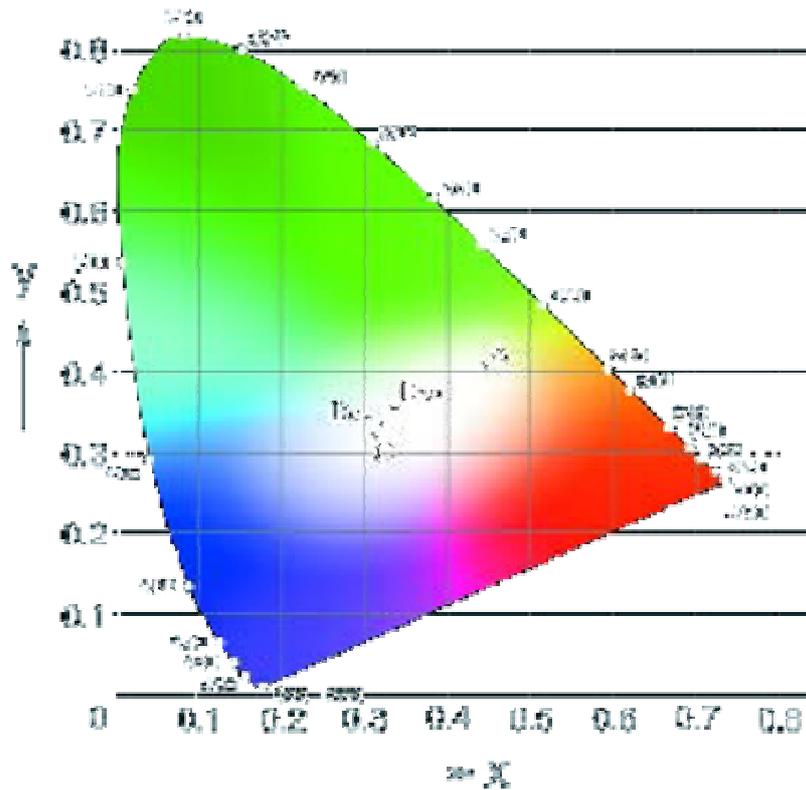


APUNTES DE COLORIMETRÍA



SISTEMAS DE TELEVISIÓN

1. LAS LEYES BÁSICAS DE LA COLORIMETRÍA

1.1 MEZCLA DE COLORES

Se puede conseguir un color cualquiera mediante la combinación de otros colores. Este proceso de mezcla de colores puede realizarse de dos formas diferentes: Mezcla Aditiva de Colores y Mezcla Sustractiva de Colores.

1.1.1 MEZCLA ADITIVA DE COLORES

La mezcla aditiva es la que tiene aplicación en la Colorimetría Tricromática, que es la utilizada en televisión.

Según se ha visto en el tema anterior, la luz es una onda electromagnética y dependiendo de su frecuencia es apreciada por el ojo como una sensación de color determinada. La amplitud de esta señal es la que nos da la sensación de intensidad luminosa.

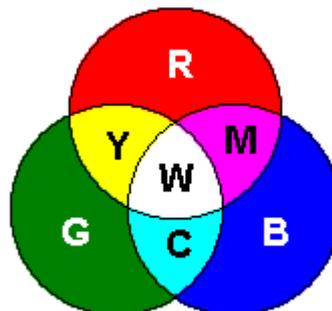
Cuando sobre el ojo incide una determinada radiación luminosa, sea de una frecuencia o sea de un conjunto de varias frecuencias, se percibe una sensación que se llama color. Si se modifica esta radiación añadiéndole una o varias frecuencias más, se ha realizado una “mezcla aditiva”.

Cuando se combinan dos luces de diferente frecuencia $C_1(\lambda)$ y $C_2(\lambda)$, la luz resultante será una que contenga la suma de las dos anteriores, $C(\lambda)$ de valor:

$$C(\lambda) = C_1(\lambda) + C_2(\lambda)$$

De este modo, si sumamos fuentes luminosas con diferentes longitudes de onda (λ), podemos generar muchos colores diferentes. Por ejemplo, la pantalla luminosa de una televisión en color está cubierta de pequeños puntos brillantes, fósforos, agrupados en grupos de tres. En cada uno de los grupos hay un fósforo rojo, otro azul y otro verde. La razón por la que se utilizan estos colores es que combinándolos de forma adecuada se puede conseguir una gama de colores distintos más amplia que para otras combinaciones de colores.

COLOR	LONGITUD DE ONDA (λ)
Rojo (R)	700 nm
Verde (G)	546.1 nm
Azul (B)	435.8 nm



Los colores **Amarillo** (Y), **Cyan** (C) y **Magenta** (M) son denominados colores secundarios. Cuando se mezcla una cantidad aproximadamente igual de los tres colores, R, G y B, obtenemos como resultado el **Blanco** (W). En el caso de los monitores de televisión en color, mezclando cantidades iguales de R, G y B obtenemos imágenes en Blanco y Negro. Cuando las cantidades que se mezclan son diferentes, aparecen los distintos colores en la pantalla.

Por lo tanto podemos deducir que con la mezcla aditiva, cada uno de los primarios añade energía a la mezcla que se quiera conseguir. Los monitores de televisión y los focos de los escenarios son ejemplos aplicados de mezclas aditivas.

Los primarios de los sistemas aditivos suelen ser el rojo, verde y el azul (red, green and blue), por eso la codificación basada en ellos se denomina RGB.

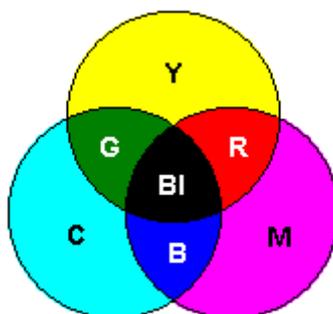
1.1.2 MEZCLA SUSTRACTIVA DE COLORES

La mezcla sustractiva consiste restar frecuencias (que por si solas formarían otro color) a un color determinado formado por varias radiaciones espectrales, con lo que se modifica su contenido espectral, siendo el color resultante totalmente diferente al inicial.

Se observa que en este tipo de mezcla sustractivo el empleo de cada uno de los primarios reduce energía a la mezcla que se quiera conseguir. Las impresoras y los lápices de colores son ejemplos aplicados de mezclas sustractivas.

Cuando a una tinta de un determinado color, se le añaden pigmentos de otra tinta diferente, la mezcla resultante absorbe tanto las radiaciones que absorbía la primera tinta, como las que absorbía la segunda.

Los tres colores primarios de los sistemas sustractivos son el **Amarillo**, el **Cyan** y el **Magenta**, que eran los colores secundarios de los sistemas aditivos. Mezclando las cantidades adecuadas de estos tres colores podemos conseguir una amplia gama de colores. Si los mezclamos en proporciones iguales obtenemos como resultado el color **Negro** (Bl) (en este caso, los pigmentos absorben todas las longitudes de onda).



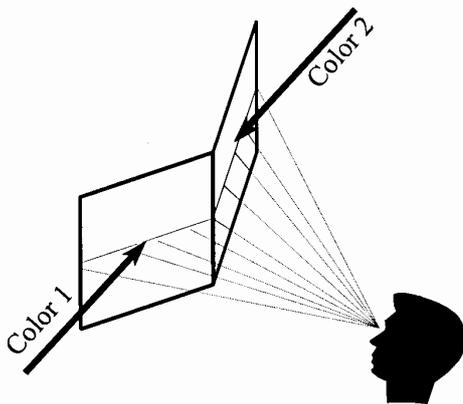
Es importante resaltar que la mezcla sustractiva es fundamentalmente diferente a la de los sistemas aditivos. En los sistemas aditivos, a medida que añadimos colores, el resultado se traduce en una luz que tiene cada vez más longitudes de onda. En cambio,

el resultado de una mezcla sustractiva es una luz que posee menos longitudes de onda que la original.

Este tipo de mezcla de colores tiene su aplicación fundamental en las técnicas de impresión como la fotografía.

1.2 LEYES BÁSICAS DE LA COLORIMETRÍA TRICROMÁTICA

En tricromía resulta de fundamental importancia el concepto de radiación equivalente según **Grassmann**. Se dice que dos radiaciones son cromáticamente equivalentes si producen iguales sensaciones de brillo, matiz y saturación, bien entendido que ello no implica que tengan igual descomposición espectral. Por ejemplo, una sensación de amarillo puede estar producida por un amarillo puro (una única longitud de onda), o por una mezcla aditiva de radiación roja y verde. Si ambas coinciden en su brillo, matiz y saturación se dice que son equivalentes. Para comprobar esta igualdad se hace uso de un instrumento para la medida del color llamado **Colorímetro**, que sirve para comparar visualmente entre sí, a dos colores determinados.



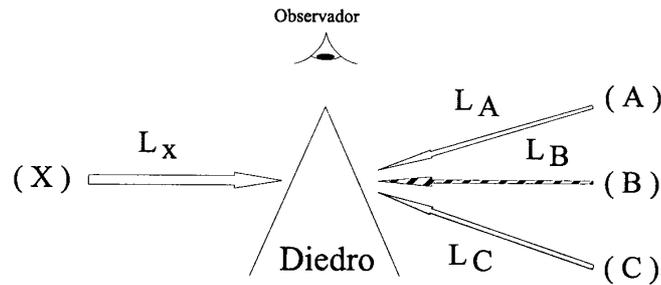
Cuando el observador es incapaz de distinguir la línea divisoria entre los dos planos, puede asegurarse que los dos colores son iguales. Esta medida es bastante precisa puesto que cualquier pequeña diferencia entre los colores implicados, marcaría ligeramente la línea que los separa.

Ahora se mostrarán las cuatro leyes de **Grassmann**:

- **Primera ley (Ley de Trivarianza):** Los efectos que produce sobre el ojo un color cualquiera **X** con una luminancia L_x , son los mismos que produciría la suma aditiva de tres colores cualquiera **(A)**, **(B)** y **(C)**, siempre que se mezclen en las proporciones adecuadas. Estas proporciones se representan como magnitudes L_A , L_B y L_C y reciben el nombre de componentes de color (**X**) respecto de los primarios **(A)**, **(B)**, **(C)**.

Otra forma de expresar esta primera ley y no menos válida, sería que cualquier color imaginable es posible conseguirlo mediante la mezcla de tres colores primarios cualesquiera, siempre que se sumen en las proporciones adecuadas.

Solo existe una combinación posible, una vez fijados los primarios, que permita igualar la sensación de color producida por el color (**X**)



Igualación metamérica del color (X)

$$L_X(X) \Leftrightarrow L_A(A) + L_B(B) + L_C(C)$$

La única limitación existente para los tres primarios era que fuesen independientes entre sí, no pudiendo obtener uno de ellos como mezcla de los otros dos.

Una vez elegidos los tres primarios, en este caso (A), (B) y (C), puede suceder que colocados los tres en el mismo lado del colorímetro no sea posible obtener un color determinado (X), por mucho que se modifique los valores L_A , L_B y L_C . En estos casos puede suceder que sea necesario pasar uno o más primarios a la otra parte del colorímetro para conseguir la igualdad de sensaciones de color.

$$L_X(X) + L_B(B) \Leftrightarrow L_A(A) + L_C(C)$$

En este caso puede afirmarse que uno de los componentes del color (X) respecto a los primarios (A), (B) y (C) es negativo.

$$L_X(X) \Leftrightarrow L_A(A) - L_B(B) + L_C(C)$$

Es obvio que la elección de los primarios es fundamental para que esta situación aparezca la menor cantidad de veces posible.

Es muy importante destacar, que elegidos tres primarios, solo existe una combinación de ellos que permite la obtención de un color, aun que la contribución de alguno de ellos sea negativa.

- **Segunda ley (Ley de Luminancia):** Cuando en el colorímetro se ha conseguido la igualdad de color enunciada en la primera Ley, la luminancia de color igualado es la suma de las luminancias de los primarios utilizados en la igualación. Matemáticamente, esta ley puede expresarse de la siguiente forma:

$$L_X = L_A + L_B + L_C$$

Si para conseguir la igualdad de color en el colorímetro se colocó algún primario en la izquierda, también debe estar su luminancia colocada en la izquierda de la igualdad anterior.

Cada término de la expresión es un número que expresa la luminancia del color en su unidad de medida que es el nits .

- **Tercera ley (Ley de Proporcionalidad):** Una vez conseguida la igualdad de sensación de color definida en la primera Ley, si se multiplica por el mismo valor a las cuatro luminancias implicadas en el proceso, se mantiene la sensación de igualdad de color en ambas caras del colorímetro.

$$L(x) \Leftrightarrow L_A(A) + L_B(B) + L_C(C)$$

$$K L(x) \Leftrightarrow K L_A(A) + K L_B(B) + K L_C(C)$$

Esto es independiente del valor que pueda tomar K, tanto si $K \geq 0$ ó $K \leq 0$, es decir, tanto si se amplifica como si se atenúan los colores.

Esta propiedad es muy importante para el estudio de los colores, puesto que nos permitirá trabajar con colores de luminancia unidad, con lo que se podrá tratar a ésta como un parámetro independiente y por lo tanto separar luminancia y crominancia.

Si se escoge un valor de K, tal que:

$$K = \frac{1}{Lx} = \frac{1}{L_A + L_B + L_C}$$

Según esto la primera ley se puede representar según la siguiente ecuación:

$$1(X) = \frac{L_A}{L_A + L_B + L_C}(A) + \frac{L_B}{L_A + L_B + L_C}(B) + \frac{L_C}{L_A + L_B + L_C}(C)$$

Esta ecuación nos viene a decir la cantidades de los colores primarios (A),(B) y (C) que son necesarios para conseguir una unidad de luminaria del color (X).

- **Cuarta ley (Ley de Aditividad):** Si se suman dos colores cualesquiera $L_1(X_1)$ y $L_2(X_2)$, el color resultante $L(X)$, se puede obtener también sumando los primarios que generan a cada uno de ellos:

$$L_1(X_1) \Leftrightarrow L_{A1}(A) + L_{B1}(B) + L_{C1}(C)$$

$$L_2(X_2) \Leftrightarrow L_{A2}(A) + L_{B2}(B) + L_{C2}(C)$$

El color resultante de la suma:

$$L(x) = L_1(x_1) + L_2(x_2)$$

Se puede obtener como:

$$L(X) = (L_{A1} + L_{A2})(A) + (L_{B1} + L_{B2})(B) + (L_{C1} + L_{C2})(C)$$

Lo que quiere decir que el color (X), obtenido a partir de (X₁) y (X₂), se puede obtener directamente de los primarios (A), (B) y (C).

1.3 COMPONENTES Y COEFICIENTES TRICROMÁTICOS

Se denominan componentes de un color (X) respecto de los primarios (A), (B) y (C) elegidos, a la cantidad necesaria de cada uno de ellos para conseguir la igualdad de sensación de color .

Por lo tanto como ya se indicó en la primera Ley de Grassmann, los componentes tricromáticos (L_A, L_B, L_C) son las cantidades necesarias de cada uno de los colores primarios de un color (X), cuya suma consigue la misma sensación en el ojo que ese determinado color (X), es decir, definen completamente un color con su tono y su luminancia.

$$L_X(X) \Leftrightarrow L_A(A) + L_B(B) + L_C(C)$$

Según su propia definición, los componentes de un color se pueden obtener de forma experimental acudiendo al colorímetro, consiguiendo la igualdad a ambas caras y midiendo luego las proporciones de cada primario que ha sido necesario utilizar.

Por otra parte, los coeficientes tricromáticos de un color con respecto a tres primarios determinados se define como las cantidades de los primarios que ha sido necesario utilizar, para conseguir **una unidad** de luminancia del color en cuestión, es decir, especifican solamente el tono del color.

Por tanto, los coeficientes de un color respecto a tres primarios son tres números de valores (l_A, l_B, l_C) tal que:

$$l(X) \Leftrightarrow l_A(A) + l_B(B) + l_C(C)$$

Aplicando la tercera Ley de Grassmann puede obtenerse la relación entre los componentes y los coeficientes de un color

$$l_A = \frac{L_A}{L_A + L_B + L_C} \quad l_B = \frac{L_B}{L_A + L_B + L_C} \quad l_C = \frac{L_C}{L_A + L_B + L_C}$$

Según la definición, la relación entre los tres coeficientes es la unidad:

$$l_A + l_B + l_C = 1$$

Por consiguiente, se considera que los componentes son tres, mientras que los coeficientes son dos, ya que el tercero queda perfectamente determinado debido a que sería $l_C = 1 - (l_A + l_B)$.

Entonces se puede decir que **los componentes definen completamente un color (su tono y su luminancia)**, mientras que **los coeficientes definen solamente el tono del color o lo que es lo mismo sus características cromáticas**.

Se deduce claramente que los **componentes aportan una información mayor que la aportada por los coeficientes**. Para igualarla sería necesario aportar el valor de los coeficientes y además el valor de luminancia de dicho color.

1.4 COLORES PRIMARIOS DEL CIE

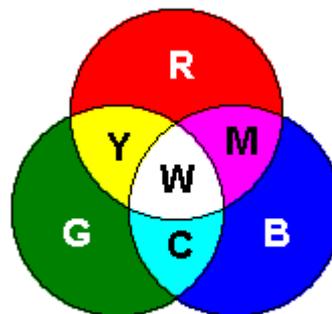
De la elección de los colores primarios depende el que colocando los tres primarios en un lado del colorímetro se puedan igualar muchos o pocos colores colocados en la otra parte.

Por otra parte, es totalmente imposible elegir tres primarios de los existentes en la naturaleza, de forma que proporcionen componentes positivos para los infinitos colores del universo. Se pueden elegir tres primarios de forma que "sean pocos" los colores que presenten componentes negativos y esta elección la ha realizado el CIE (Comisión Internacional de Iluminación) en el año 1.931.

Los tres colores escogidos, el **Rojo (R)**. Color rojo, espectral puro, consistente en una única frecuencia correspondiente a una longitud de onda de 700 nm., el **Verde (G)**. Color verde, también espectral puro, configurado con una única frecuencia correspondiente a una longitud de onda de 546,1 nm., y el **Azul (B)**. Color azul, espectral puro, también formado por una única frecuencia, correspondiente a una longitud de onda de 435,6 nm.

Establecidos estos tres colores primarios, cualquier color del universo puede definirse completamente mediante los valores de sus tres componentes [L_R, L_G, L_B] o bien mediante sus tres coeficientes [l_R, l_G, l_B] pero en este último caso añadiéndole además el valor de la luminancia $L = L_R + L_G + L_B$.

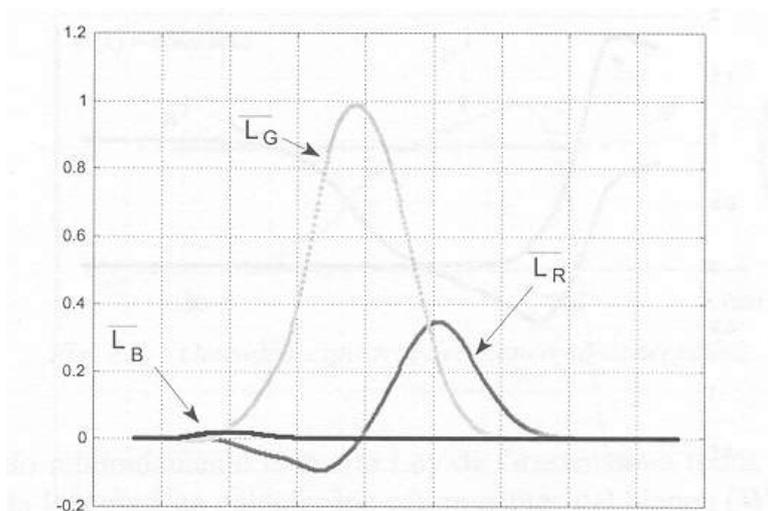
COLOR	LONGITUD DE ONDA (λ)
Rojo (R)	700 nm
Verde (G)	546.1 nm
Azul (B)	435.8 nm



Los colores **Amarillo** (Y), **Cyan** (C) y **Magenta** (M) son denominados Colores Secundarios. Cuando se mezcla una cantidad aproximadamente igual de los tres colores, R, G y B, obtenemos como resultado el **Blanco** (W). En el caso de los monitores de televisión en color, mezclando cantidades iguales de R, G y B obtenemos imágenes en Blanco y Negro. Cuando las cantidades que se mezclan son diferentes, aparecen los colores en la pantalla.

1.5 MEDIDA DE LOS COLORES ESPECTRALES PUROS CON POTENCIA CONSTANTE

Si se miden aquellos colores que tienen una sola longitud de onda, llamados colores espectrales puros, de uno en uno desde los 380 nm hasta los 780 nm, un total de 401 colores y se representan por separado los valores obtenidos para cada uno de sus componentes L_R , L_G , L_B , se obtiene unas curvas como las representadas en la siguiente figura.



De la representación anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

- 1.- En los extremos del espectro visible, los tres valores de los componentes descienden hacia el valor 0.
- 2.- Los valores de L_B son muy pequeños, esto quiere decir que el ojo es muy sensible a esa zona del espectro, de tal forma que una pequeña variación de esta componente el ojo la aprecia rápidamente.

1.6 LUMINANCIA DE UN COLOR

Si un color viene definido por sus tres componentes:

$$L_R \quad L_G \quad L_B$$

La luminancia (que determina el brillo o el blanco/negro en televisión) que presenta dicho color viene dada por la expresión:

$$L = L_R + L_G + L_B$$

1.7 BLANCO EQUIENERGÉTICO

El blanco equienergético (**W**) se define como el color formado por la suma de todos los colores puros, todos ellos con la misma potencia.

Aplicando reiteradamente la cuarta ley de Grassmann a todos los colores espectrales puros se obtiene los valores de los componentes del blanco (**W**):

$$L_R = \sum_i L_{Ri} = 18,9104638 \quad L_G = \sum_i L_{Gi} = 86,8176689 \quad L_B = \sum_i L_{Bi} = 1,1280797$$

Si le damos valor unidad a la componente rojo, nos queda:

$$L_R = 1 \quad L_G = 4,59069 \quad L_B = 0,06007$$

Si queremos obtener los coeficientes del blanco (**W**) a partir de los componentes

$$1(\mathbf{W}) \Leftrightarrow 1(\mathbf{R}) + m(\mathbf{G}) + n(\mathbf{B})$$

$$l = \frac{1}{1 + 4,59 + 0,06}; \quad m = \frac{4,59}{1 + 4,59 + 0,06}; \quad n = \frac{0,06}{1 + 4,59 + 0,06}$$

$$l = 0,1769; \quad m = 0,8123; \quad n = 0,0106$$

Si lo que se pretendiera ahora es obtener el valor de los componentes de un blanco equienergético (**W**) de luminancia $L_0 \neq 0$ a partir de los coeficientes:

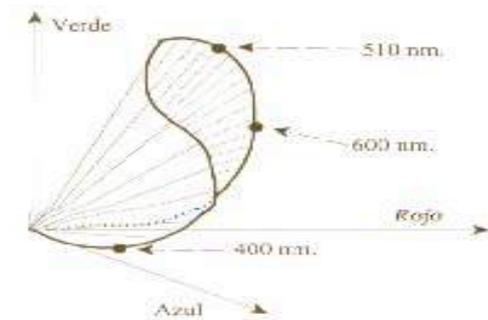
Aplicando la tercera Ley de Grassmann

$$L_0(\mathbf{W}) = L_0 l(\mathbf{R}) + L_0 m(\mathbf{G}) + L_0 n(\mathbf{B})$$

Por lo que se demuestra que **los coeficientes de un color se pueden obtener a partir de los componentes y los componentes se podrán obtener a partir de los coeficientes si conocemos la luminancia de ese color.**

1.8 REPRESENTACIÓN DE LOS COLORES EN EL ESPACIO

Si a cada color monocromático o color espectral puro con la misma potencia energética le corresponde un trío de valores, cada color puro puede representarse gráficamente por un punto sobre un sistema de ejes perpendiculares entre sí. La gráfica que los representa se llama **sólido de colores**:

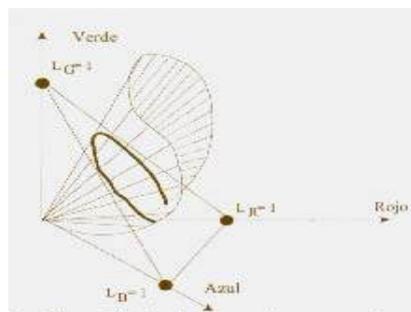


Cada punto de la curva define la posición de un color determinado e indica el valor de la longitud de onda que le corresponde (en nm).

Los colores no monocromáticos, es decir los obtenidos como mezcla de varios colores, se encuentran en el recinto interior envuelto por la superficie.

1.9 INTERSECCIÓN DEL SÓLIDO DE COLORES CON EL PLANO DE LUMINANCIA UNIDAD

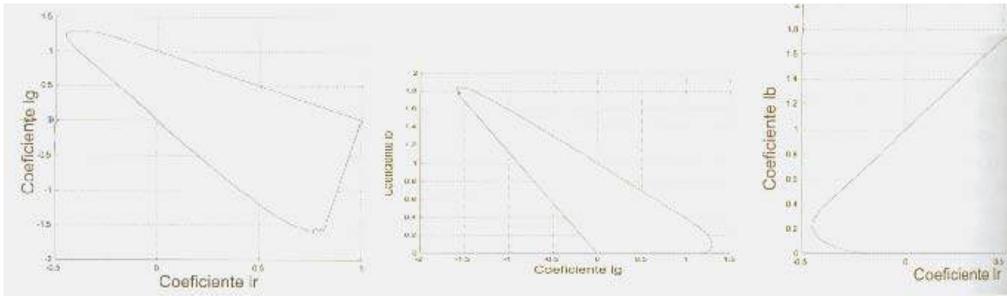
La intersección del plano de luminancia unidad con el sólido de colores origina una superficie que se encuentra rodeada por una curva plana exterior que recibe el nombre de **'spectrum locus'** o **'lugar del espectro'**, que es donde se encuentran colocados todos los colores monocromáticos, y se representa a continuación:



En el interior de esta superficie curva se encuentran los colores espectrales no puros.

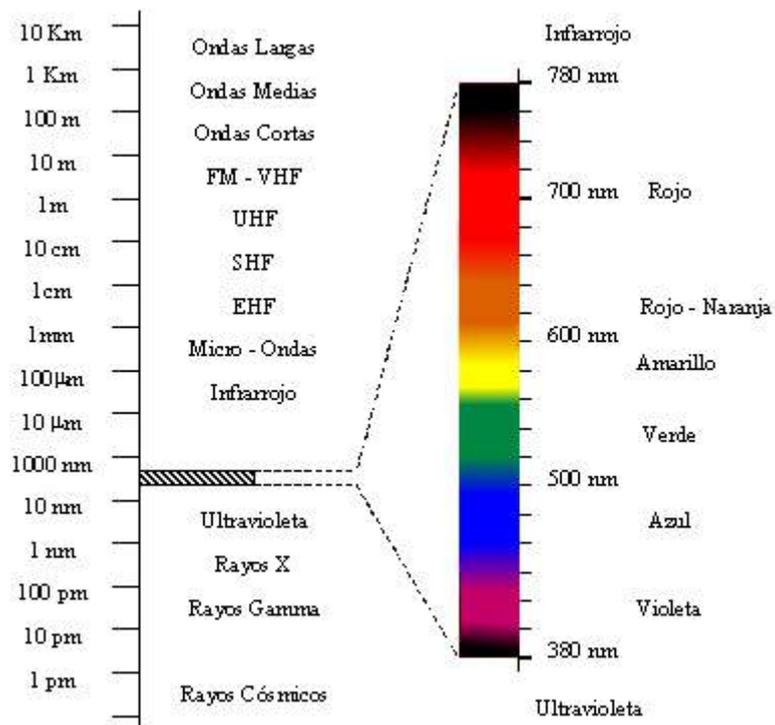
En realidad, sobre esta curva se encuentran expresados los coeficientes de los colores espectrales puros, de modo que cada punto corresponde a uno de ellos.

Si representamos la proyección de esta curva sobre cada uno de los tres planos :



1.9 DIAGRAMAS DE CROMATICIDAD

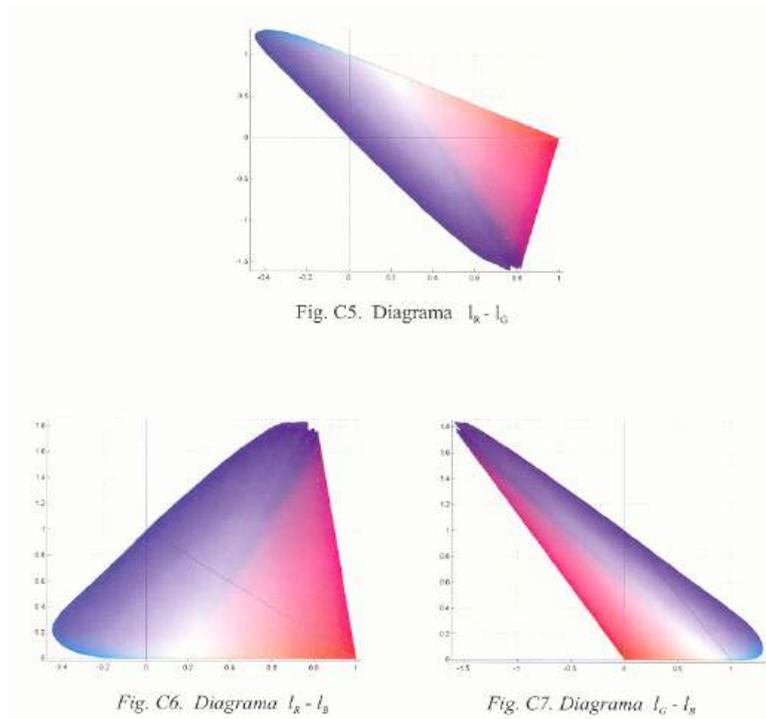
Las sensaciones cromáticas que producen sobre el ojo los colores espectrales puros son las mismas que se producen al observar el arco iris. En este fenómeno meteorológico lo que se aprecia no es más que la descomposición de la luz blanca en las infinitas componentes espectrales de que consta.



La longitud de onda más baja proporcionada es la violeta, mientras que la más alta proporciona sensación de rojo.

Como los colores espectrales puros se encuentran sobre la curva spectrum locus, ésta se dibuja con el color que aprecia el ojo humano. Por lo que, a cada punto de dicha curva se le asigna una tinta que corresponda con la sensación cromática que tiene el ojo, formando un conjunto de puntos que se conoce como **diagrama de cromaticidad**, y como representarlo en el espacio es difícil de llevar a cabo, lo normal es representar las

proyecciones sobre los tres planos, lo que da origen a tres diagramas de cromaticidad diferentes.



Sobre estas figuras puede apreciarse que la mayor parte de los diagramas de cromaticidad están ocupados por colores púrpura, mientras que el resto de los colores quedan confinados a una zona muy pequeña de dichos diagramas. Esto no es un fallo de la impresión gráfica, sino que realmente es así.

Sobre los diagramas están colocados todos los colores del universo, pero debido a las características de total falta de linealidad en el ojo, algunas tonalidades se reservan una gran superficie, mientras que otras tonalidades tienen asignada una zona muy pequeña.

Aunque sobre los diagramas de cromaticidad pueda parecer que hay muchos puntos con el mismo color, eso no es cierto. Cada punto del diagrama tiene una tonalidad diferente, lo que ocurre es que el ojo no encuentra apenas diferencia entre algunas tonalidades muy separadas matemáticamente y sin embargo otras que están muy próximas numéricamente producen en el ojo una sensación muy diferente. Como se verá posteriormente, este es el motivo de la aparición de nuevos Espacios Cromáticos, tratando de solucionar algún efecto en concreto, pretendiendo adaptarse mejor al ojo en algún aspecto o intentando solucionar algún otro problema.

2. ESPACIO COLORIMÉTRICO RGB

Si toda la gama de colores se encuentra en una zona muy reducida, dejando zonas muy amplias en las que apenas hay variación, se complicaría mucho el cálculo de las mezclas coloreadas, al tener que operar con muchas cifras que numéricamente son casi iguales pero que para el ojo son bastante diferentes y distingue perfectamente.

Estas zonas amplias están ocupadas por los colores púrpura, mientras que el resto de los colores están confinados en un espacio muy pequeño. Debido a esto el blanco equienergético no se encuentra en el centro del diagrama de cromaticidad sino que prácticamente que situado en una de las orillas.

Con objeto de simplificar los cálculos, el CIE propuso que a cada color se le asignase, en vez de sus componentes (L_R , L_G , L_B), un trío de valores relacionado matemáticamente con los componentes.

Los componentes L_R , L_G y L_B vienen dados en nits (unidad de la luminancia), sin embargo, el trío de valores no tendrá ninguna magnitud física, y se les llamará 'unidades tricromáticas o unidades T'.

El espacio desarrollado en apartados anteriores se denomina **Espacio Inicial**, donde al blanco (**W**) de luminancia L_o le corresponden componentes muy diferentes. El nuevo espacio, que recibe el nombre de **Espacio RGB**, se ha diseñado de forma que soluciona este problema que anteriormente tenía el blanco, ya que ahora éste estará formado por componentes iguales y coincidentes con el valor de la luminancia que tenga ese color blanco, de modo que se consigue una distribución más homogénea de la sensación del color, situándose ahora el blanco en la posición central del diagrama de cromaticidad.

Los nuevos componentes R, G y B están relacionados con los anteriores a través de las siguientes ecuaciones de transformación:

$$R = \frac{L_R}{0.1769} = 5.653 \cdot L_R$$

$$G = \frac{L_G}{0.8123} = 1.231 \cdot L_G$$

$$B = \frac{L_B}{0.0106} = 94.340 \cdot L_B$$

En este nuevo Espacio R G B, para el blanco (W), los tres componentes son iguales y coincidentes con el valor de su luminancia:

$$\begin{array}{ll} L_R = 0.1768 L_o & R = L_o \\ L_G = 0.8123 L_o & G = L_o \\ L_B = 0.0106 L_o & B = L_o \end{array}$$

Para el blanco de luminancia unidad en el espacio inicial se cumple:

$$1(W) \Leftrightarrow 0.1768(R) + 0.8123(G) + 0.016(B)$$

y en este nuevo espacio se cumplirá que $R = G = B = 1$.

Por lo tanto, se obtiene que:

$$S = R + G + B$$

donde se aprecia que S no coincide con el valor de luminancia en este nuevo Espacio R G B

En concreto para el blanco de luminancia unidad tenemos:

$$3(W) \Leftrightarrow 1(R) + 1(G) + 1(B)$$

Entonces la suma de los componentes en este Espacio R G B no coincide con el valor de la luminancia.

2.1 COEFICIENTES EN EL ESPACIO RGB

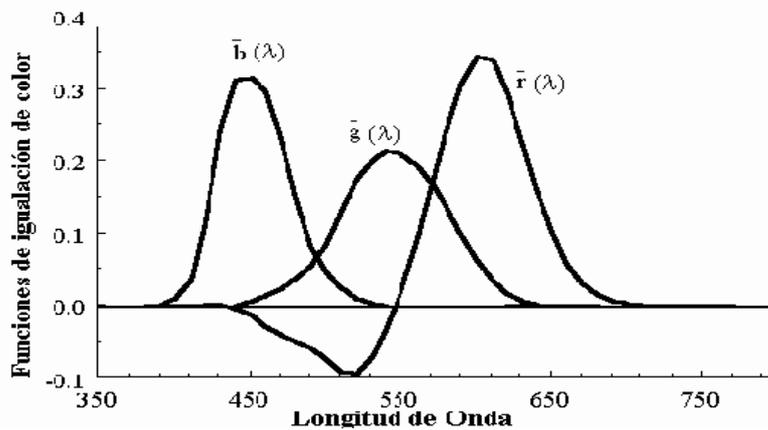
Al igual que en el Espacio Inicial, en este Espacio RGB, cuando solo interese destacar las características cromáticas del color se pueden utilizar los coeficientes (r,g,b) en vez de los componentes, con la ventaja de que sólo necesitaríamos dos de los coeficientes, ya que $r + g + b = 1$.

Estos coeficientes son:

$$r = \frac{R}{R + G + B} \qquad g = \frac{G}{R + G + B} \qquad b = \frac{B}{R + G + B}$$

2.2 COMPONENTES DE LOS COLORES ESPECTRALES PUROS CON POTENCIA CONSTANTE EN EL ESPACIO RGB

En el año 1930, los americanos Wright y Guild, cada cual por su cuenta y utilizando procedimientos diferentes, hicieron experimentos para medir los componentes RGB de los colores espectrales puro, es decir, los que solo tienen una única longitud de onda, obteniendo resultados similares por lo que la CIE decidió tomar esos datos como base para los estudios colorimétricos. La siguiente gráfica recoge los valores de los componentes obtenidos:



2.3 COLORES PRIMARIOS EN EL ESPACIO RGB

Tanto en el espacio RGB como en los espacios que serán definidos posteriormente, se definen como colores primarios en un espacio determinado a aquellos tres colores que en ese espacio presentan coeficientes **(1,0,0)** **(0,1,0)** **(0,0,1)** respectivamente. Sin embargo, los componentes pueden tener cualquier valor (k_1, k_2, k_3).

	COMPONENTES			Coeficientes		
	R	G	B	r	g	b
Primario 1	K1	0	0	1	0	0
Primario 2	0	K2	0	0	1	0
Primario 3	0	0	K3	0	0	1

2.4 LUMINANCIA DE UN COLOR CONOCIDOS SUS COMPONENTES RGB

En el Espacio Inicial la luminancia del color es:

$$L = L_R + L_G + L_B$$

En cambio, si lo que se conoce son los componentes R, G y B, el cálculo se realiza teniendo en cuenta las ecuaciones de transformación:

$$L = 0.1769 R + 0.8123 G + 0.0106 B$$

De esta ecuación se desprende que si el color analizado es el blanco, el valor de su luminancia coincide con el valor de cualquiera de los componentes. Por lo que en este caso:

$$L = R = G = B$$

2.5 PROPIEDADES DEL ESPACIO RGB

Como la transformación efectuada para pasar del Espacio Inicial al Espacio RGB es lineal, se siguen manteniendo válidas las Leyes de Grassmann, con la única diferencia de que las unidades no son nits (o lúmenes), sino unidades tricromáticas.

Puede expresarse que se ha conseguido igualar un color mediante la expresión:

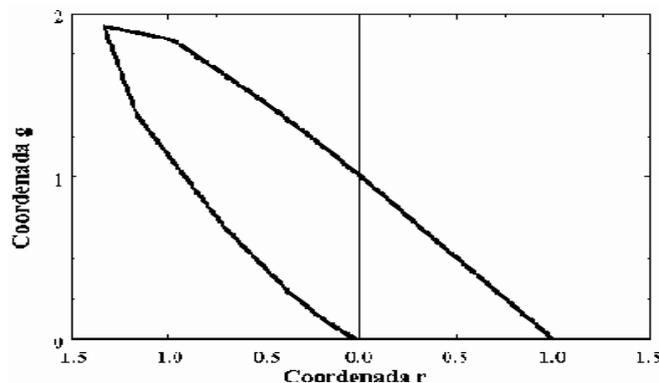
$$S(\mathbf{X}) \Leftrightarrow R(\mathbf{R}) + G(\mathbf{G}) + B(\mathbf{B}) \text{ se cumple que } S = R + G + B$$

En este caso S no es la luminancia, sino que es la suma de los tres componentes en este espacio.

De la misma forma pueden seguir utilizándose y por lo tanto son perfectamente válidas la tercera y cuarta leyes de Grassmann para este Espacio colorimétrico

2.6 DIAGRAMAS CROMÁTICOS EN EL ESPACIO RGB

Sabiendo que $r + g + b = 1$, se puede obtener tres diagramas de cromaticidad en función de los coeficientes que se representen. A continuación se representa la carta cromática rg:



En esta representación no se encuentra la luminancia del color, sino solamente sus características cromáticas, puesto que la luminancia sólo estará presente si se dan los componentes del color en cuestión.

Un aspecto importante que se da en este espacio es que los colores que se encuentran en el plano $r + g + b = 1$ no tienen luminancia unidad. El que $R + G + B = 1$, no quiere decir que tenga luminancia unidad ya que:

$$\frac{L_R}{0.1769} + \frac{L_G}{0.8123} + \frac{L_B}{0.0106} = 1$$

Y el que tenga luminancia unidad implica lo siguiente:

$$L_R + L_G + L_B = 1$$

2.7 COLORES NO ESPECTRALES PUROS

Un color que no sea espectral puro, está formado por la mezcla de dos o más colores puros, es decir, está formado por más de una longitud de onda.

Supóngase dos colores espectrales puros:

	COMPONENTES			COEFICIENTES		
Color C1	R ₁	G ₁	B ₁	r ₁	g ₁	b ₁
Color C2	R ₂	G ₂	B ₂	r ₂	g ₂	b ₂

Vamos a realizar la suma, denominando S1 y S2 a las sumas de los dos componentes:

$$S1 = R1 + G1 + B1$$

$$S2 = R2 + G2 + B2$$

Teniendo en cuenta la relación entre los componentes y los coeficientes:

$$R1 = S1.r1$$

$$G1 = S1.g1$$

$$B1 = S1.b1$$

$$R2 = S2.r2$$

$$G2 = S2.g2$$

$$B2 = S2.b2$$

Si se suman estos dos colores:

$$S(C) \Leftrightarrow S1 (C1) + S2 (C2)$$

Según la cuarta ley de Grassmann se tiene:

$$S(C) \Leftrightarrow [R1+R2] (R) + [G1+G2] (G) + [B1+B2] (B)$$

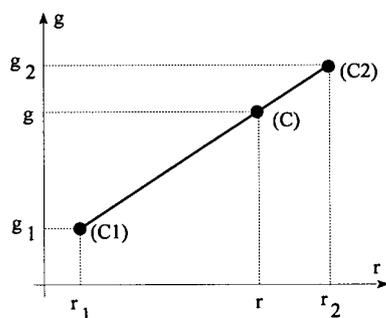
Sustituyendo con la relación anterior se obtiene los componentes del color (C):

$$R = S1r1 + S2r2 = (R1+G1+B1).r1 + (R2+G2+B2).r2$$

$$G = S1g1 + S2g2 = (R1+G1+B1).g1 + (R2+G2+B2).g2$$

$$B = S1b1 + S2b2 = (R1+G1+B1).b1 + (R2+G2+B2).b2$$

Este color no se encuentra situado en la curva del spectrum locus, donde se encuentran todos los colores puros, sino que se encuentra en la línea recta que une los dos colores mezclados.



Obtención del color mezcla

Igual que pasa con los componentes, los coeficientes también se encuentran en la línea recta que une los dos colores espectrales puros mezclados. La posición sobre esa recta, se encuentra de forma que está tanto más cerca del color que presenta mayor S, de forma proporcional.

En este Espacio, igual que pasaba en el anterior, se observa que todos los colores que no sean espectrales puros se encontrarán en el interior de la superficie cerrada por la curva spectrum locus, correspondiéndole a cada punto del interior un color.

De igual forma, si se mezclan dos colores no espectrales puros, se conseguirá otro color no puro, que se encontrará sobre la línea recta que une a los dos colores participantes en la mezcla, puesto que los cálculos anteriores siguen siendo válidos para este caso también.

Por la parte de abajo, donde la curva no se encuentra cerrada, los colores quedan limitados por la recta que une los colores extremos del espectro, puesto que por debajo de la recta no puede existir ningún color.

3. ESPACIO COLORIMÉTRICO XYZ

El **Espacio XYZ** es un espacio matemático. Es el espacio colorimétrico más usado en la actualidad debido a que en los estudiados anteriormente daban varios problemas. Por un lado, mucho de los colores presentan componentes y coeficientes negativos, lo que siempre es un problema para trabajar con ellos; y por otro lado, la luminancia no se observa directamente, sino que hay que hacer algunas operaciones para hallarla.

Este espacio consiste en asociar un trío de valores (X, Y, Z) a cada color definido por sus componentes RGB de la forma:

$$\begin{aligned} X &= a_1.R + a_2.G + a_3.B \\ Y &= b_1.R + b_2.G + b_3.B \\ Z &= c_1.R + c_2.G + c_3.B \end{aligned}$$

En esta ocasión, se observa que la transformación al nuevo espacio depende de 9 valores (a_1, \dots, c_3), escogidos de tal forma que se solventa los problemas de los Espacios anteriores, como son la existencia de componentes negativos, además de obtener el valor de la luminancia sin tener que estar haciendo cálculos matemáticos. Este espacio también tendrá tres colores primarios denominados (**X**) (**Y**) y (**Z**), que tienen como coeficientes los valores (1,0,0) (0,1,0) (0,0,1). También habrá un blanco de referencia que será el que tenga por coeficientes (1/3, 1/3, 1/3).

En primer lugar, lo que se pretende es que la luminancia no sea una mezcla de componentes, sino que sea uno de los componentes, y se ha elegido la componente **Y** como **luminancia**.

$$L = Y.$$

Por lo que los componentes (**X**) y (**Z**) no deben tener nada de luminancia. Físicamente esto no es posible pero sí matemáticamente.

Los colores que no tienen nada de luminancia deben cumplir que:

$$0 = 0.1769 R + 0.8123 G + 0.0106 B$$

Si lo expresamos en función de los coeficientes:

$$0 = 0.1769 r (R+G+B) + 0.8123 g (R+G+B) + 0.0106 b (R+G+B)$$

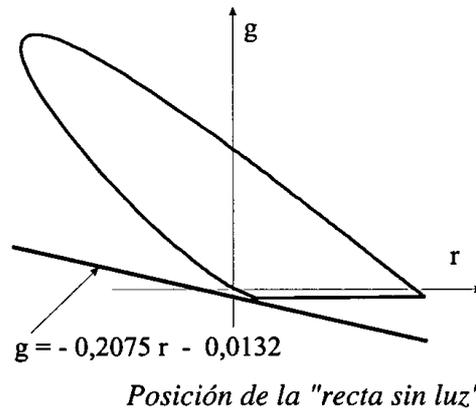
Como la suma de componentes de cualquiera de los colores (**X**) y (**Z**) no puede ser nunca 0, la ecuación anterior se puede convertir en:

$$0 = 0.1769 r + 0.8123 g + 0.0106 b$$

Pero además por definición de los coeficientes, $r + g + b = 1$, sustituimos la $b = 1 - (r + g)$ en la ecuación anterior y obtenemos:

$$0,1663 r + 0,8017 g + 0,0106 = 0 \Rightarrow g = -0,2075 r - 0,0132$$

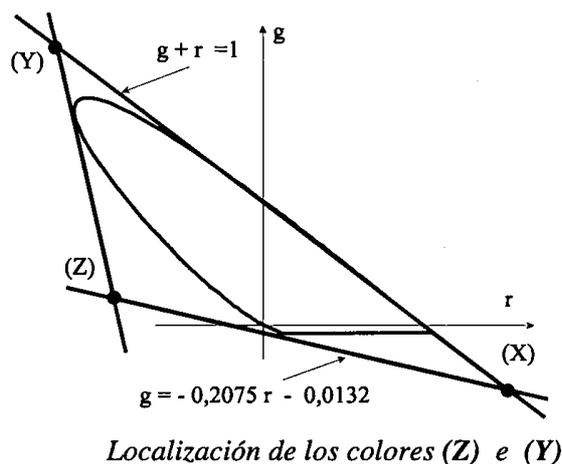
(recta sin luz)



Todos los colores cuyos coeficientes cumplan esa condición, puede asegurarse que no tienen luminancia. Por lo que tanto el color (X) como el color (Z) deberán estar colocados sobre esta recta.

El triángulo formado por los tres colores primarios debe incluir en su interior a todos los colores físicos, porque se pretende que todos los colores físicos tengan componentes positivos. Además, interesa que el área incluida dentro del triángulo sea lo más pequeña posible, con objeto de que los colores físicos (los de dentro de la carta r-g) ocupen la mayor parte del triángulo y no haya que recurrir a utilizar muchos decimales para identificar con cierta precisión a cada uno de los colores.

Por la parte de la derecha del diagrama se cumple que la curva spectrum locus pasa por los puntos (1, 0) y (0, 1) y entre ellos casi es una recta, como puede apreciarse en la figura. La ecuación de esa recta es $r + g = 1$ y la intersección con la recta sin luz se produce en el punto (1,275 -0,2778) y ahí es donde se va a ubicar al color (X).



Como el color (Z) también ha de encontrarse sobre la recta sin luz, y además el área formada por el triángulo debe ser mínima y todo el spectrum locus debe quedar interior al triángulo, con esas tres condiciones, con métodos gráficos, no existe ningún problema en localizar la posición de los colores (Z) e (Y).

Cabe resaltar que los tres colores que se van a elegir como primarios en este Espacio no son colores físicos, no existen en la Naturaleza, porque solo existen los colores que se encuentran dentro de la carta r-g y estos tres colores están fuera de ella. Sin embargo, matemáticamente sí que se pueden definir y se hará uso de ellos para construir el Espacio XYZ.

3.2 ECUACIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DEL ESPACIO RGB AL ESPACIO XYZ

Vamos a deducir las ecuaciones de transformación mediante las cuales se obtengan los componentes XYZ de un color cualquiera en función de los componentes RGB que tiene ese color en el Espacio RGB. En este Espacio se conocen las características de los colores, de modo que si obtenemos las ecuaciones de transformación entre Espacios quedarán caracterizados también en el nuevo Espacio XYZ.

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2.363993 & -0.89594 & -0.46805 \\ -0.51498 & 1.426159 & 0.088826 \\ 0.00544 & -0.01535 & 1.009810 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}$$

Al pasar del espacio RGB al XYZ se conserva toda la información, dado que lo que se ha utilizado para la transformación ha sido los componentes del color.

3.3 COEFICIENTES xyz

Al igual que en los espacios anteriores, los coeficientes tricromáticos son:

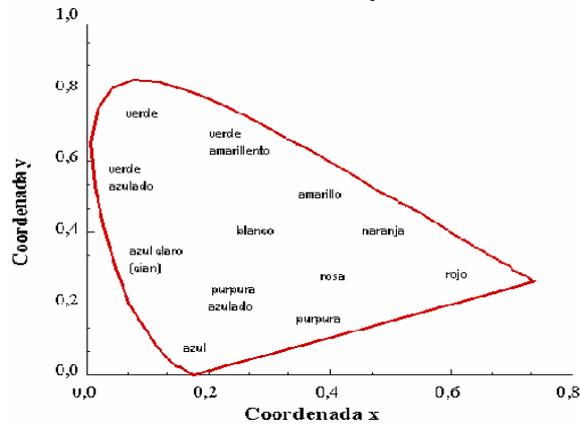
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \qquad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \qquad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Estos coeficientes presentan las mismas propiedades que los coeficientes de los Espacios anteriores.

Sólo queda recordar que los coeficientes sólo suministran información de cromaticidad, pero no presentan información de luminancia, que en este caso queda reflejada en el valor del componente Y.

3.4 DIAGRAMAS CROMÁTICOS EN EL ESPACIO XYZ

Al igual que en los espacios anteriores se tiene que $x + y + z = 1$, por lo que también hay tres diagramas de cromaticidad, dependiendo del coeficiente que no se utilice. Pero en la práctica sólo se utiliza la carta xy.



En el exterior de la curva no hay colores físicos, sólo matemáticos.

3.5 MEZCLA DE COLORES ESPECTRALES PUROS SOBRE LA CARTA xy

La mezcla de dos o más colores puros da lugar a un color que no es espectral puro, es decir, está formado por más de una longitud de onda. Y al igual que en el espacio anterior dicho color no se encontrará sobre la curva definida en la carta xy, puesto que no será un color espectral puro. Entonces este nuevo color estará sobre la línea recta que une los dos colores espectrales puros, y cabe resaltar que estará más cerca del componente que mayor aportación haya hecho a esta mezcla.

3.6 COLORES COMPLEMENTARIOS

Los colores complementarios son aquellos que al mezclarse aditivamente proporcionan el blanco (**W**). Además, para que esto ocurra deben estar colocados en el diagrama de cromaticidad sobre una recta que pase por el blanco y han de tener componentes con amplitudes tales que la suma de dos colores caiga precisamente en el blanco.

3.7 TONO Y SATURACIÓN DEL COLOR

Se puede considerar a un color determinado por dos magnitudes:

- Su luminancia, caracterizada por su componente Y.
- Su cromaticidad, caracterizada por los coeficientes x e y.

La luminancia es la característica de intensidad luminosa que presenta. Suele llamarse luminosidad y subjetivamente puede asimilarse a una escala de grises del negro al

blanco. La cromaticidad es la característica cromática del color y es la que nos hace distinguir, por ejemplo, los rojos de los verdes, aunque tengan la misma luminancia.

Otra forma de especificar la cromaticidad de un color es por medio de los parámetros:

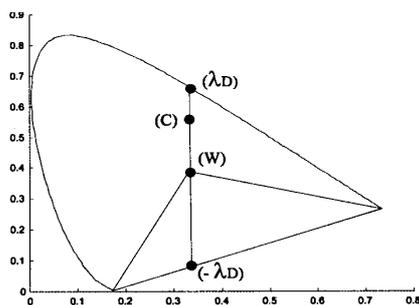
- Tono o longitud de onda dominante.
- Pureza o saturación.

El **tono** o **longitud de onda dominante** es el que aporta la capacidad de discernir entre, por ejemplo, el verde y el rojo, o si es azulado o verdoso.

Para un color (C) determinado, su longitud de onda dominante es la que se encuentra colocada en el perímetro del diagrama de cromaticidad al ser cortado por una recta que desde el blanco (W) pasa por el color (C).

No quiere decir que un color (C) que tenga una longitud de onda dominante λ_d contenga esa radiación en mayor proporción que las demás, pues es posible que ni siquiera la contenga. Lo que quiere decir, es que el tono de ese color sería el que produciría una radiación precisamente de esa longitud de onda.

El único color para el que no queda definida su longitud de onda dominante es el blanco (W), pues en este caso no existe la recta definida anteriormente, al tener que unir un punto consigo mismo.



Colores con λ "negativa"

Los colores púrpuras, resultantes de mezclas de rojos y violetas, tampoco tienen longitud de onda dominante, pues en la parte de abajo del diagrama de cromaticidad no hay colores espectrales. Para poder asociarles una longitud de onda, se le asigna un valor negativo del mismo valor absoluto que el que se encuentra en la prolongación de la recta, en la otra parte del diagrama.

La **pureza** o **saturación** de un color (se utilizan los dos indistintamente), indica el grado de mezcla que dicho color tiene con el blanco, puesto que cuando se añade blanco a un color cualquiera no se modifica el tono, (según se acaba de ver), modificándose únicamente la saturación.

Los colores más puros son los que se encuentran en la periferia del diagrama de cromaticidad (no contienen nada de blanco), y con pureza nula se encuentra el color blanco, del que puede decirse también que su cromaticidad es nula.

Matemáticamente a la pureza o saturación máxima se le asigna el valor 1 (o bien el 100%) Y a la posición del blanco se le asigna el valor 0, repartiendo uniformemente a lo largo de la recta los distintos valores de saturación.

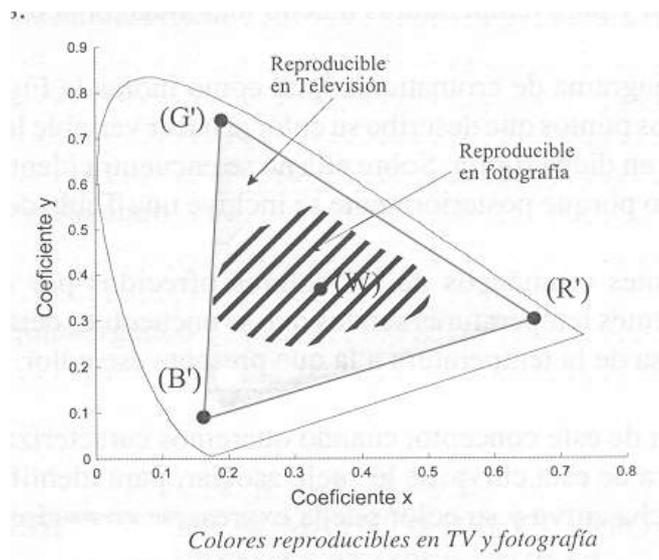
3.8 COLORES REPRODUCIBLES MEDIANTE MEZCLAS ADITIVAS

Mediante mezclas aditivas de tres colores primarios, se pueden reconstruir metaméricamente todos los colores si sus componentes son positivos en ese Espacio, porque si fueran negativos no se podrían representar.

No se puede elegir como primarios (X), (Y) y (Z) porque no existen en la naturaleza, pero si se puede escoger como primarios los colores (R), (G) y (B), y a partir de la mezcla aditiva se obtienen todos los colores que se encuentran encerrados en el triángulo cuyos vértices están formados por los primarios elegidos. Mezclando adecuadamente esos tres primarios, se puede recorrer el interior del triángulo, pero nunca se puede salir de él.

Por lo tanto, para obtener el mayor número de colores es imprescindible maximizar el área del triángulo, esto se consigue escogiendo a los primarios lo más separado que se pueda, cumpliéndose para el rojo, el verde y el azul lo más saturados posible, de modo que el área del triángulo formado por los tres sea máxima.

En Televisión se eligen como primarios estos colores mencionados de rojo, verde y azul, pero no es necesario que se encuentren excesivamente saturados, pues en la naturaleza no existen colores muy saturados, es decir no existen colores que se encuentran en el borde del diagrama de cromaticidad. Los colores existentes en la naturaleza se encuentran normalmente alrededor del centro del diagrama de cromaticidad, próximos al blanco.



En la figura se representan los primarios elegidos para televisión. También se ha representado también de una forma aproximada los colores que normalmente se reproducen en cine, fotografía..., con lo que se observa que, aunque en el tubo de

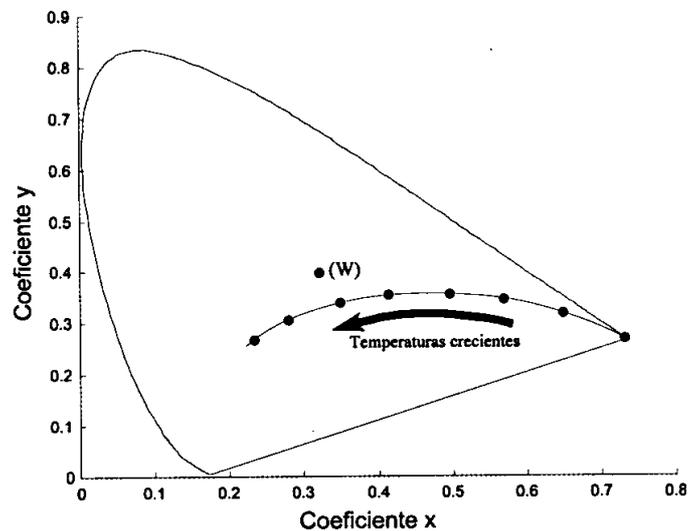
imagen de un monitor de TV no se pueden reproducir todos los colores del universo, se consigue una gama mucho más amplia que en el resto de los métodos de obtención de imágenes en color. De esto se desprende que en TV no existe casi restricción en la gama de colores que pueden reproducirse y puede argumentarse que la Televisión es de todos los métodos de representación de imágenes en color, el que reproduce más fielmente las diferentes tonalidades.

3.9 TEMPERATURA DEL COLOR

Las fuentes térmicas generan una radiación en la que parte de ella es captada por los sensores de la piel, obteniéndose sensación de calor. Estas radiaciones se encuentran en la zona del infrarrojo y a ellas es sensible la piel, pero si el objeto emisor de calor se calienta a temperatura muy alta, sus espectro de radiaciones se expande hacia la zona superior y penetra en la zona del espectro visible, activando a los sensores del ojo, lo que sucede alrededor de los 500°C.

Se denomina cuerpo negro a aquel que absorbe todas las radiaciones, independientemente de la longitud de onda que éstas tengan, no reflejando ninguna. Este cuerpo será un radiador integral, puesto que todo lo que él radie será generado por él mismo y nunca reflejado de las radiaciones externas a él.

Si a este cuerpo negro se le calienta por encima de los 500° C, comienza a tomar color rojizo. Si se le calienta más, después de pasar por una tonalidad amarillenta, su tono se vuelve blanquecino y para temperaturas mucho más altas toma un color azulado.



Cromaticidad presentada por el cuerpo negro

Sobre el diagrama de cromaticidad se aprecia la trayectoria que sigue el color del cuerpo negro a medida que se incrementa su temperatura.

Cuando se quiere caracterizar un color cualquiera que se encuentre cerca de esta curva, se le suele asociar la temperatura más cercana sobre dicha curva y su color puede expresarse en grados Kelvin. Según esto, cuando se dice que la temperatura de un color es de T_0 °K, no quiere decir que se encuentre a esa temperatura, sino que el tono que

presenta este color es similar al que presentaría el cuerpo negro si se calentase a esa temperatura.

Este concepto de cuerpo negro tiene aplicación a la hora de definir la luz blanca en iluminaciones, indicándose con la temperatura de color si es una luz blanco-rojiza, blanca o blanco-azulada. También se suele utilizar esta terminología en estudios fotográficos y de Televisión para definir el blanco de referencia que se va a utilizar.

4. ESPACIOS COLORIMÉTRICOS PARA TELEVISIÓN

4.1 ESPACIO R'G'B' DE TELEVISIÓN

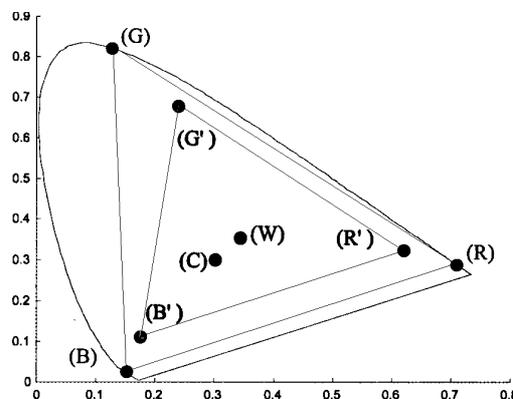
La Televisión en color no utiliza los primarios (R) (G) y (B) del Espacio RGB, porque estos colores están muy saturados, y en la naturaleza no están excesivamente saturados, sino que más bien se encuentran próximos al blanco, es decir, se encuentran alrededor del centro del diagrama de cromaticidad.

Los colores (X) (Y) y (Z) tampoco se pueden utilizar porque no son colores físicos, como se ha comentado en apartados anteriores.

Para los Sistemas de Televisión, los primarios que se decidieron utilizar, según las recomendaciones del NTSC (National Television System Comité), fueron establecidos en la Norma UIT-R BT.470-4, siendo estos:

	x	y	z
(R')	0.67	0.33	0
(G')	0.21	0.71	0.08
(B')	0.14	0.08	0.78

Los colores escogidos corresponden con tonos rojo, verde y azul, pero son un poco diferentes de los primarios del espacio RGB porque los coeficientes son distintos.



Además, el blanco que se va a utilizar como referencia no es el blanco equienergético (W), debido a que es un poco rojizo, sino un blanco (C) que tiene como coeficientes:

$$x = 0.3101 \quad y = 0.3162$$

Recordar que el color (**W**) tiene los coeficientes: $x = y = z = 1/3$.

4.2 ECUACIONES DE TRANSFORMACIÓN DEL ESPACIO XYZ AL ESPACIO R'G'B'

La ecuación de transformación es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 0.606935 & 0.173510 & 0.200254 \\ 0.298938 & 0.586631 & 0.114430 \\ 0 & 0.066099 & 1.115701 \end{vmatrix} * \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix}$$

Conocidos los componentes de un determinado color en el Espacio R'G'B', el valor de luminancia de ese color se calcula según la siguiente expresión:

$$L = 0.298R' + 0.5866G' + 0.1144B'$$

Esta ecuación es importante debido a que el sistema NTSC (donde se utiliza el espacio R'G'B') necesita enviar por separado la luminancia.

Aunque se trabaje en este espacio, la luminancia se seguirá llamando **Y**, por lo que la ecuación fundamental para los sistemas de televisión (ecuación aproximada) es la siguiente:

$$Y = 0.3R' + 0.59 G' + 0.11B'$$

4.3 COEFICIENTES r'g' b'

Al igual que en los demás espacios colorimétricos se tiene que:

$$r'' = \frac{R''}{R'' + G'' + B''} \quad g'' = \frac{G''}{R'' + G'' + B''} \quad b'' = \frac{B''}{R'' + G'' + B''}$$

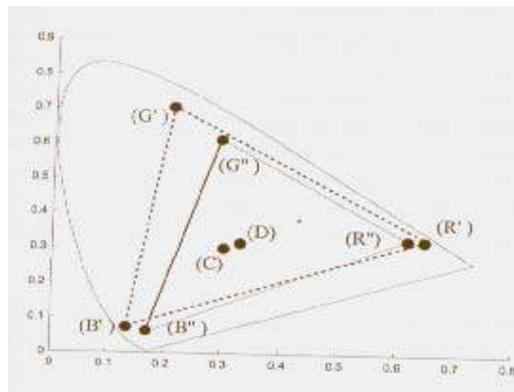
4.4 ESPACIO R''G''B'' DE TELEVISIÓN

Cuando se instaló en Europa la televisión en color, la UER (Unión Europea de Radiodifusión) adoptó otros primarios y otro blanco de referencia (distintos de los R'G'B'), que se adaptaban mejor a los gustos de los telespectadores europeos. Estos colores se usan en los Sistemas PAL y SECAM.

Como blanco de referencia se utiliza el blanco (D₆₅), cuyos coeficientes tricromáticos son ligeramente diferentes del blanco (C) utilizado en la televisión americana. Los coeficientes y componentes también son diferentes. La siguiente tabla indica los coeficientes de los primarios y del blanco:

	x	y
Primario (R'')	64	33
Primario (G'')	29	60
Primario (B'')	15	6
Blanco (D ₆₅)	3127	3290

En el siguiente diagrama de cromaticidad se puede ver las posiciones de los colores R'' G'' B'' comparado con la posición de los componentes R'G'B':



En este espacio la ecuación de la luminancia es la siguiente:

$$L = 0.22201R'' + 0.70665G'' + 0.07134B''$$

Un detalle curioso es que los sistemas TV europeos utilizan la ecuación de la televisión americana, es decir,

$$L = 0.3 R' + 0.59 G' + 0.11 B'$$

Por lo que la luminancia que se utiliza no es la real, sino una que se le parece. Esto no afecta a los monitores en color porque no utilizan la luminancia directa, sino los componentes.

4.5 COEFICIENTES r'' g'' b''

Al igual que en los demás espacios colorimétricos se tiene que:

$$r'' = \frac{R''}{R'' + G'' + B''} \quad g'' = \frac{G''}{R'' + G'' + B''} \quad b'' = \frac{B''}{R'' + G'' + B''}$$

B''

4.6 TRANSFORMACIÓN ENTRE DOS ESPACIOS DE COLOR DISTINTOS

Para pasar de un espacio a otro sólo hay que aplicar una matriz de transformación (M):

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{c} R2 \\ G2 \\ B2 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{ccc} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c} R1 \\ G1 \\ B1 \end{array} \right| \\ \downarrow \\ (M) \end{array}$$

Lo usual es utilizar el espacio intermedio XYZ, porque en él se conocen los coeficientes de los primarios para los dos espacios, así como el blanco de referencia para cada uno de ellos.

De este modo, la relación entre estos dos espacios y el espacio XYZ tiene las siguientes matrices de transformación:

$$\left| \begin{array}{c} X \\ Y \\ Z \end{array} \right| = (M_1) \cdot \left| \begin{array}{c} R1 \\ G1 \\ B1 \end{array} \right|$$

$$\left| \begin{array}{c} X \\ Y \\ Z \end{array} \right| = (M_2) \cdot \left| \begin{array}{c} R2 \\ G2 \\ B2 \end{array} \right|$$

La matriz buscada tiene la siguiente expresión:

$$(M) = (M_2)^{-1} \cdot (M_1)$$

4.7 PASO DEL ESPACIO DE COLOR DEL SISTEMA NTSC CON BLANCO (C) AL ESPACIO DEL SISTEMA PAL CON BLANCO D₆₅

Si estando en un país en el que se utilice el Sistema PAL, se recibe una señal del Sistema NTSC (R'G'B'), sería necesaria una transformación para poder representarla correctamente, ya que si no se hiciera los colores no se reproducirían correctamente.

La relación entre los componentes en ambos espacios será:

$$\begin{pmatrix} R'' \\ G'' \\ B'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.442706 & -0.3417338 & -0.076862 \\ -0.027477 & 0.935084 & 0.066937 \\ -0.027205 & -0.051779 & 1.180182 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix}$$