertinentes son capaces de recibir. Para el caso de interés, lo anterior se interpreta (y aprovecha) como "lo que el ojo no ve, no necesita ser transmitido o reproducido".

1. Algunos hechos

- Las primeras experiencias destacables en referencia al fenómeno del color comienzan con I. Newton (Circa 1700): al hacer pasar un rayo o haz de luz solar por un prisma, el haz emergente consiste en un espectro continuo de colores, que varía desde el violeta en un extremo hasta el rojo en el otro. (Con longitudes de onda, como ahora conocemos, desde 380 nm hasta 780 nm aproximadamente). A estos colores los llamamos COLORES ESPECTRALES o REALES.

- Herman Grassman, en 1854, establece los fundamentos de la colorimetría (triestímulos):

a) El ojo distingue longitud de onda dominante, pureza y luminancia.

b) La luminancia (Y) de una mezcla de colores es igual a la suma de los valores individuales de luminancias.

$$Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots$$

c) Si Color A = color B
y color C = color D; entonces
Color A + color C = Color B + color D

c) Si Color A = color B + color C; entonces
Color B = Color A - color C

e) Si Color A = color B
y color B = Color C; entonces
Color A = Color C

- Diversos investigadores (Wald, Mark, McNichol y otros) plantean la existencia de tres tipos de receptores cromáticos en el ojo humano, CONOS, que se diferencian por presentar máximos de sensibilidad espectral en diferentes longitudes de onda.

Las diversas teorías, basadas casi todas ellas en mediciones fisiológicas, postulan sensibilidades espectrales relativas que presentan un alto grado de aproximación entre sí.

La figura III-1 muestra las sensibilidades postuladas por Young (coincidentes con las de Mc Adam, Müller), para los conos y sin considerar la transmitancia espectral selectiva de medio ocular: córnea - humor acuoso - lente - humor vítreo. La curva segmentada corresponde a la respuesta total o conjunta y se la conoce como FUNCION LUMINOSIDAD o RESPUESTA FOTOPICA.

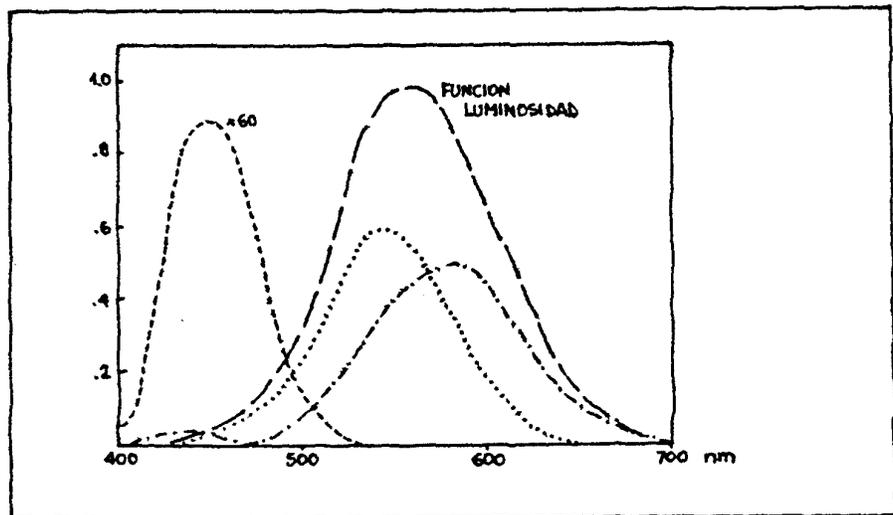


Fig. III-1. Sensibilidades espectrales relativas (Young).

Para niveles bajos de luminosidad, la visión la proveen los BASTONCITOS (RODS) que son de un solo tipo y no proporcionan entonces discriminación cromática: RESPUESTA ESCOTOPICA. Esta presenta su máximo desplazado a longitudes de onda más cortas. La figura III-2 muestra ambas respuestas.

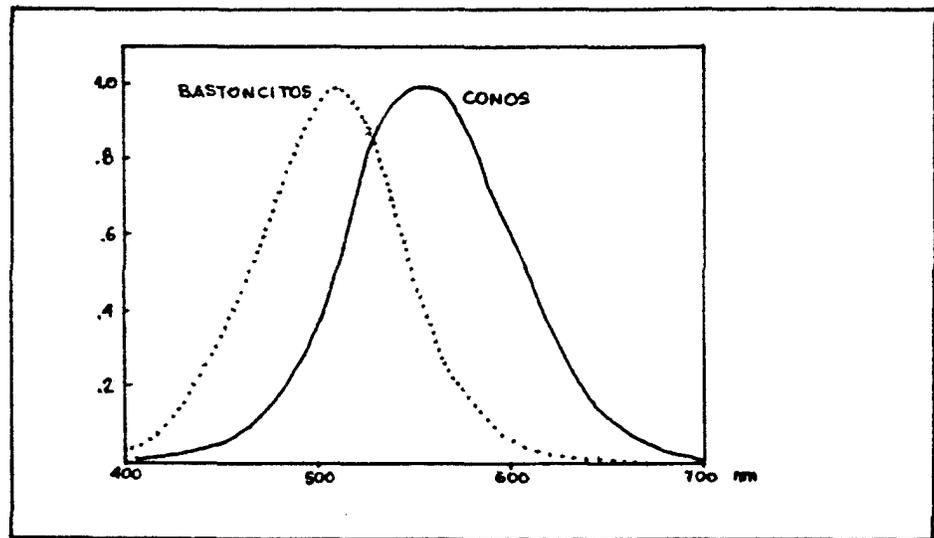


Fig. III-2. Respuestas fotópica y escotópica.

- Existen dos formas básicas de combinar colores:

Mezclas sustractivas: se basan en las propiedades de absorción espectral selectiva de ciertos pigmentos; al iluminar con luz blanca, o de determinada composición espectral, una superficie pintada, ciertas longitudes de onda serán absorbidas y sólo serán reflejadas las restantes. Al combinar pigmentos se combinan sus características selectivas.

Mezclas aditivas: consisten en la superposición de haces de luz de diferentes composiciones espectrales sobre una superficie blanca de reflexión difusa; así la luz reflejada contiene todas las longitudes de onda de las luces originales.

2. Percepción del color

El color no es una característica de un objeto sino más bien una característica de la luz. Puede ser definido con una propiedad sicofísica de la luz que produce las sensaciones de matiz, brillo y saturación (identificadas en la 1ra. ley de Grassman como longitud de onda dominante, luminancia y pureza, respectivamente).

La sensación final en la percepción del color (información recibida por el cerebro) está determinada por:

- la distribución espectral del iluminante
- la reflectancia o transmitancia espectral del objeto bajo observación
- la sensibilidad espectral del detector (ojo humano).

La figura III-3 muestra gráficamente la situación.

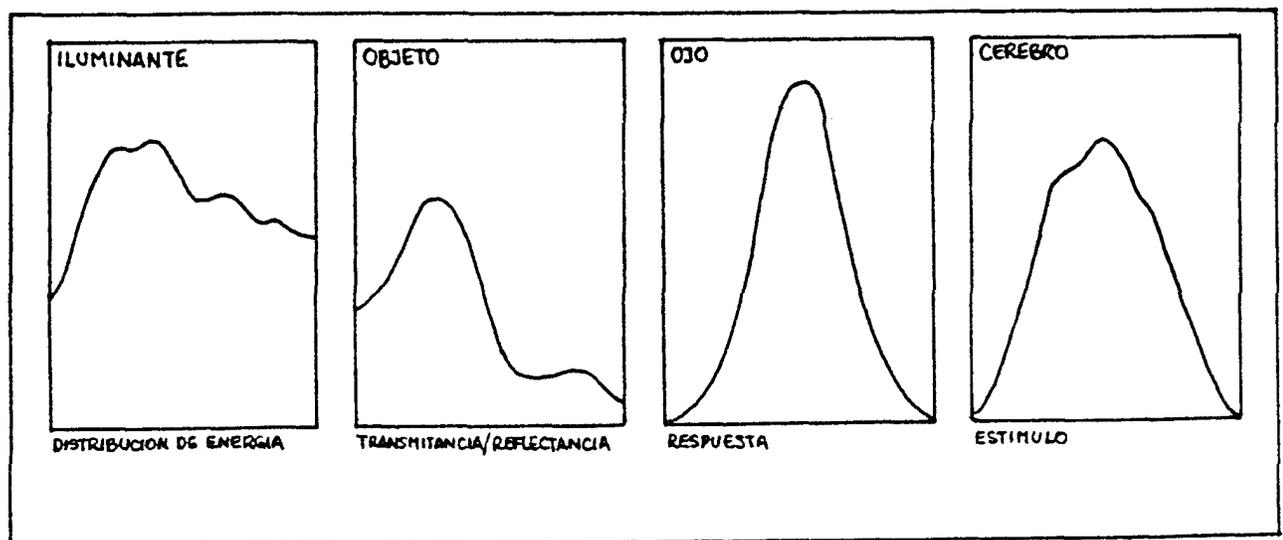


Fig. III-3. Percepción del color.

Debemos notar acá la posibilidad de que dos objetos con diferentes curvas de reflectancia espectral muestren el mismo estímulo final para una condición dada de iluminación (bajo cierta luz, se "ven" iguales en color); sin embargo, al cambiar la fuente de iluminación, los estímulos finales diferirán. Se conocen como PARES METAMERICOS u OBJETOS METAMERICOS.

En contraposición a lo anterior, PARES NO METAMERICOS* son aquellos con curvas de reflectancia espectral iguales y que producirán estímulos finales iguales entre sí para cualquier condición de iluminación.

Las figuras III-4 y III-5 ilustran la situación.

3. Reproducción del color (Síntesis)

La naturaleza tridimensional del fenómeno del color, sugerida por las tres variables necesarias para su definición (brillo - matiz - saturación) y apoyada por las investigaciones fisiológicas (tres tipos de conos en la retina) se ve adicionalmente avalada por evidencias experimentales: cualquiera sea el tipo de mezcla escogido, es necesario el uso de tres primarios para la síntesis o reproducción de los colores espectrales.

Las mismas experiencias (las más relevantes corresponden a Newton y Grassman, entre otros) demuestran también que las mezclas no pueden ser de un solo tipo: no existe un trío de

* Deplorable el no uso de ISOMEROS o ISOMERICOS, vocablo que debe descartarse por poseer una acepción en química, disciplina fuertemente involucrada con el fenómeno del color.

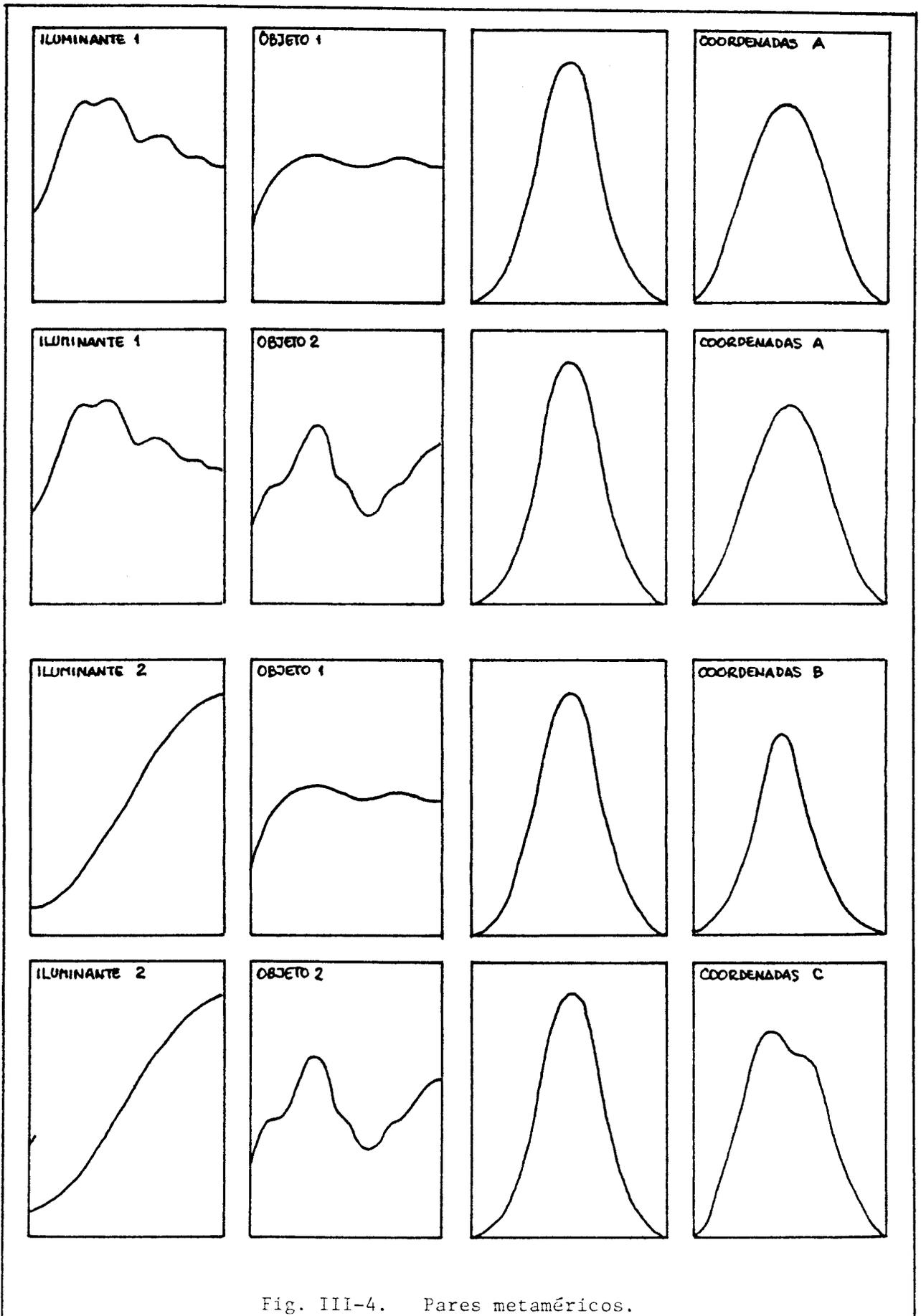


Fig. III-4. Pares metaméricos.

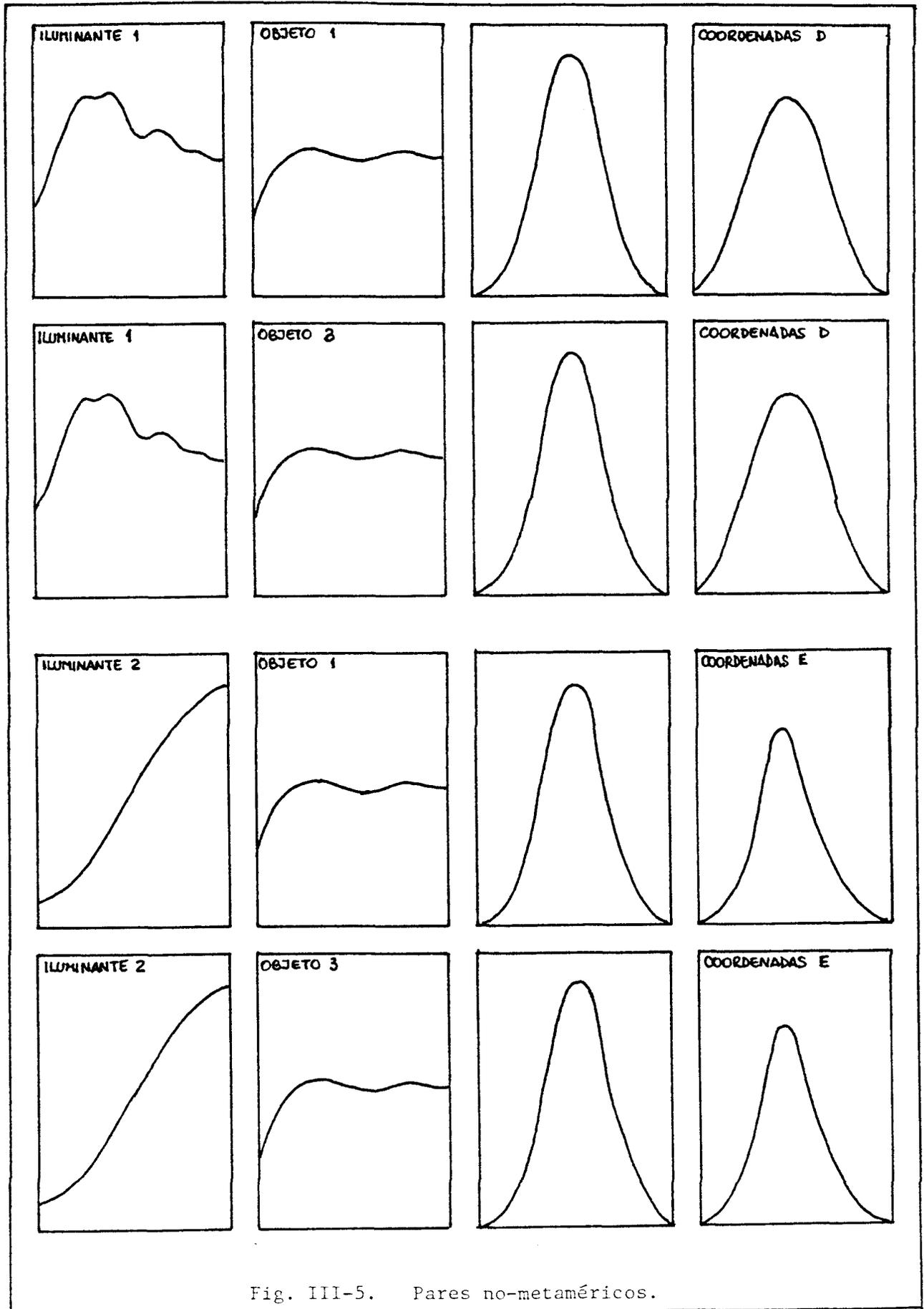


Fig. III-5. Pares no-metaméricos.

primarios reales que permita sintetizar todos los colores del espectro en base a mezclas exclusivamente aditivas (o exclusivamente sustractivas).

La figura III-6 indica las intensidades relativas de tres primarios reales (rojo de 650 nm - verde de 530 nm - azul de 460 nm) necesarias para lograr la síntesis de cualquier color espectral en el rango de 400 nm a 700 nm.

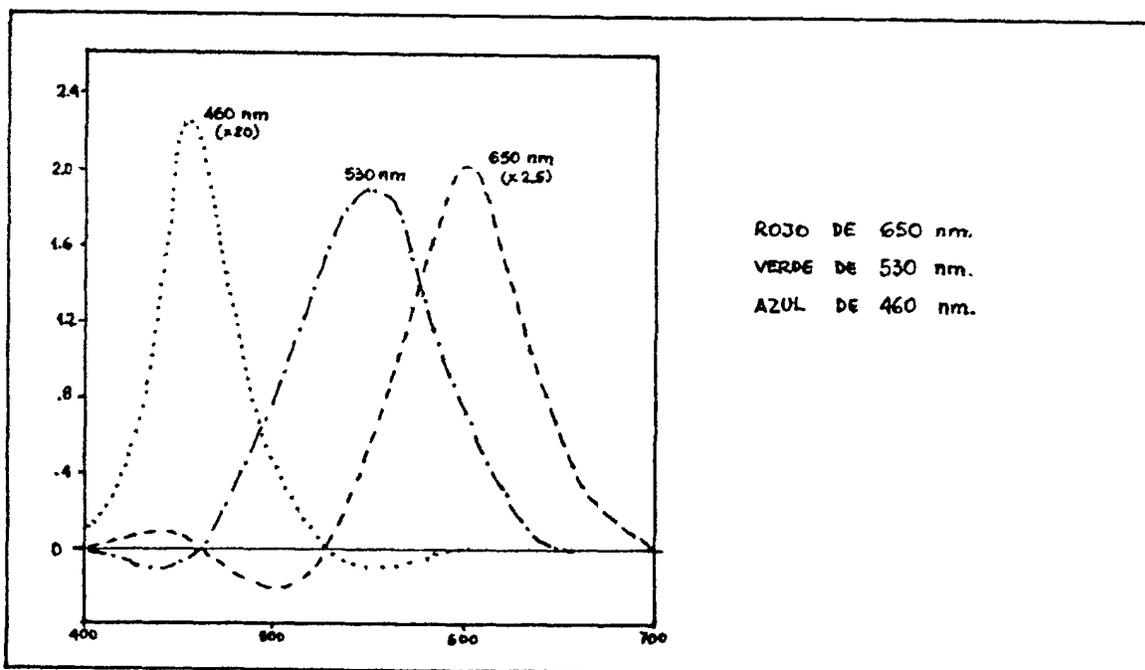


Fig. III-6. Síntesis mediante primarios reales.

Se observa que una gran zona del espectro requiere de intensidades negativas de alguno de los primarios; lo mismo sucede cualquiera sea el trío de primarios escogidos.

Para la aplicación en televisión se debe considerar sólo la alternativa de mezclas aditivas debido a la implementación necesaria; teóricamente (y prácticamente) sería posible una

solución en base a mezclas sustractivas pero la complejidad de las realizaciones descarta esta opción.

4. Primarios CIE

Se plantea un trío de primarios IMAGINARIOS o NO-REALES capaces de especificar un color mediante las cantidades necesarias, de cada uno de ellos, para lograr su síntesis empleando exclusivamente mezcla aditiva.

Estos primarios imaginarios deben cumplir además con una serie de condiciones en las que se fundamentará su definición:

- a) Todos los colores reales deben ser sintetizables usando sólo mezcla aditiva de los primarios (imaginarios).
- b) Una gama amplia de colores (en la zona amarillo-rojo, aproximadamente 550 nm a 700 nm) debe ser sintetizable usando mezcla (aditiva) de sólo dos de los primarios.

Esta condición se basa en las siguientes observaciones experimentales:

- la teoría tridimensional del color es necesaria para justificar la discriminación cromática sólo cuando el objeto observado es relativamente grande
- para objetos de tamaño mediano basta una teoría bidimensional; el rango de azul-purpurado se torna indistinguible del rango amarillo-verdoso
- para objetos muy pequeños o detalles muy finos la visión normal no provee percepción de color (visión en blanco/negro)

c) La luminosidad necesaria para la síntesis debe quedar especificada por uno de los primarios; esto es, uno de los primarios debe presentar una curva espectral equivalente a la función luminosidad o respuesta fotópica.

Estos primarios imaginarios han sido especificados por el CIE (Commission Internationale de L'Eclairage), en 1931, en base a las consideraciones anteriores y gracias a las contribuciones de Grassman, Maxwell, Ives, Munsell, Judd y otros. Se conocen como primarios X, Y y Z con funciones \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} respectivamente, las que se indican en la Fig. III-7.

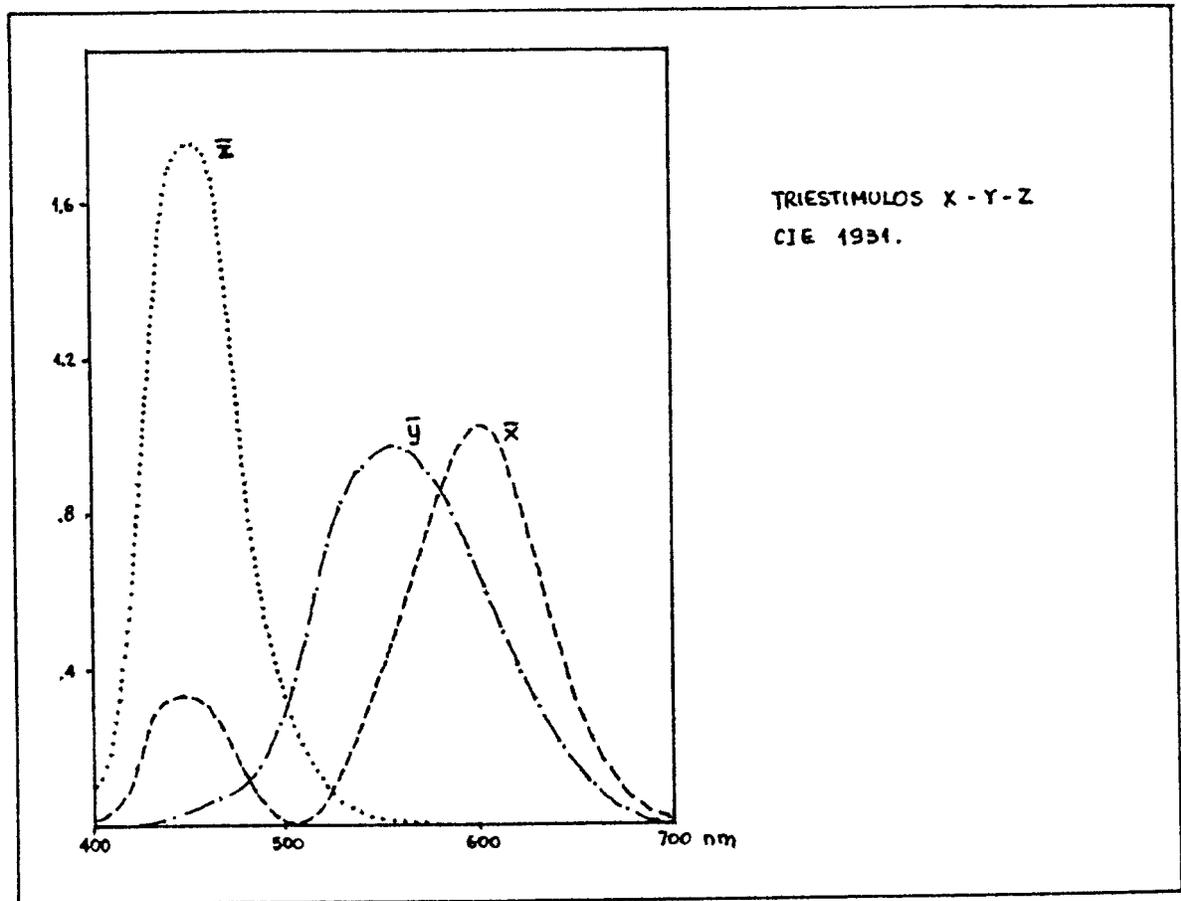


Fig. III-7. Primarios imaginarios.

Así, dado un color, éste puede especificarse mediante sus coordenadas X, Y, Z:

$$X = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{x} \, d\lambda$$

$$Y = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{y} \, d\lambda$$

$$Z = \int_{400}^{700} E_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot \bar{z} \, d\lambda$$

donde:

$E_{\lambda} = E(\lambda)$: distribución espectral de energía del iluminante.

$R_{\lambda} = R(\lambda)$: reflectancia espectral del objeto observado; para objetos traslúcidos se usará T_{λ} , transmitancia espectral,

$\bar{x} = x(\lambda)$: curva espectral del primario X.

$\bar{y} = y(\lambda)$: curva espectral del primario Y

$\bar{z} = z(\lambda)$: curva espectral del primario Z

Esta forma de especificación resulta mucho más conveniente y cómoda que señalar curvas de distribución espectral de energía del iluminante y de reflectancia espectral de la muestra.

Nuevamente aparece ahora la posibilidad de que dos objetos con diferentes reflectancias espectrales, bajo un cierto iluminante produzcan iguales coordenadas X, Y, Z:

para $E_{\lambda} = E_a(\lambda)$

se tiene:

$$X_1 = X_2; \quad Y_1 = Y_2; \quad Z_1 = Z_2$$

pero al cambiar de iluminante producirán coordenadas, en general, diferentes:

$$\text{para} \quad E_\lambda = E_b(\lambda)$$

se tiene: $X_1 \neq X_2; Y_1 \neq Y_2; Z_1 \neq Z_2$ (basta con una coordenada diferente).

Corresponde el caso a los pares metaméricos antes descritos de modo que ello no constituye conflicto.

Para un gran número de aplicaciones, entre ellas la televisión como veremos luego (debido a que la luminancia ya es transmitida para B/N), podemos obviar la especificación absoluta del nivel de luminosidad y trabajar entonces con cantidades relativas; éstas son:

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

a las que llamaremos COORDENADAS DE CROMATICIDAD.

Más aún, para una representación vectorial gráfica, podemos obviar la complejidad de un espacio tridimensional eligiendo un plano en él; éste es el plano definido por

$$X + Y + Z = 1$$

Como se indica en la figura III-8.

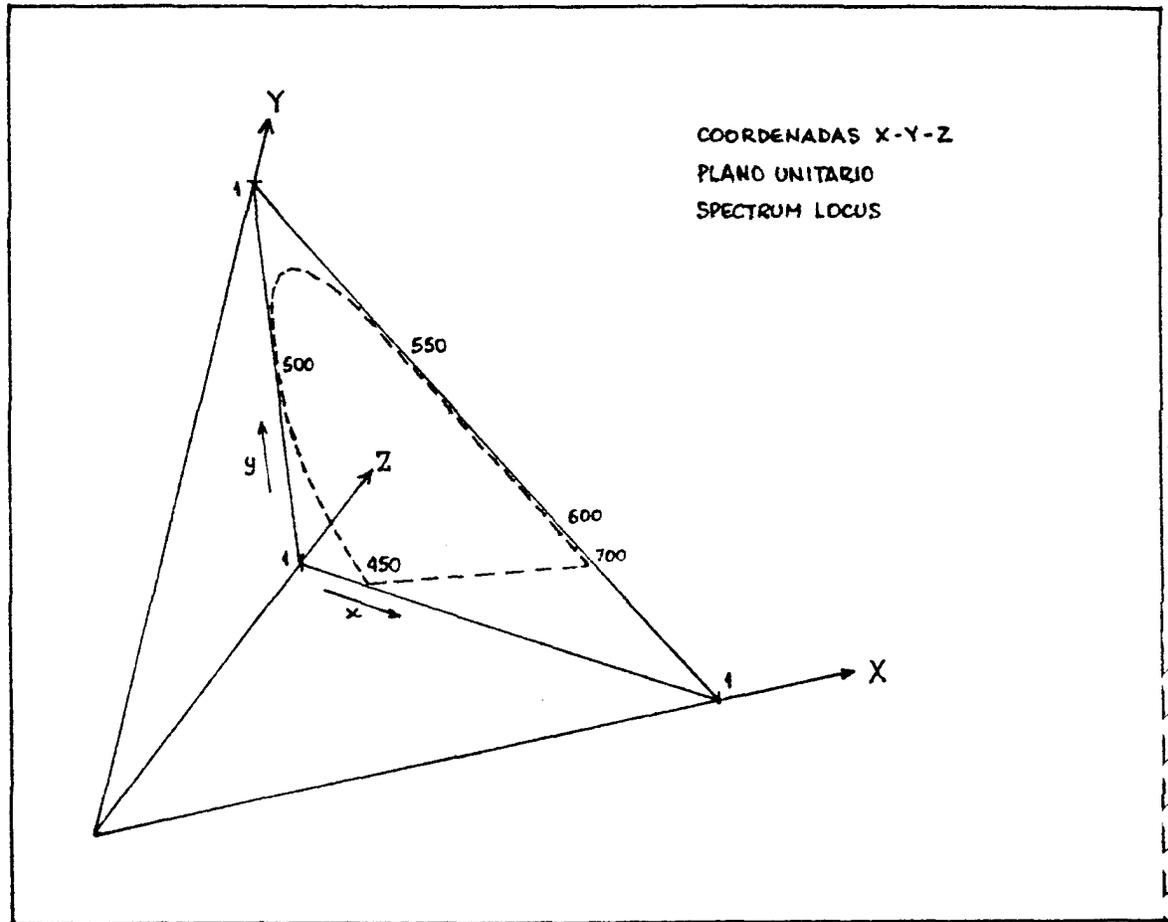


Fig. III-8.

Dada la definición de las coordenadas de cromaticidad, se tiene:

$$x + y + z = 1$$

de modo que basta con especificar sólo dos de ellas. Esto se realiza en el plano unitario generando el DIAGRAMA DE CROMATICIDAD CIE con coordenadas x (abcisa) e y (ordenada) como aparece en la figura III-9.

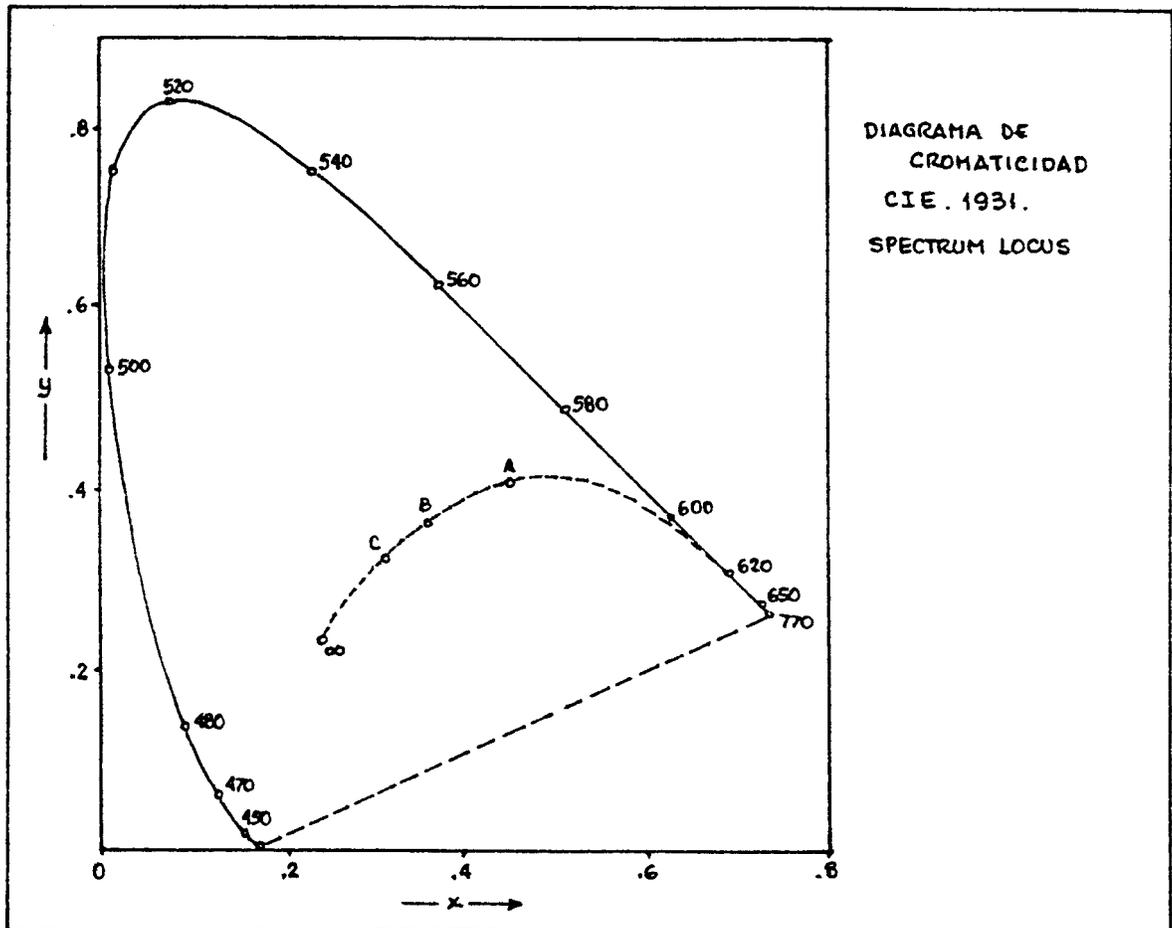


Fig. III-9.

La curva con forma de herradura representa el lugar geométrico del espectro real (SPECTRUM LOCUS). La recta que une los 380 nm (violeta) con los 770 nm (rojo) corresponde a los púrpuras, colores no espectrales.

Se señala también el lugar geométrico de iluminantes estandarizados por el CIE:

- Iluminante A: lámpara de filamento de tungsteno operando a 2854°K .
- Iluminante B: lámpara de filamento de tungsteno operando a 4870°K ; se plantea como representativo de la luz media al atardecer.
- Iluminante C: lámpara de filamento de tungsteno operando a 6770°K , representativo de la luz media diurna o BLANCO DE REFERENCIA*.

Sus distribuciones espectrales de energía se muestran en la figura III-10.

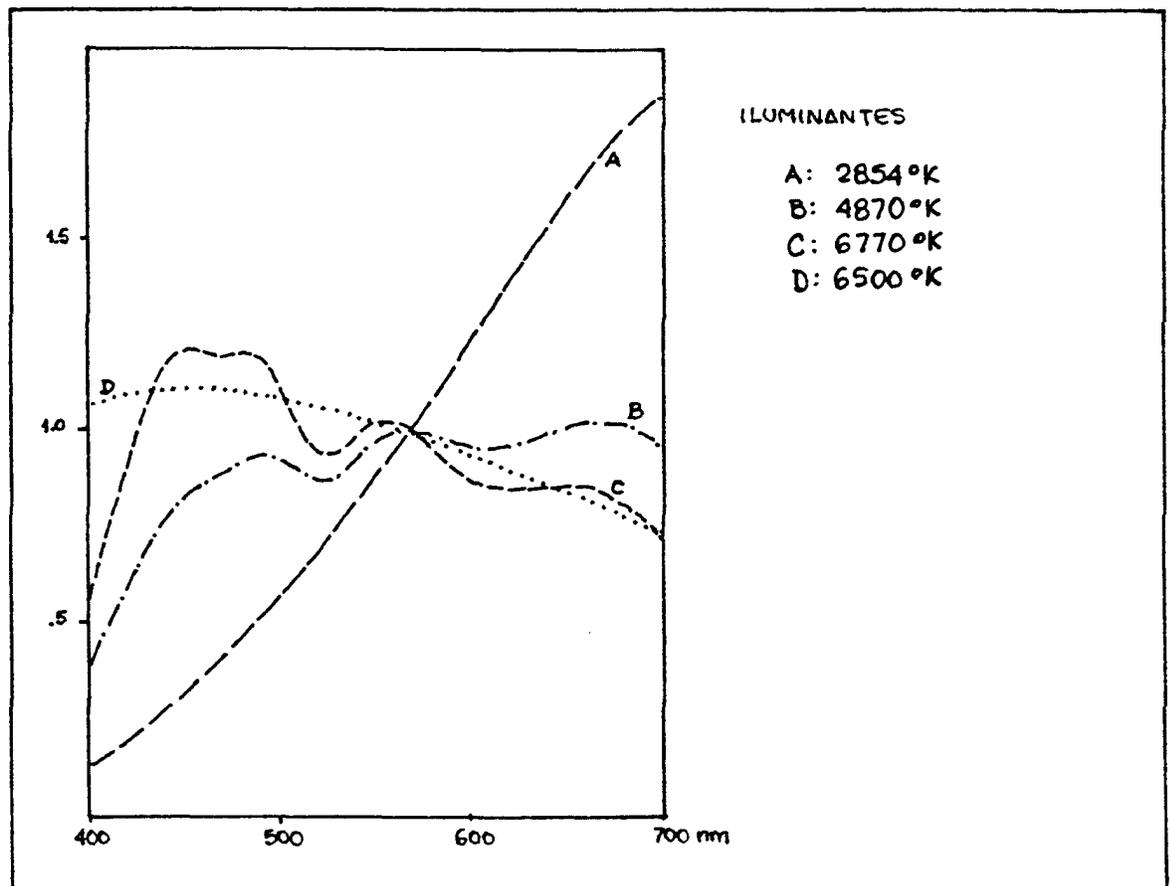


Fig. III-10.

* En la actualidad se prefiere el uso del iluminante D (6500°K) como blanco de referencia; dada la proximidad con el anterior (iluminante C), no existen diferencias significativas en los desarrollos o transformaciones posteriores.

5. Diagrama de Cromaticidad CIE 1931

El diagrama de Cromaticidad así obtenido permite una serie de apreciaciones, interpretaciones y procedimientos.

a) Matiz y saturación.

Considerando un observador representado por el iluminante C, el MATIZ se obtiene como la longitud de onda dominante: la intersección con el Spectrum Locus de la recta que, naciendo en el iluminante, pasa por la muestra o color a describir y se prolonga. La SATURACION o grado de pureza (característica inversa a la palidez) se obtiene como la distancia relativa entre la muestra y el iluminante.

Lo anterior se indica en la figura III-11.

Se observa también en el diagrama que la apreciación de una muestra depende del iluminante.

b) Mezcla aditiva con capacidad de síntesis limitada.

La afirmación realizada anteriormente en el sentido de que no existe un trío de primarios reales capaz de lograr la síntesis de todo el espectro en base a mezclas exclusivamente aditivas se confirma: dada la curvatura (forma) del Spectrum Locus, no existe un triángulo inscrito en él capaz de contenerlo.

c) Anomalías de la visión cromática.

Las anomalías de la visión cromática, especialmente los diversos tipos de confusiones cromáticas, se pueden interpretar como desplazamientos del observador (su punto representativo):

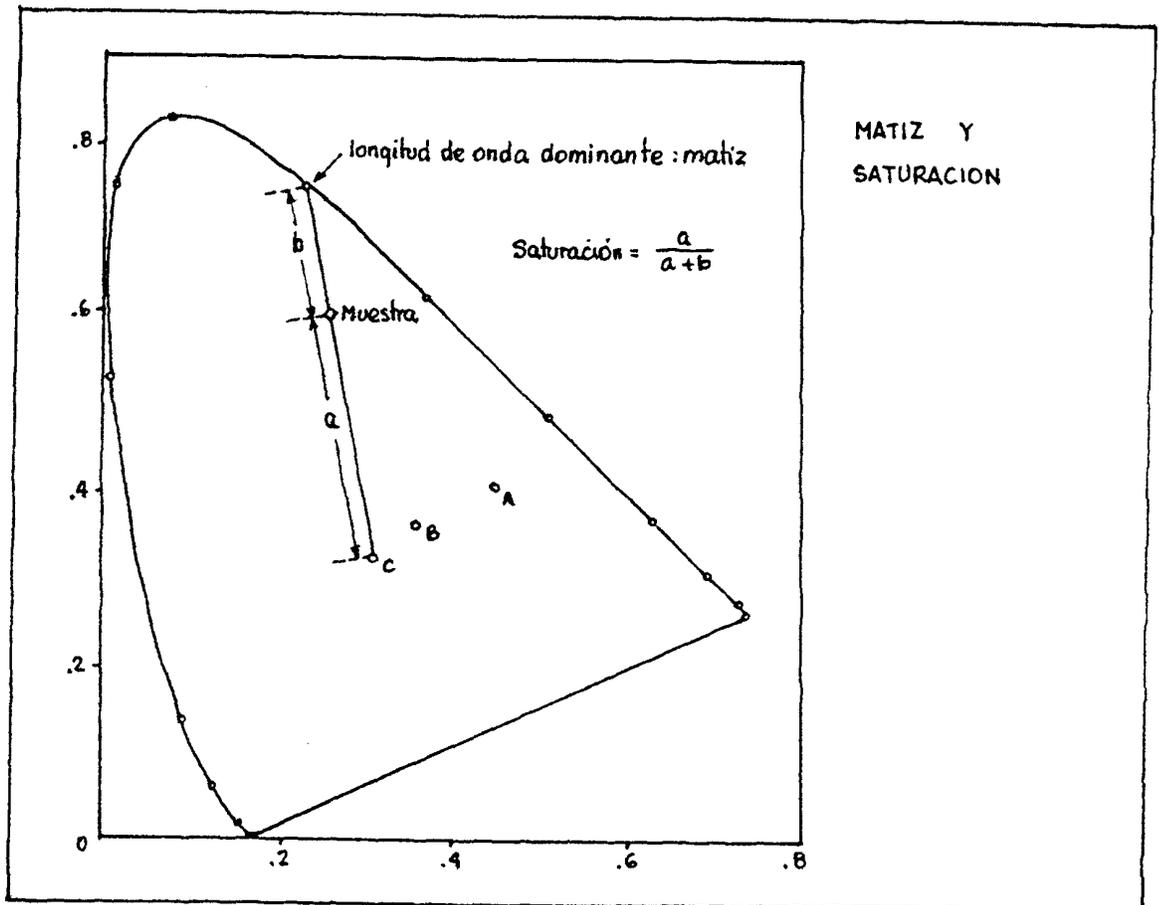


Fig. III-11.

- Para visión normal, el observador se considera ubicado en el iluminante C, o próximo a él; así es capaz de discriminar matiz (ángulo) y saturación (distancia relativa); $x = 0.310$, $y = 0.316$.
- Para PROTANOPIA, el punto del observador se considera en $x = 0.747$, $y = 0.253$, ocasionando confusiones entre rojo y naranja así como entre rojo-púrpura y verde-azulado (afecta al 1% de la población masculina y al 0,02% de la población femenina).

- Para DEUTERANOPIA, el observador se considera en $x = 1.0$, $y = 0.0$, de modo que es incapaz de resolver matiz entre púrpura-rojizo y verde. (1,1% de hombres y 0,01% de mujeres sufren esta anomalía).
- Para TRITANOPIA, la ubicación considerada es $x = 0,18$, $y = 0.0$ originando confusiones entre púrpura-azulado y amarillo-verdoso (muy baja incidencia: 0.002% hombres y 0.001% mujeres).

Los ejemplos anotados se grafican en la figura III-12.

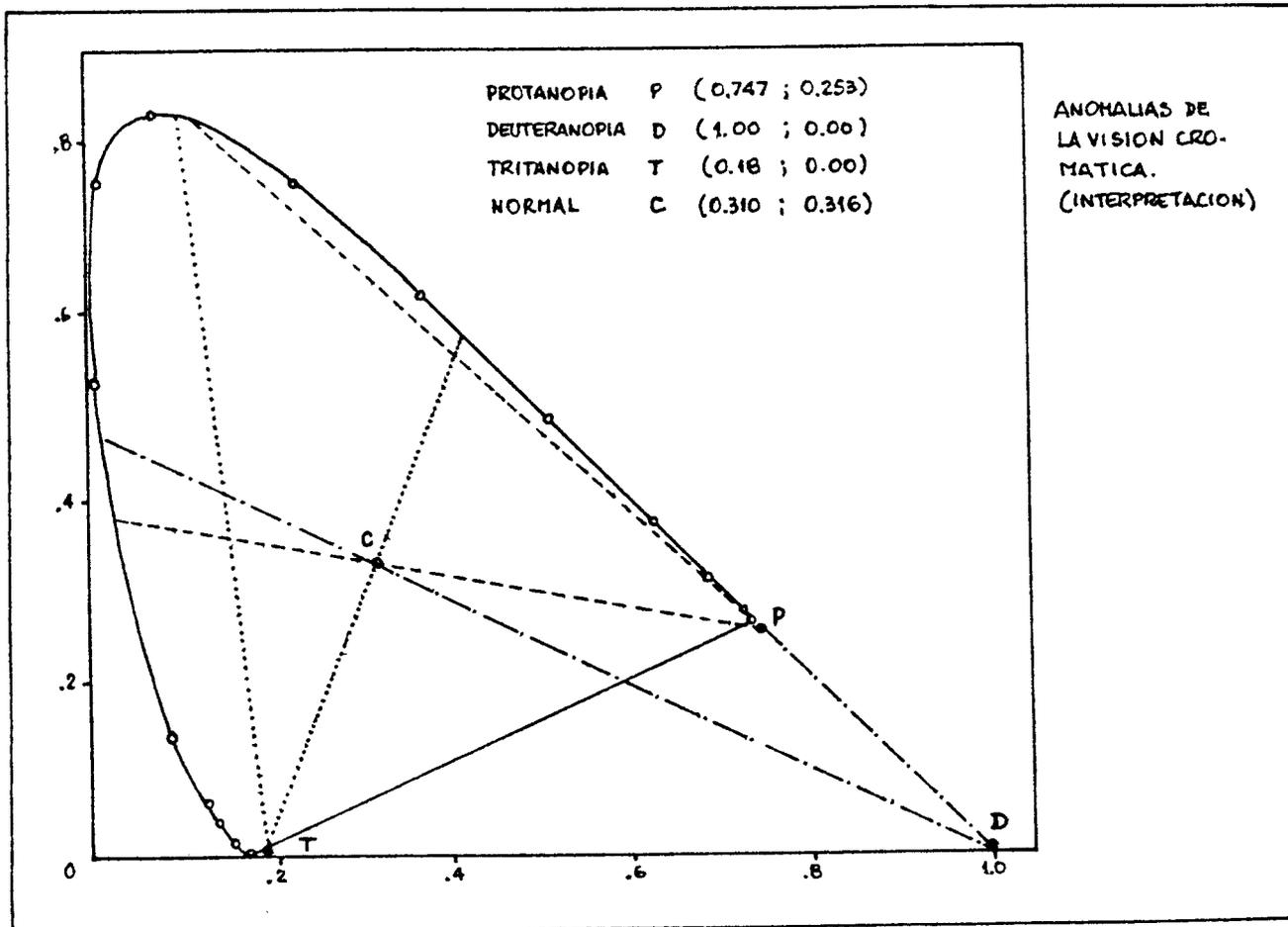


Fig. III-12.

6. El problema de la televisión

La aplicación de los principios y métodos anteriores a la televisión para la transmisión de imágenes cromáticas encuentra una serie de condiciones y limitaciones de las cuales la de mayor influencia en la solución final es la exigencia de COMPATIBILIDAD (directa o inversa).

Compatibilidad directa

Una emisión de TV-Color debe poder ser recibida por los televisores B/N sin pérdida de información (la que éstos son capaces de reproducir).

Los alcances de esta exigencia son bastante amplios, ya que implican la obligación de respetar normas de exploración, ancho de banda y frecuencia asignada, sistema de modulación, sonido complementario, etc.; y, lo que es más importante, obliga a transmitir una señal útil a los receptores monocromáticos.

Compatibilidad inversa

Una emisión de TV-Monocromática debe ser recibida como tal por los receptores en color (sin agregar cromaticidad espuria).

Esta exigencia resulta más fácil de incorporar por tratarse de un sistema en desarrollo (nuevo).

Una limitancia básica debe ser reconocida y aceptada desde el comienzo: no todo el espectro de colores reales podrá ser reproducido; sabemos que ello no es posible si se usan primarios reales, como necesariamente ocurrirá, y si se emplean mezclas de un solo tipo (aditivas en este caso).

En el diagrama de cromaticidad CIE reproducido en la figura III-13, se aprecia que podrían lograrse buenas aproximaciones usando por ejemplo:

- rojo real de app. 770 nm, (R_r)
- azul (violeta) de app. 400 nm, real (B_r)
- verde de app. 520 nm, (G_r)

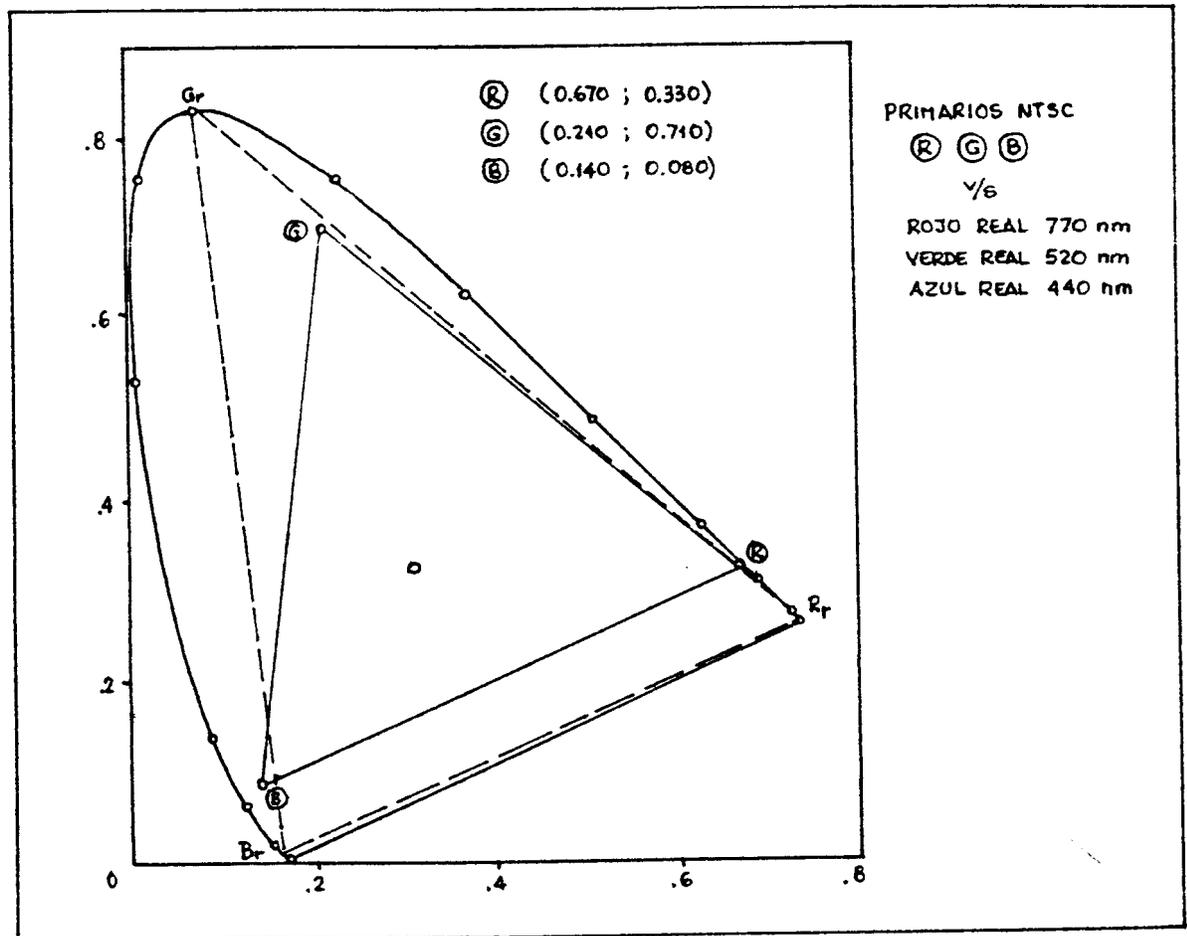


Fig. III-13.

Estas emisiones espectrales muy selectivas tienen muy baja luminosidad o eficiencia lumínica, es decir, se requiere

excesiva potencia eléctrica para un nivel dado de luminosidad (con el consiguiente elevado consumo de energía y corta vida del tubo de imagen).

Como solución de compromiso entre las necesidades conflictivas de lograr la síntesis de la gama más amplia que sea posible y obtener también una imagen brillante sin derroche de energía, el trío de primarios recomendado por el NTSC (National Television System Committee) y adoptado como norma por la FCC en 1953 es:

R : rojo anaranjado $x = 0.670$ $y = 0.330$
G : verde amarillento desaturado $x = 0,210$ $y = 0.710$
B : azul desaturado $x = 0.140$ $y = 0.80$ 0.060

los cuales también aparecen en el diagrama de la figura III-13.

La observación de la misma figura merece las siguientes consideraciones:

- La gama sintetizable corresponde al área encerrada en el triángulo RGB.
- El área exterior al triángulo RGB corresponde a la gama no sintetizable mediante mezcla aditiva de los primarios adoptados. En rigor, los matices son todos sintetizables pero con saturación limitada, es decir, con palidez o contenido de blanco.
- A pesar de la aparentemente excesiva limitación de la gama sintetizable, ésta resulta adecuada o satisfactoria en términos estadísticos. Debemos recordar que aún antes de la proposición de los primarios se realizan exhaustivas evaluaciones de aceptabilidad.
- La elección de los primarios obedece además a una condición adicional (autoimpuesta por el NTSC para satisfacer la