



Lighting  
Research Center



National Lighting Product Information

# Fuentes de luz : color y eficacia

Ing. Luis J.R. Deschères

UBA-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Profesor Titular-Cátedra: Iluminación y Color  
Carrera Especialización en Higiene y Seguridad en el Trabajo

## ILUMINACION – ENERGIA - IMPACTO AMBIENTAL - GLOBAL

- 2.600 TWh consumo de energía anual en iluminación en todo nuestro planeta.
- Representa el 17 a 19% de la producción mundial de la electricidad.
- Representa el 2% del consumo energético anual de nuestro planeta.
- 1.700 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> acompañan esta producción de energía contribuyendo al efecto invernadero
- Se estima en 33 mil millones la cantidad de lámparas que funcionan en nuestro planeta
- La producción anual supera las 20 mil millones de unidades

# CAMPO FISIOLÓGICO

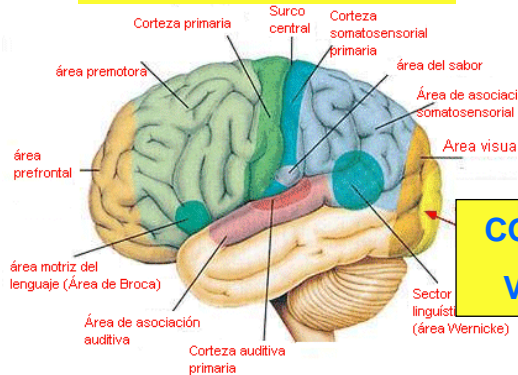


Ojo

# FOTORECEPTORES

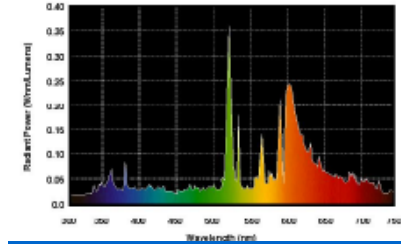


# CEREBRO



# CORTEZA VISUAL

# CAMPO FÍSICO



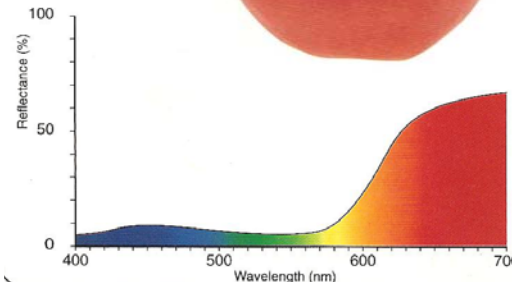
Fuente Primaria  
(Lámpara)

$$\phi(\lambda)$$

ESTIMULO

$$\phi(\lambda)$$

Fuente Secundaria  
(Objeto)




$$R(\lambda)$$

**El color es sólo un pigmento  
de nuestra imaginación**

**Ingling (1977)**

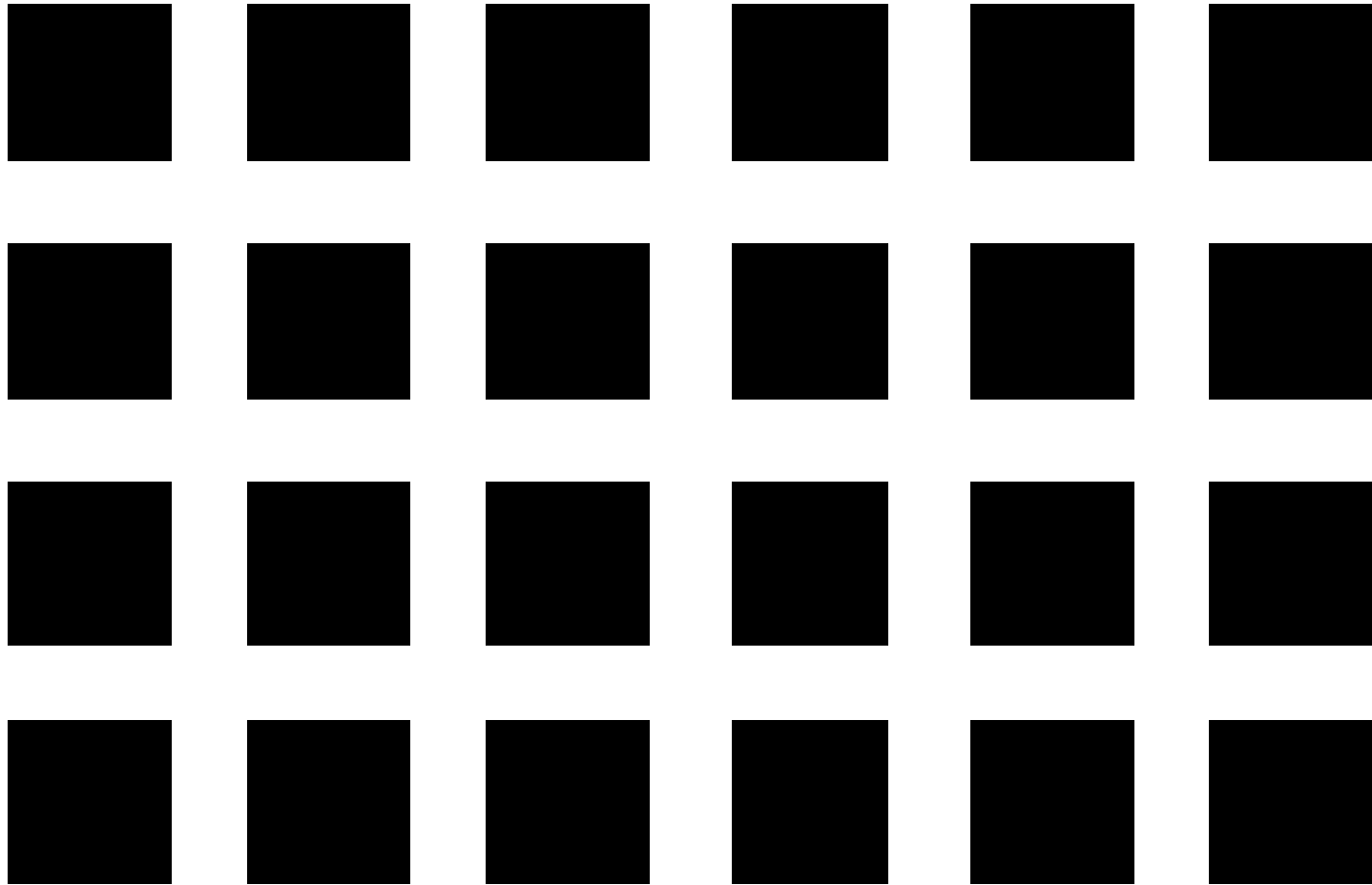


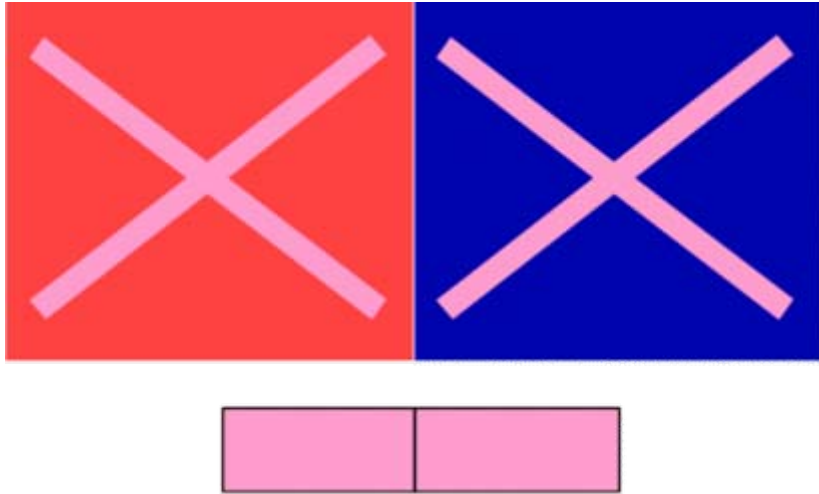
**El color no es una propiedad física de los objetos, mas bien es una respuesta humana fisiológica y psicológica a la luz**

A night-time photograph of the Eiffel Tower in Paris, France, illuminated with warm yellow lights. The tower is the central focus, standing tall against a dark sky. In the foreground, several large, illuminated fountains spray water upwards, their jets lit with a vibrant blue-green glow. The surrounding area is also lit with various streetlights and building lights, creating a lively urban atmosphere. The overall scene is a classic view of the Eiffel Tower at night, showcasing its iconic architecture and the surrounding park's fountain display.

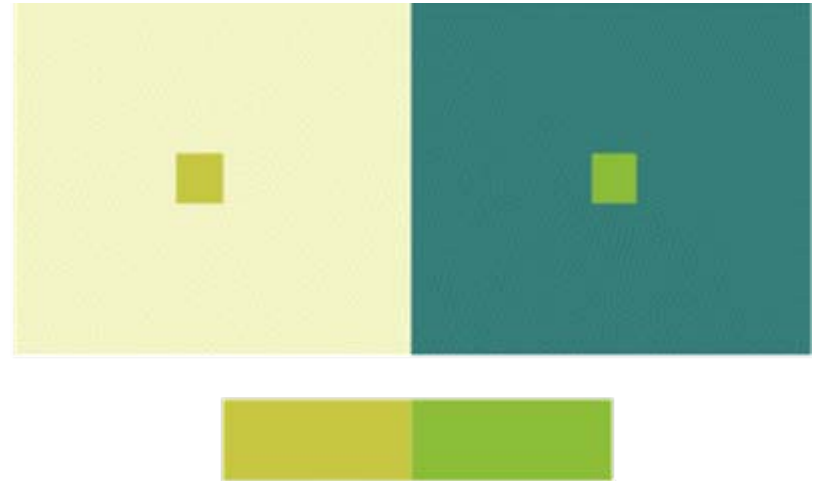
**El fenómeno de la visión en color es sico-físico**

**La rejilla de Herman: Una rejilla de cuadrados negros sobre fondo blanco produce manchas “fantasmas” de color gris en las intersecciones. Se producen por la forma en que las señales eléctricas de los fotorreceptores se ven afectadas por estímulos descentrados.**





**Contraste de color** Las cruces de color rosa son del mismo color exactamente, aunque sobre distintos fondos se aprecian como tonos distintos.



**Colores percibidos como similares** cuando en realidad son notablemente distintos, debido al contexto en que se presentan.

## ILUMINACION INTERIOR CON LAMPARAS FLUORESCENTE



*Gentileza GE Consumer & Industrial*

## ILUMINACION INTERIOR EN AREAS COMERCIALES CON LAMPARAS DE DESCARGA DE ALTA INTENSIDAD H.I.D.



*Gentileza GE Consumer & Industrial*

# Mesopic vision- Should we replace all sodium lamps by lamps with white light in our public lighting?

*Stephan Völker – University of Paderborn – CIE 26 TH SESSION-BEIJING 2007*

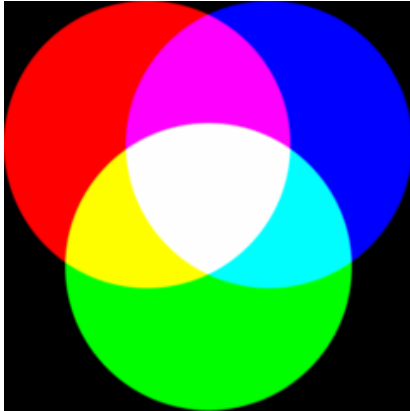


**British Standard  
BS5489-1:2003**

Autoriza reducir los niveles de iluminación en alumbrado público residencial si IRC > 60

*Gentileza GE Consumer & Industrial*

# SINTESIS ADITIVA DEL COLOR

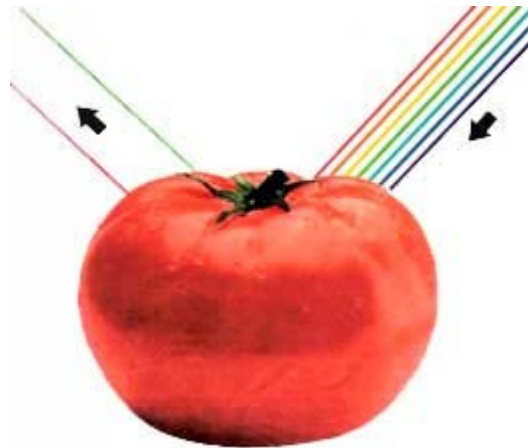
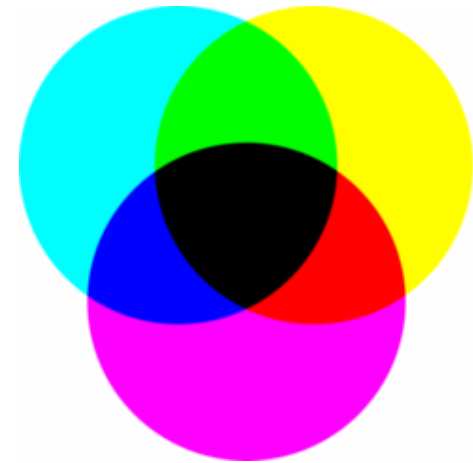


Implica que se emite luz de una fuente (RGB). Ejemplo: televisores, monitores de computadoras

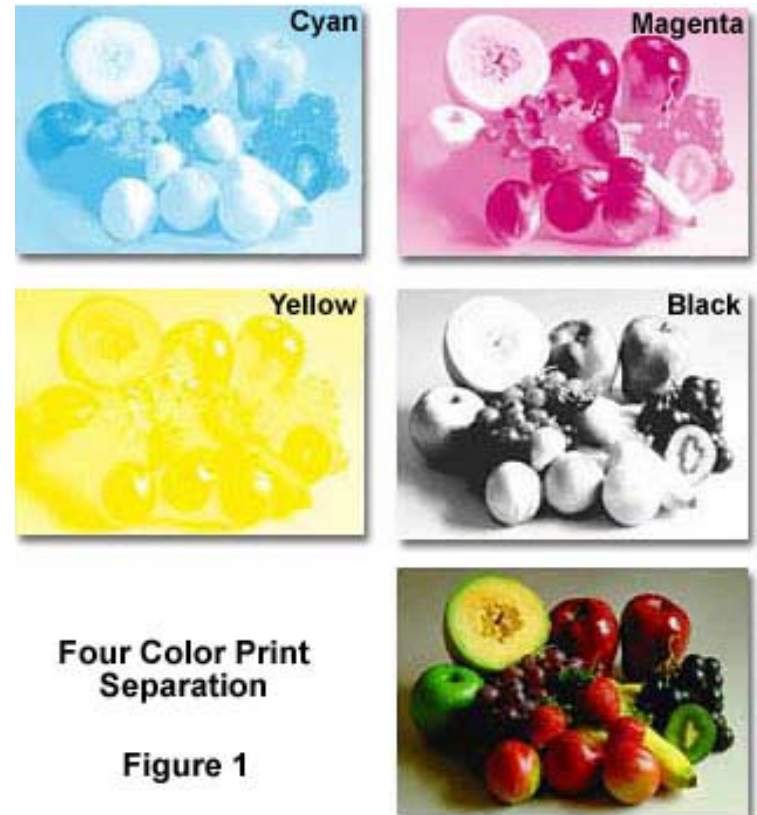


# SINTESIS SUSTRACTIVA DEL COLOR

Se trata de al luz reflejada por los pigmentos de una superficie. Explica la teoría de la mezcla de pinturas, tintes, tintas y colorantes naturales para crear colores que absorban ciertas longitudes de onda y reflejan otras.



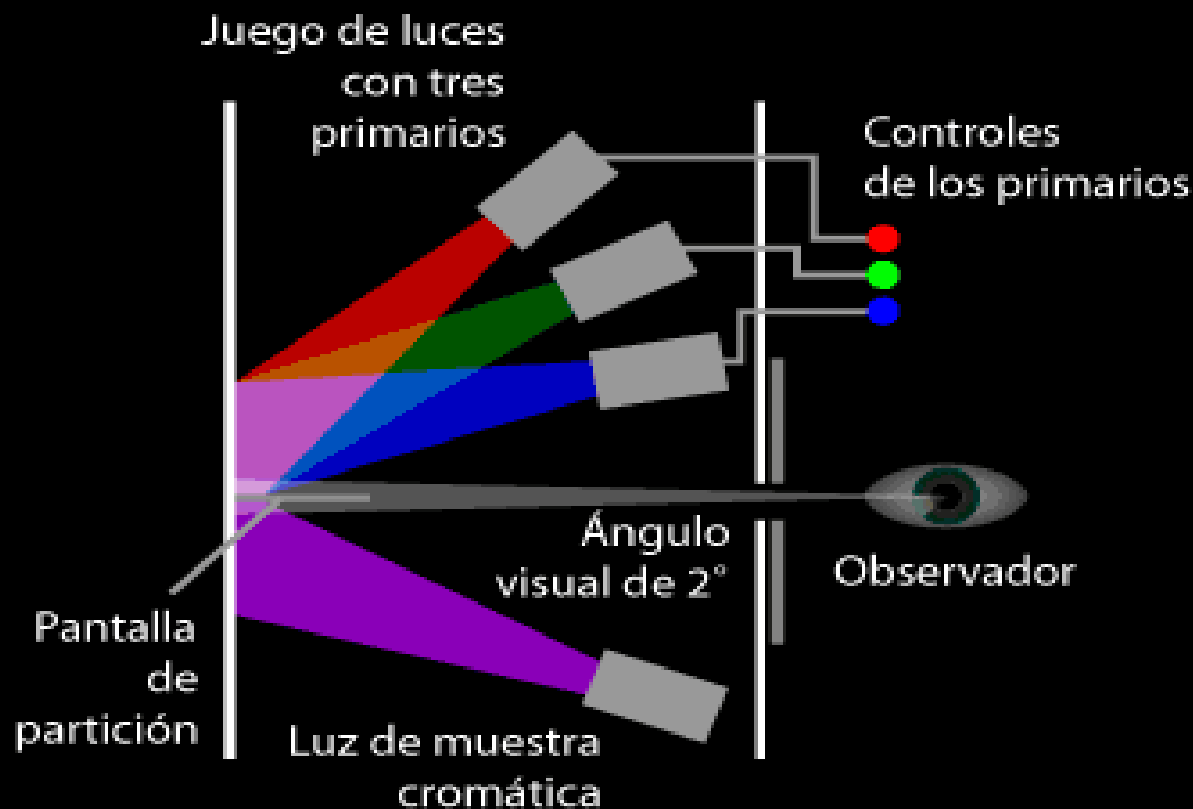
MODELO DE COLOR CMYK



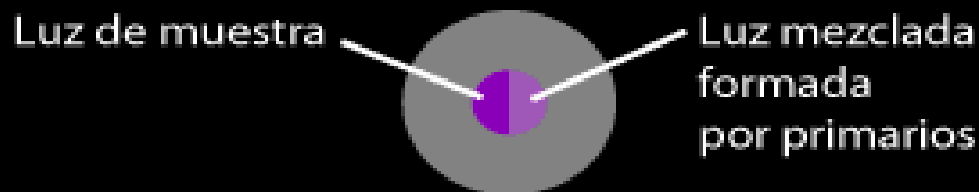
Four Color Print Separation

Figure 1

# Experimento de correspondencia de colores mediante mezcla aditiva



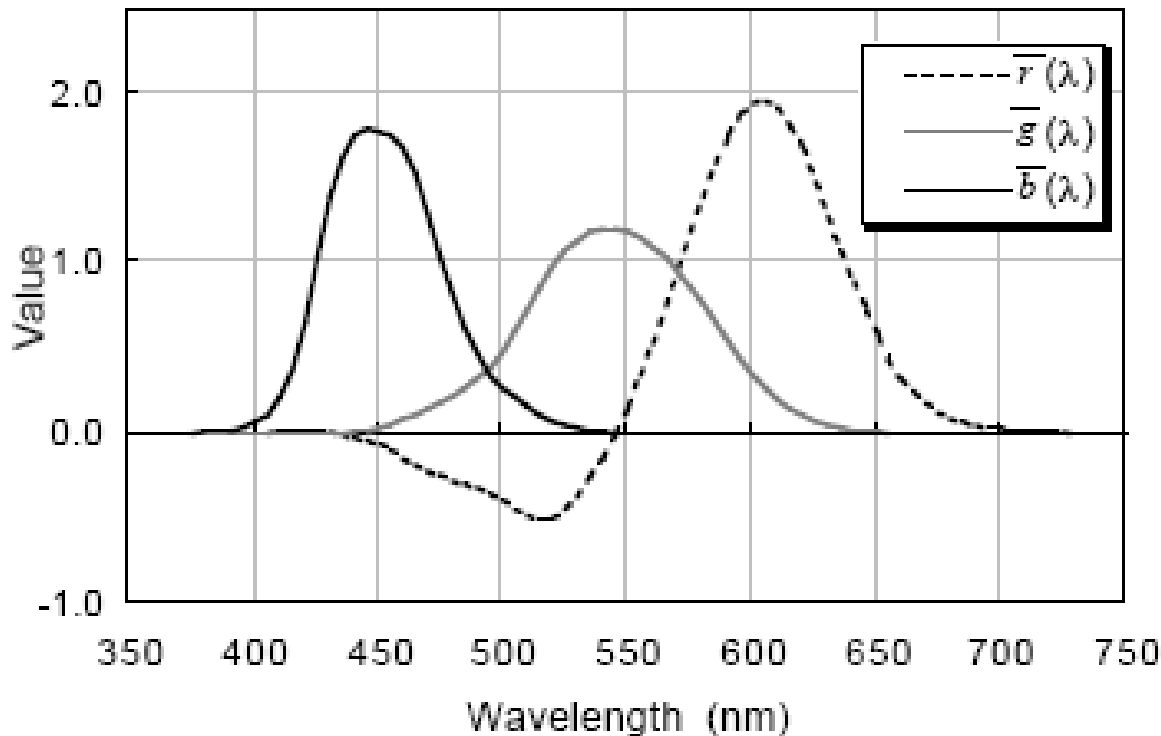
Lo que ve el observador (Ambas mitades deben parecer iguales)



# CIE 1931 – RGB Funciones de Igualación de Color

## WRIGHT Y GUILD (1931)

OBTIENEN ( POR EXPERIMENTOS VISUALES SEPARADOS) LAS FUNCIONES DE IGUALACION DE COLOR USANDO TRES PRIMARIOS RGB SIENDO LA BASE DEL SISTEMA DE COLORIMETRIA CIE

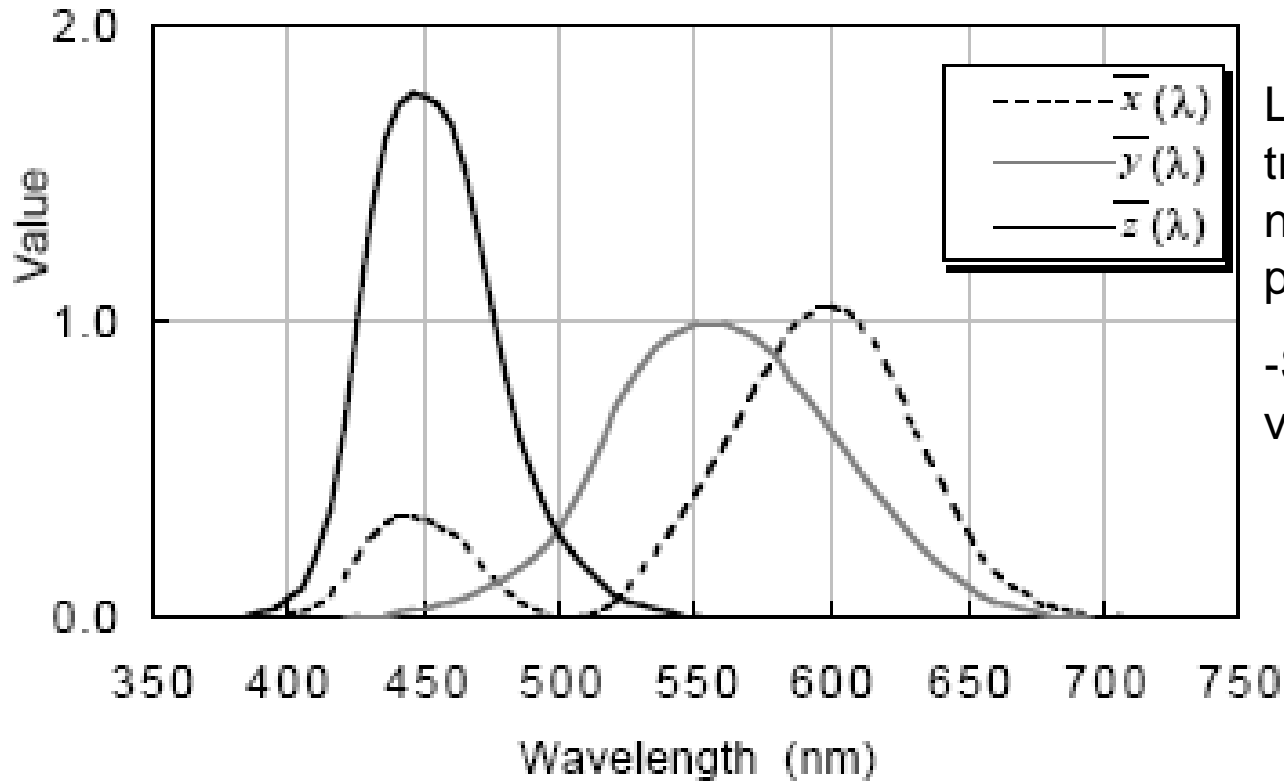


**R ( 700 nm)**

**G(546,1nm)**

**B(435,8nm)**

## CIE 1931 – X Y Z Funciones de Igualación de Color



Los primarios **RGB** se transforman en un nuevo conjunto de primarios **XYZ**

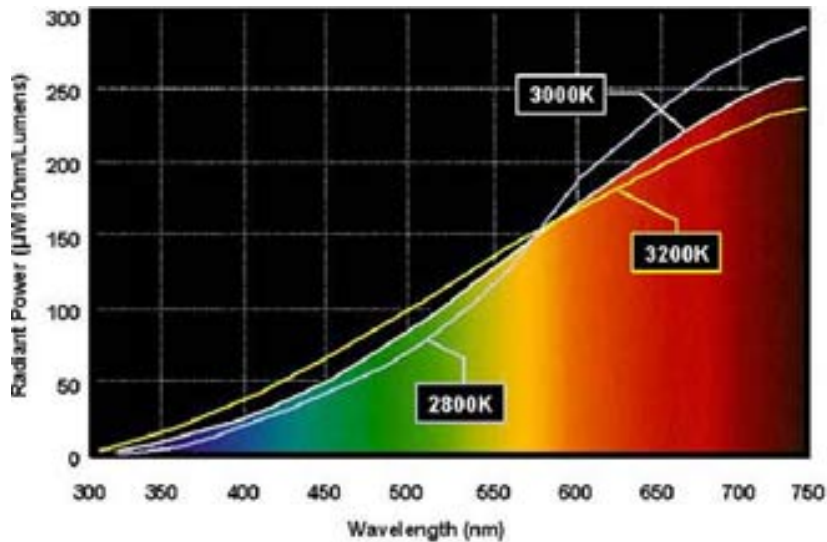
-Se eliminan los valores negativos.

**CIE 1931 – OBSERVADOR PATRON** –Valores triestímulos  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$

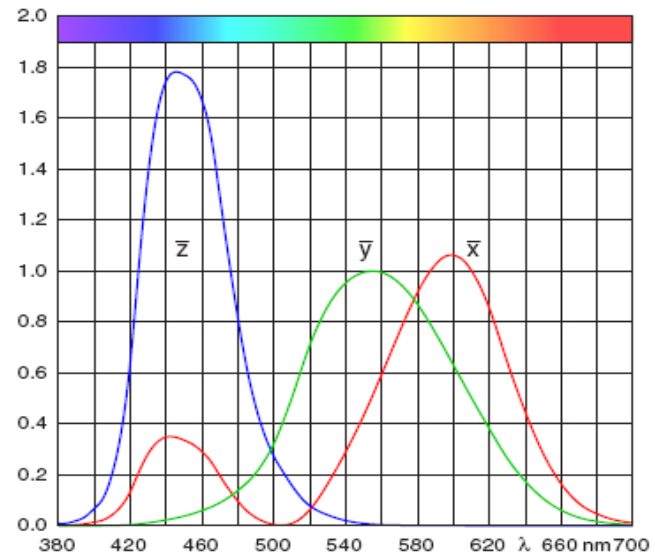
La participación de los bastones se elimina, campo visual 2°, Leyes de **Grassmann** (aditividad)

$$\bar{g}(\lambda) \longrightarrow V(\lambda).$$

# VALORES TRIESTIMULOS X Y Z



X



XYZ Color-matching functions

$$X = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

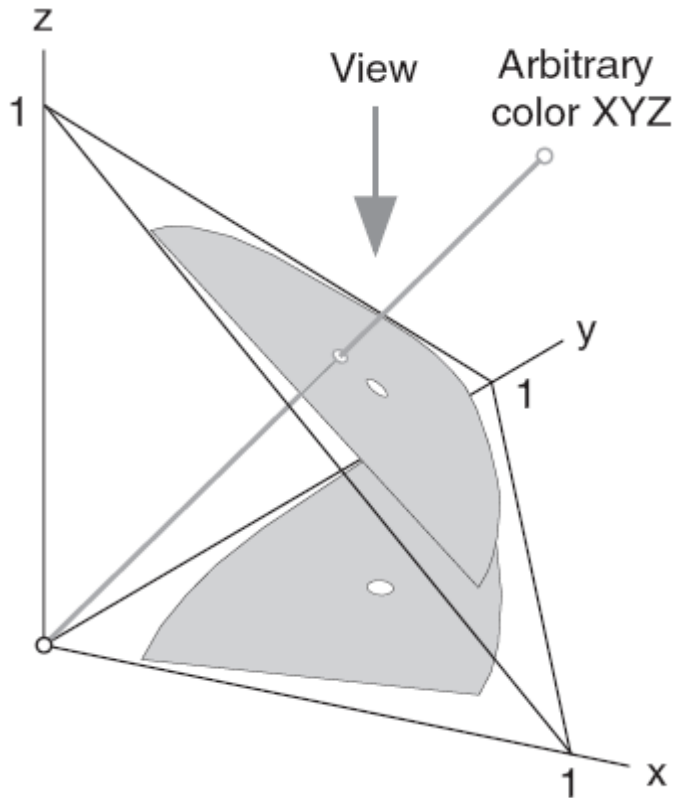
$$Y = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

Proyectando los valores triestímulos en el plano unitario  $X+Y+Z=1$ , el color puede expresarse con dos dimensiones

# ESPACIO TRIESTÍMULO X Y Z

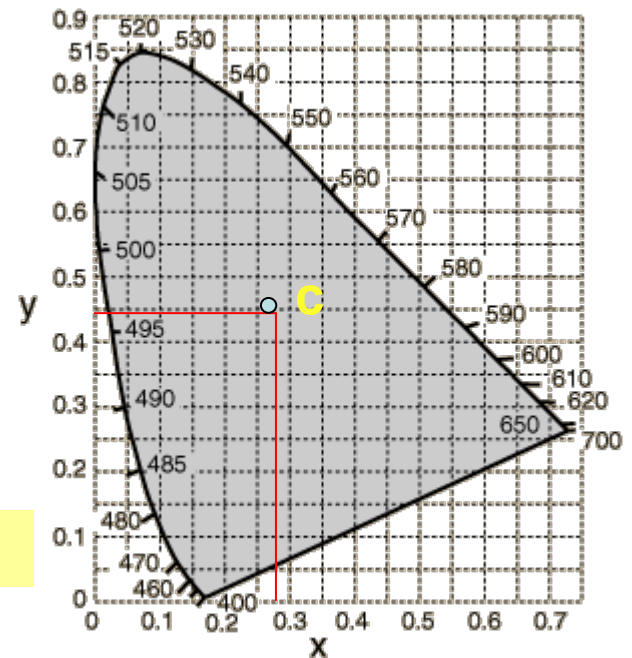
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$



# DIAGRAMA DE CROMATICIDAD CIE 1931

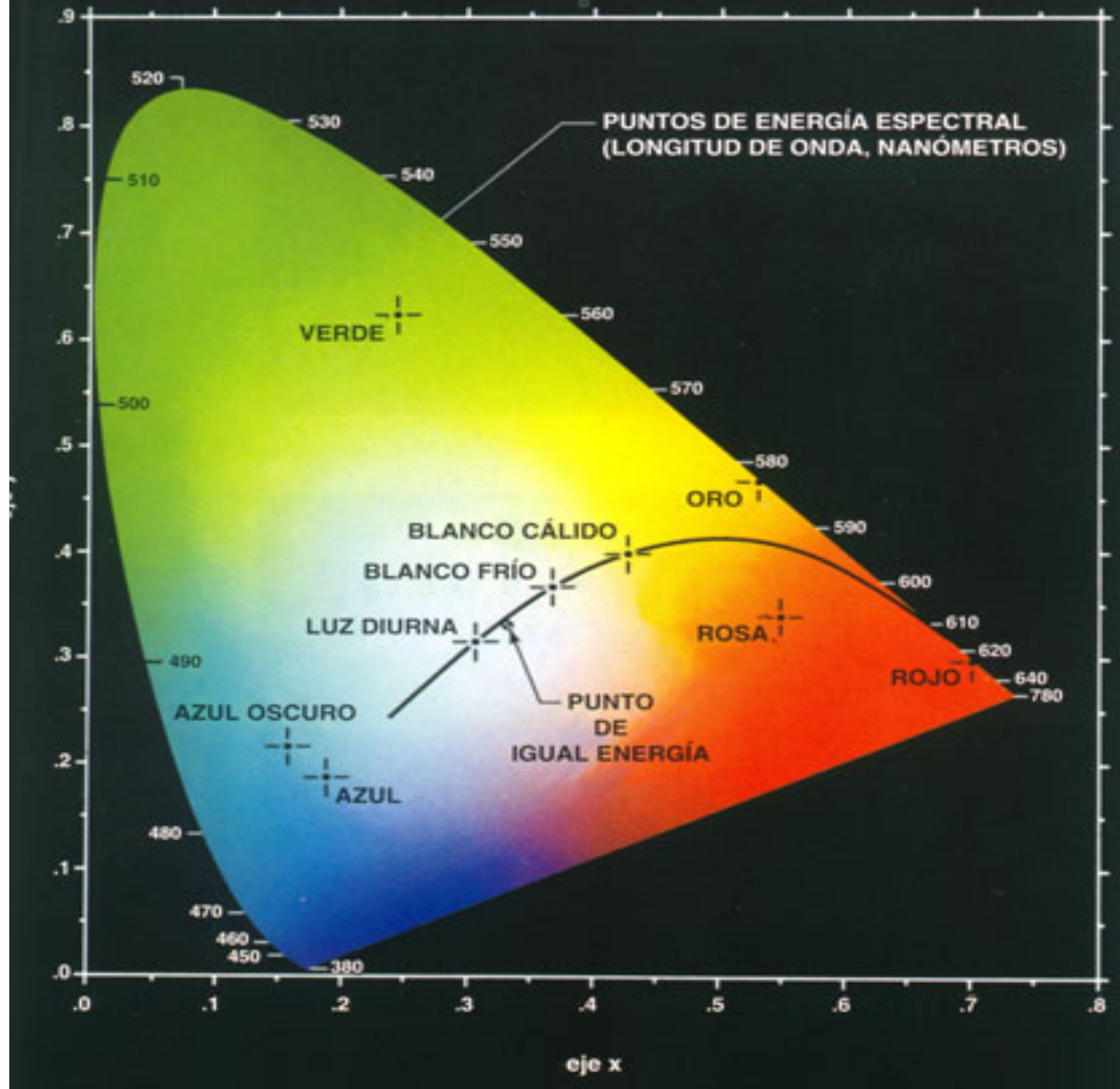
Projection and chromaticity plane

**El color C queda definido (x;y)**



TCC (K)

# DIAGRAMA DE CROMATICIDAD CIE 1931



12000K

7000K

4000K

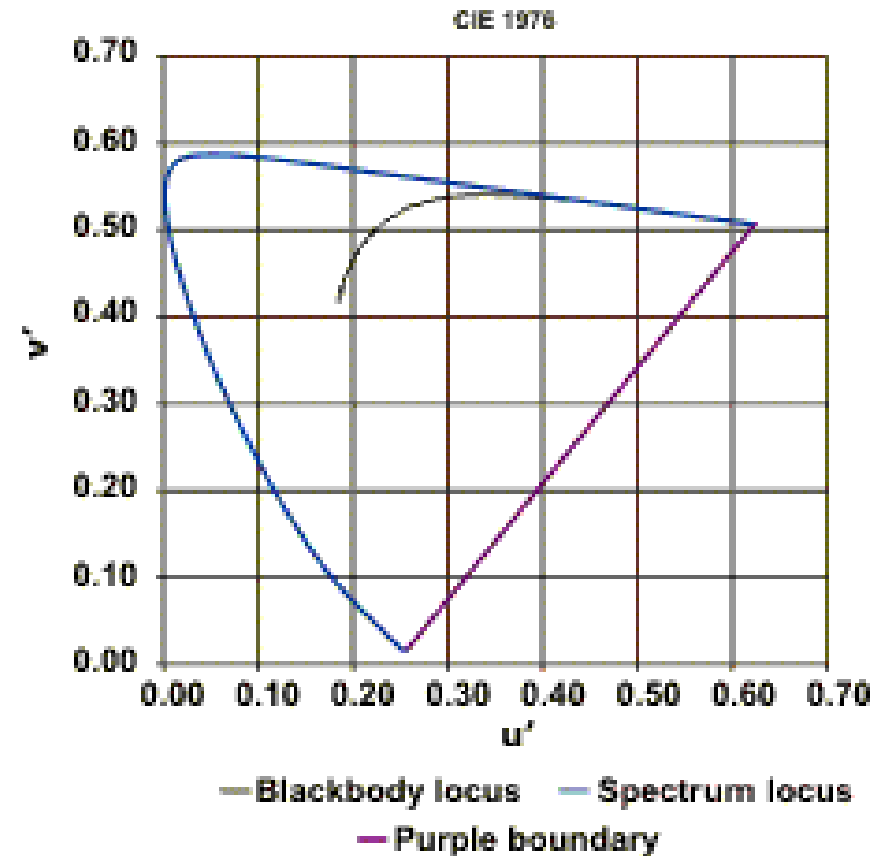
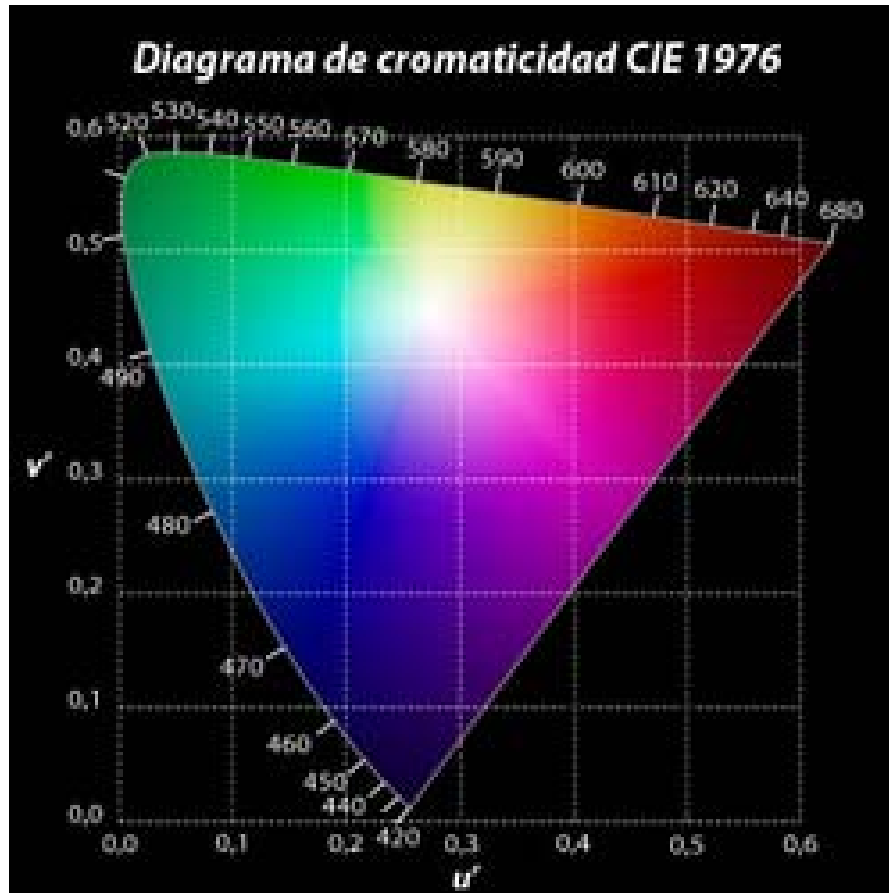
3000K

2000K

# ESPACIO DE COLOR CIE 1976

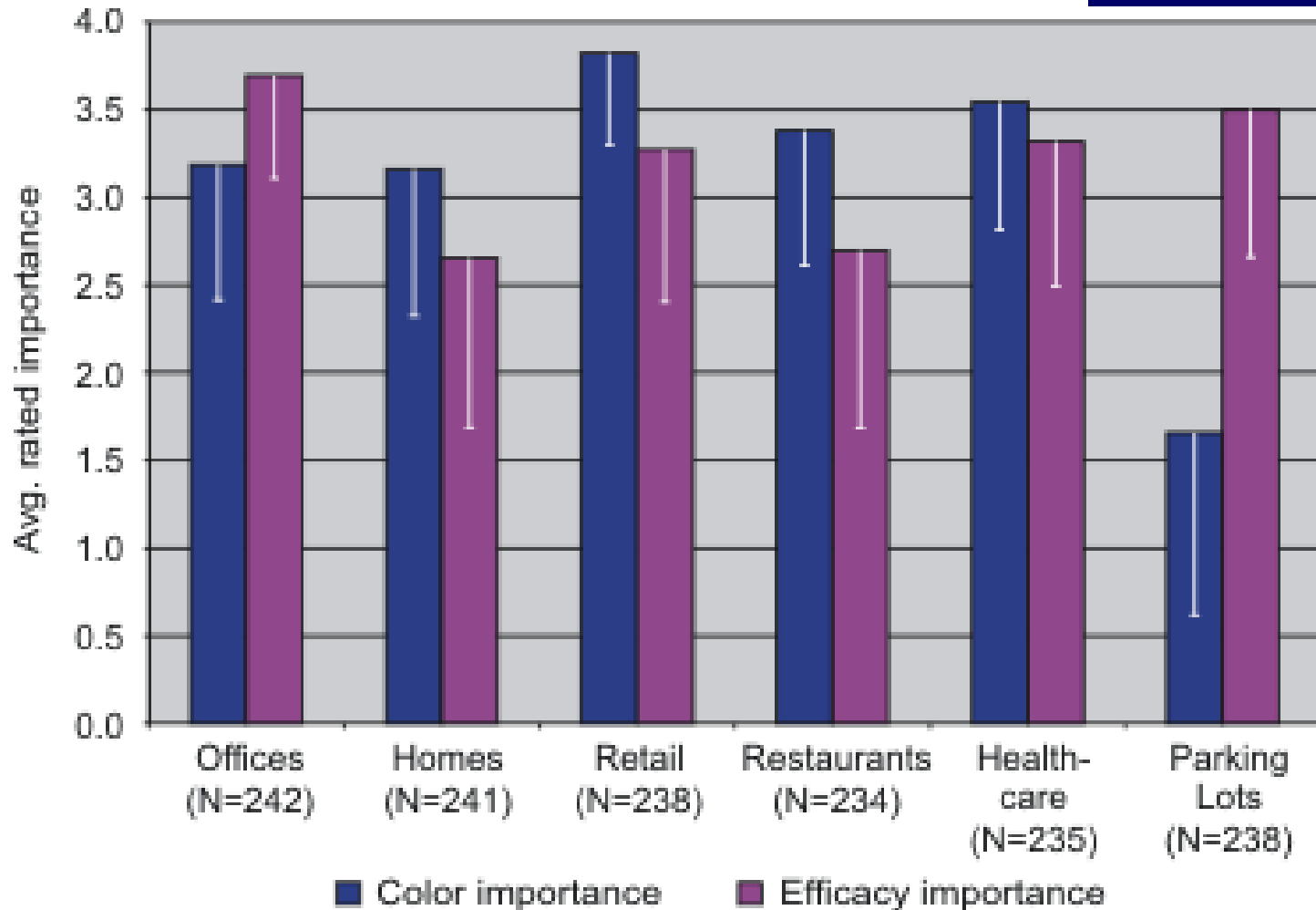
Diagrama de Cromaticidad de escala uniforme (UCS)

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z}; \quad v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z}$$



# Encuesta NLPIP – National Lighting Product Information Program – USA

Enero 2004 – Resultados sobre 243 sitios web usuarios registrados



## Características de color más requeridas por los encuestados - NLPIP

Criterio más importante	Clasificación promedio asignada	Desviación estándar	Cantidad de respuestas
Indice de reproducción cromática IRC	3,5	0,7	237
Temperatura de color correlacionada TCC	3,2	1,0	233
Estabilidad de color	3,2	1,0	232
Tipo de lámpara	3,1	1,0	235
Consistencia de color	3,1	1,0	228
Espectro de radiación de la lámpara	2,4	1,0	226
Full-Spectrum Index ( FSI )	2,0	1,3	204
Marca de la lámpara	1,9	1,2	226
Gamut Area	1,5	1,2	189

# Coordenadas de cromaticidad de 67 fuentes de luz comerciales graficadas en el diagrama de cromaticidad del espacio de color CIE 1976

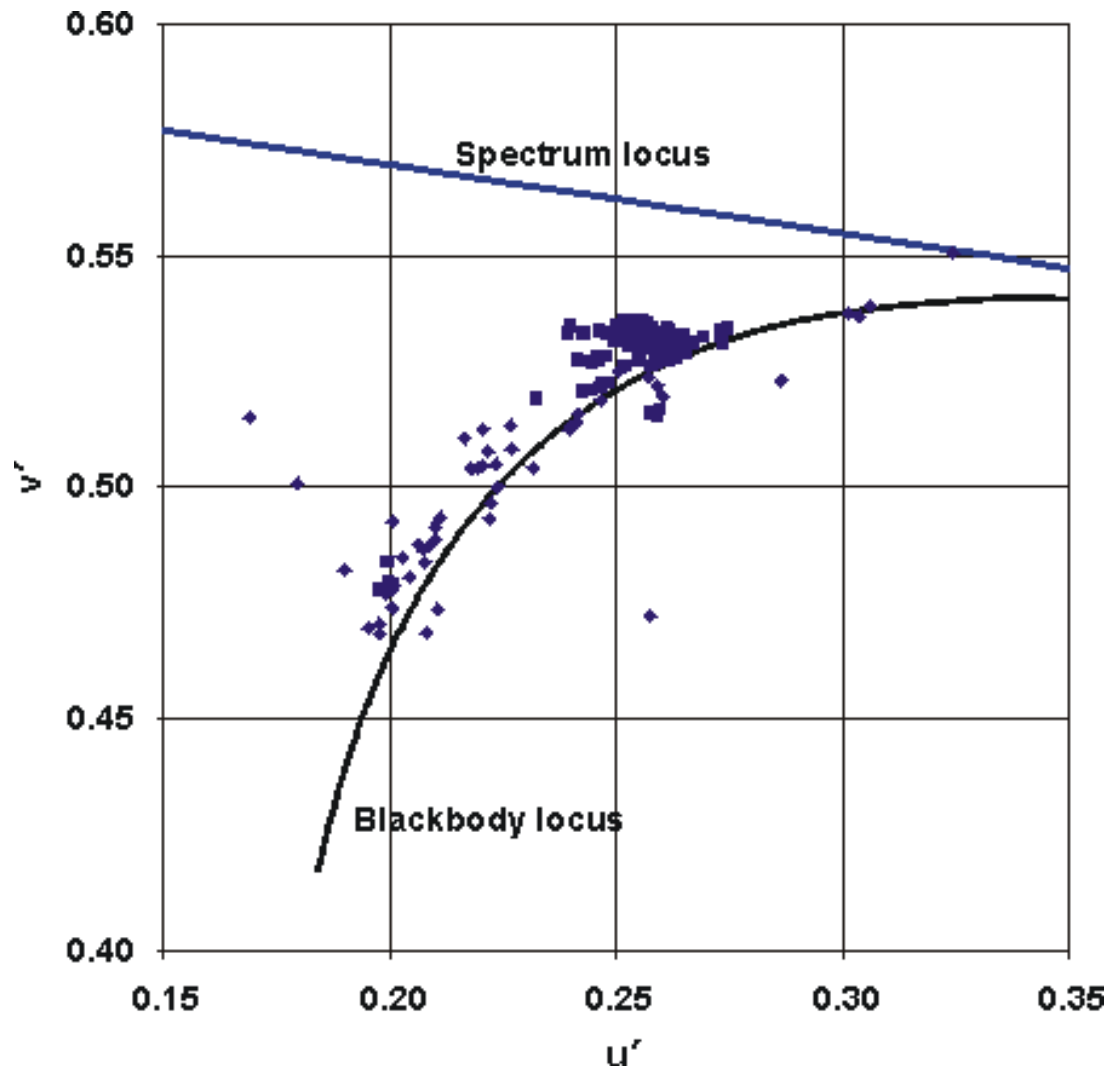
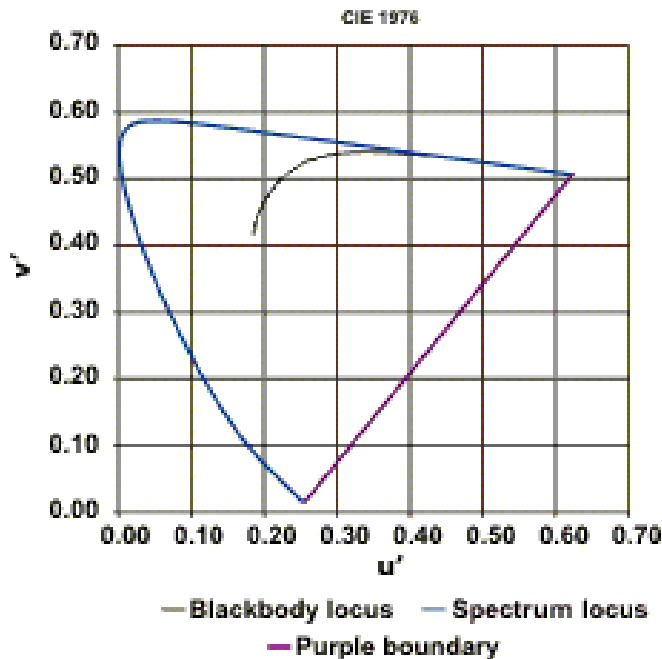
## Fuentes de luz "blanca"

Fluorescentes

Mercurio

Mercurio halogenado

Incandescente



# Diagrama de cromaticidad CIE 1976 con seis líneas de isoterma usadas por los fabricantes de lámparas para representar la luz emitida por sus lámparas fluorescentes comerciales

La fuente A y la fuente B  
Tienen la misma TCC  
3000K.

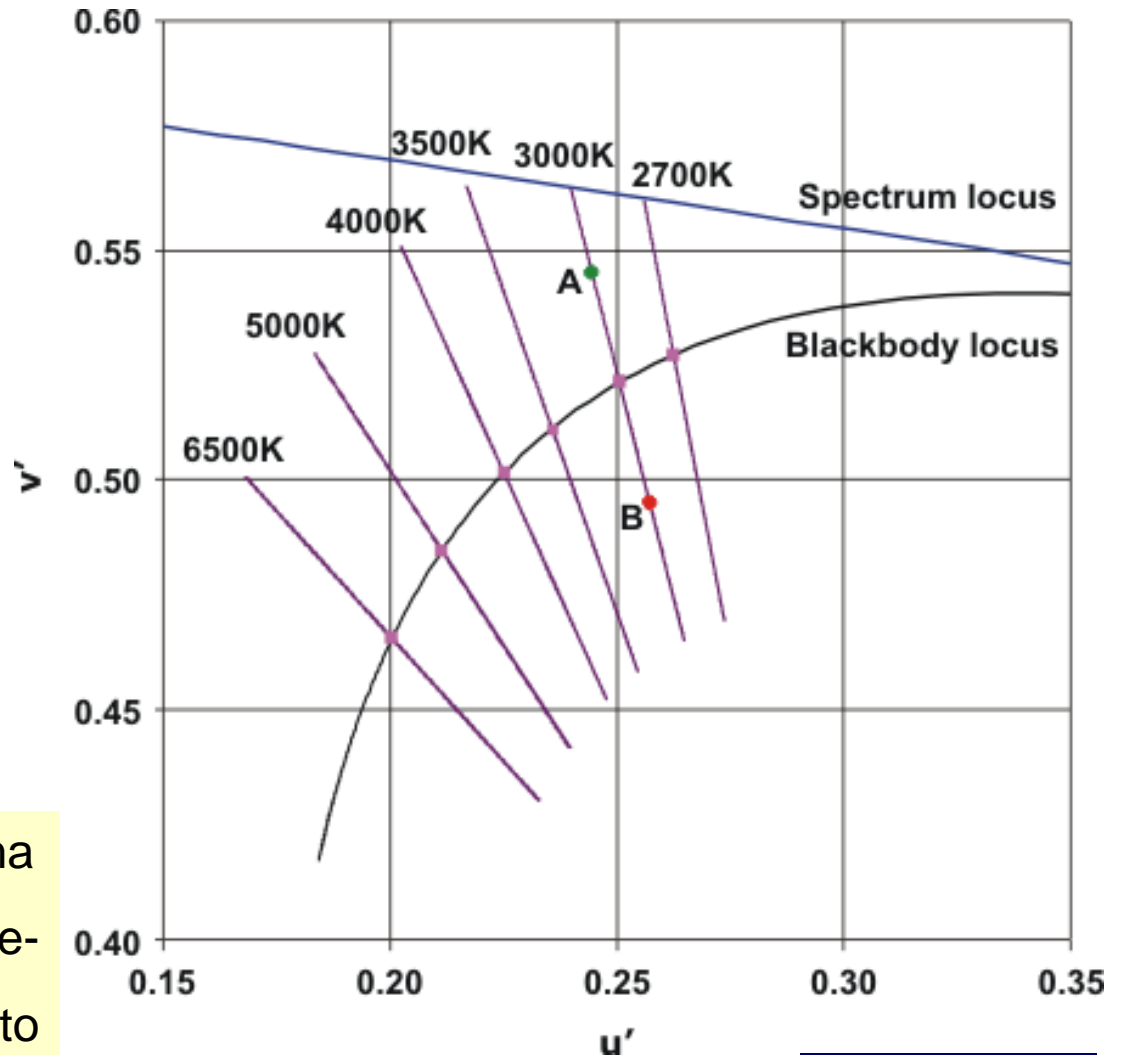
Sus coordenadas de cromaticidad ( $u'$ ;  $v'$ ) son diferentes y por lo tanto se verán muy distintas para el observador:

A: blanco-verdoso

B: blanco-púrpura

Para solucionar este problema

La industria incorpora un sistema de tolerancia de color junto a la **TCC** para especificar la **consistencia en color**



**Consistencia en color (color consistency)** : es la variación media en cromaticidad entre lámpara y lámpara de una partida de muestras supuestamente idénticas.

-Cuando más complicada es la física y química de la fuente, más difícil resulta fabricarlas de acuerdo al criterio de consistencia en color y TCC.

-Esto ocurre muy particularmente en las de mercurio halogenado.

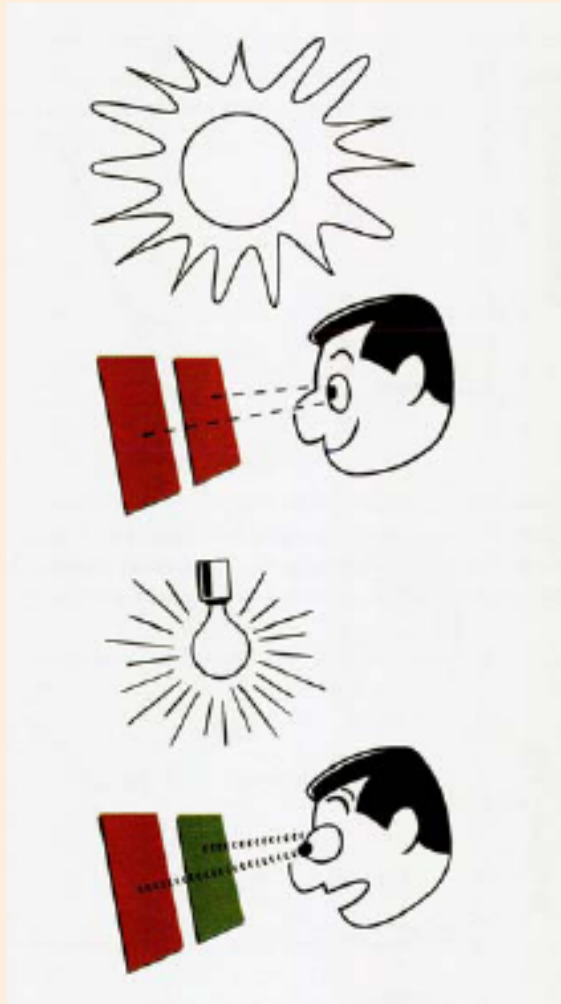


**Diferentes muestras de una misma partida de lámparas MH pueden ser percibidas con diferentes cromaticidades**

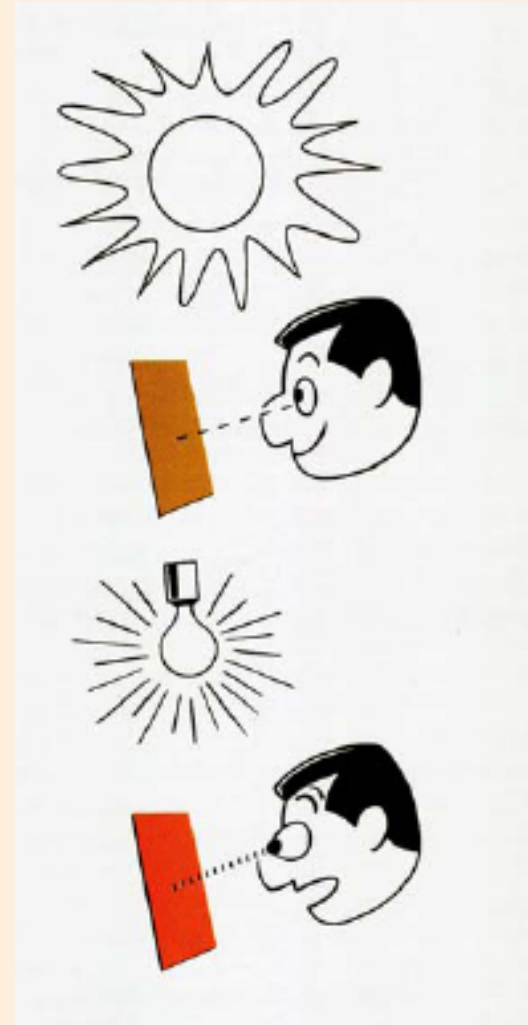
**La gente comete frecuentemente errores al querer igualar los colores de dos lámparas. Esto significa que dos lámparas de pequeña, pero mensurable diferencia de coordenadas de cromaticidad no pueden ser vistas como distintas por la mayoría de ellos.**

# METAMERISMO Y CONSTANCIA DE COLOR DE LOS OBJETOS

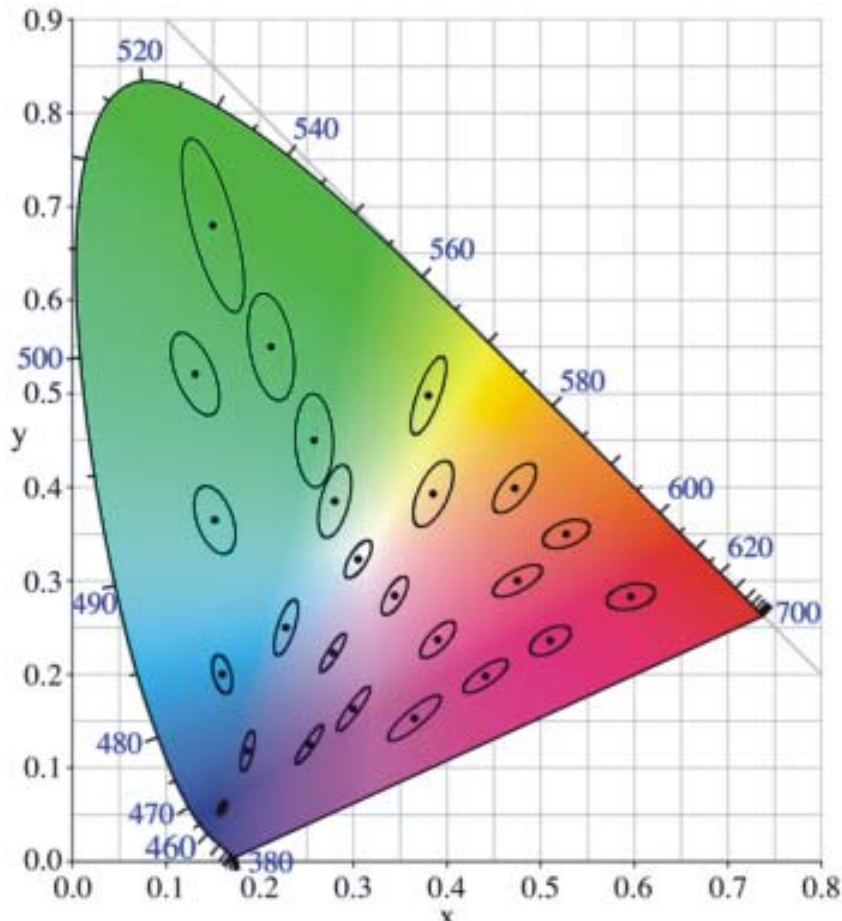
## Metamerismo



## Constancia de color



Para acotar estas variaciones, la industria de lámparas utiliza un sistema de consistencia en color basado en las elipses de MacAdam (Wyszeky y Stiles 1982)



**A cada punto del espacio le está asociada una elipse que visualmente es percibido como la mínima diferencia de color perceptible (m.d.p.)**

**Un observador humano no debería detectar una diferencia de color entre un iluminante de referencia con su cromaticidad ubicada en el centro de la elipse y toda otra fuente ubicada dentro de los límites de la elipse.**

Este diagrama de cromaticidad (x;y) es muy poco uniforme en términos de diferencia de color. Para mejorar esto se usa el CIE 1976 -UCS

**Este diagrama de cromaticidad (x;y) es muy poco uniforme en términos de diferencia de color. Para mejorar esto se usa el CIE 1976 – UCS**

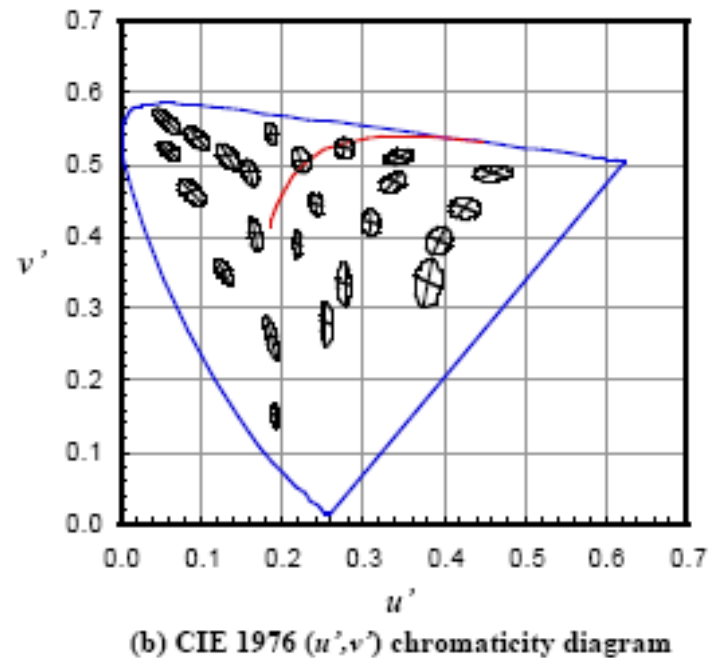
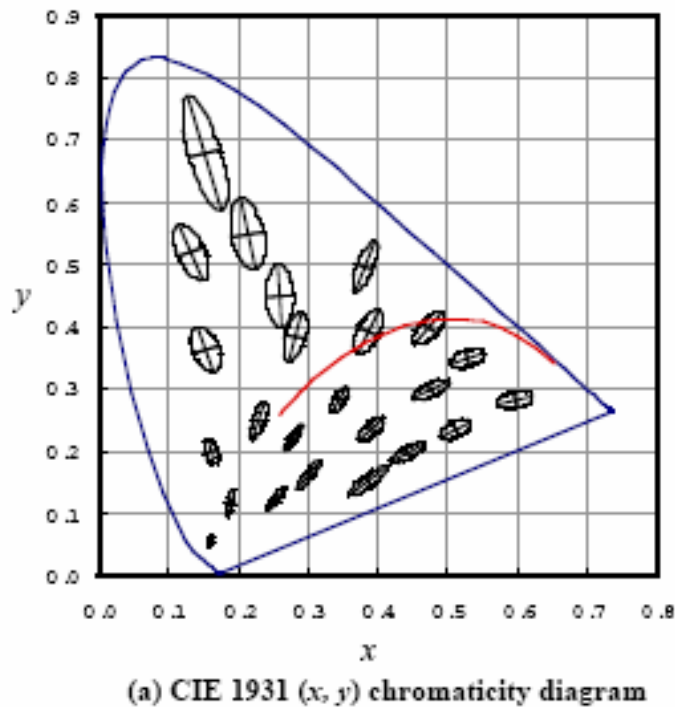
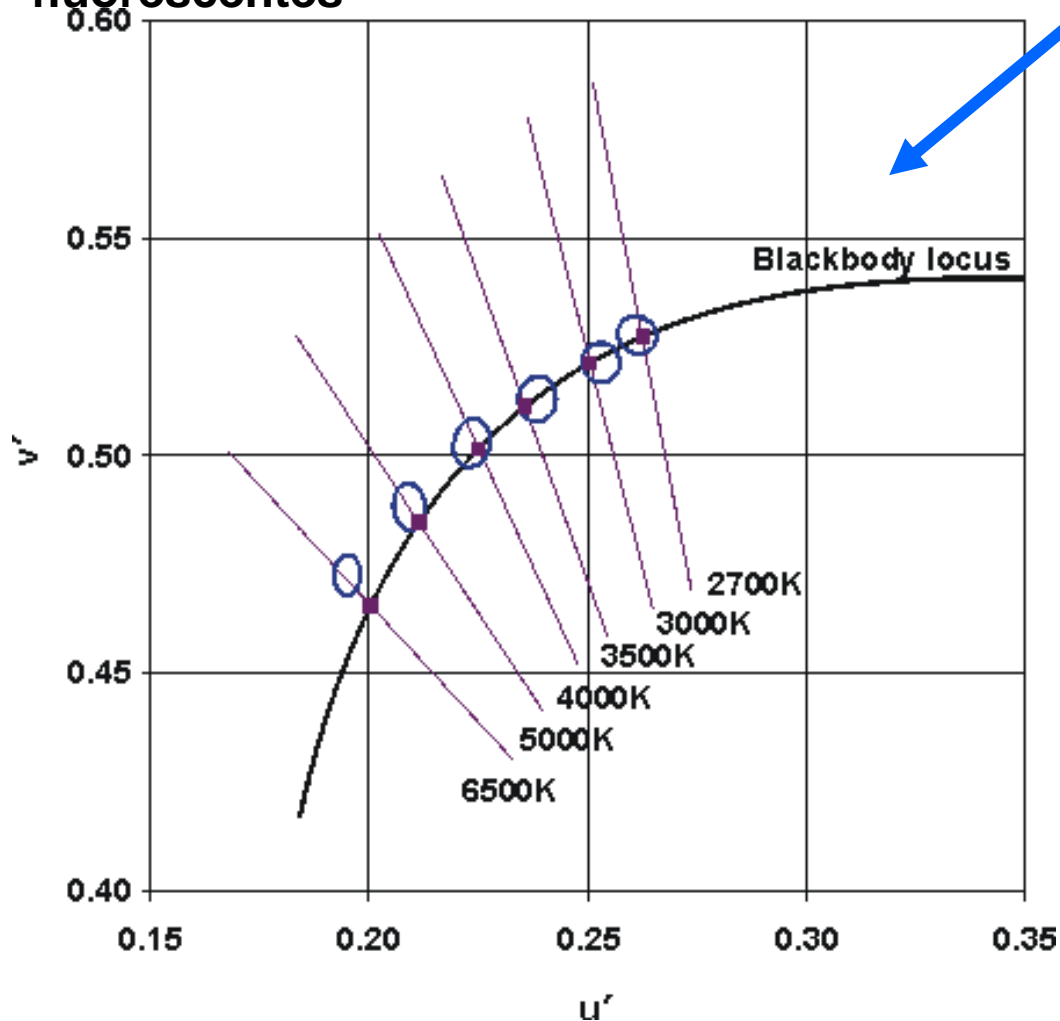


Figure 3 – MacAdam Ellipses in CIE 1931(x, y) diagram and the CIE 1976 (u', v') diagram. The ellipses are plotted 10 times their actual size.

**ANSI 2000** , establece seis elipses de cuatro unidades MacAdam centradas en coordenadas de cromaticidad (previamente fijadas) como tolerancia en color para las lámparas fluorescentes T8;T10; T12 y algunas CFL.

**IEC 2002**, seis elipses de cinco unidades MacAdam para lámparas fluorescentes

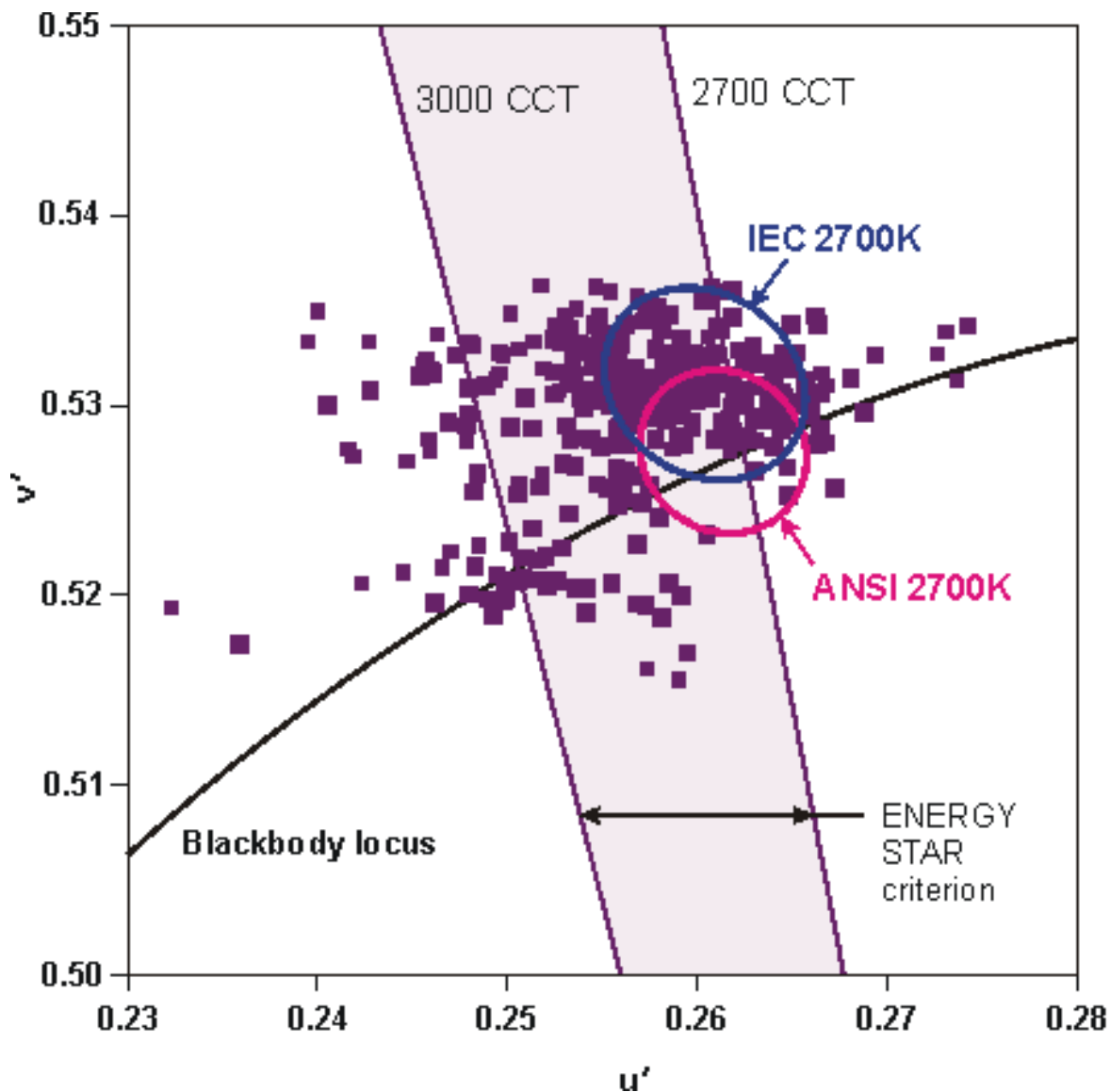


**Especificaciones ANSI de la tolerancia de color para lámparas fluorescentes**

**m.d.p. caracteriza la calidad de la diferencia de color. La tolerancia de TTC ( $\pm 300$  K) no indica nada respecto de la consistencia en color**

**Nota: de dos a cinco unidades MacAdam, es una tolerancia rigurosa**

## Coordenadas de cromaticidad de 375 lámparas CFL de diferentes fabricantes (que deben cumplir los requerimientos del programa ENERGY STAR-USA)

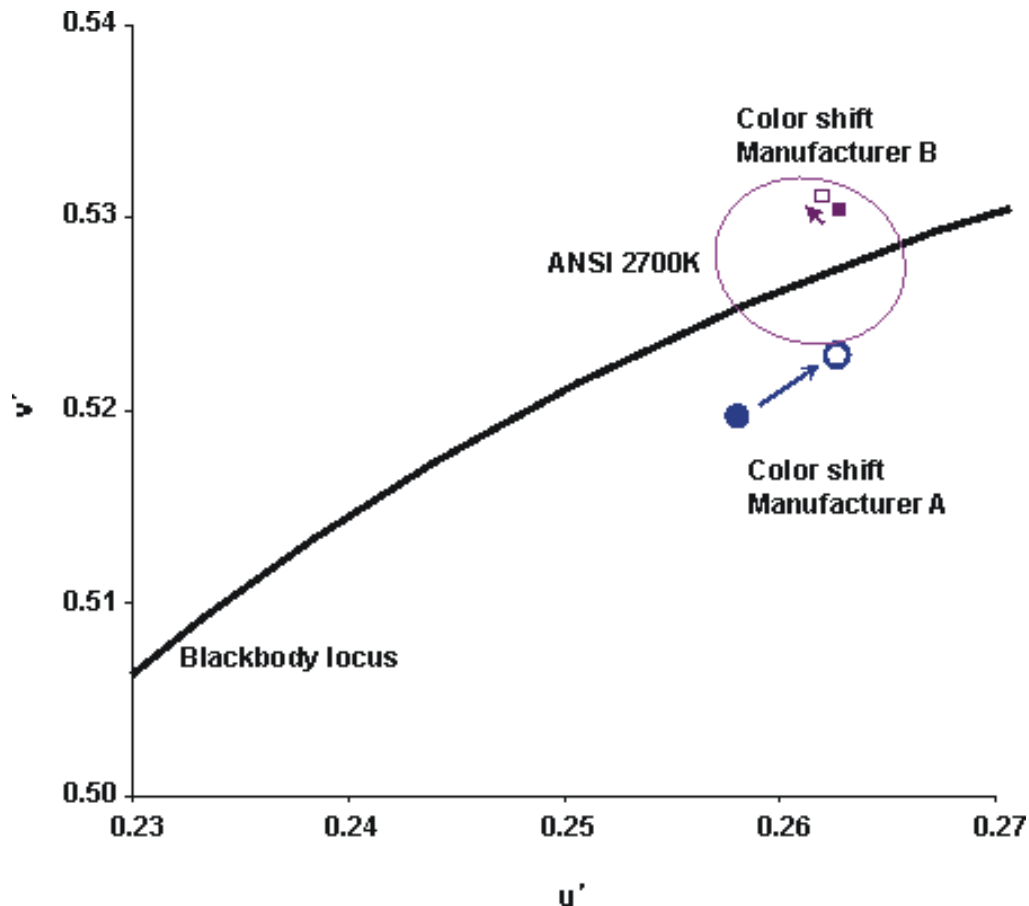


Tres factores son los responsables de la variación de cromaticidad que vemos en la figura:

- 1) Algunos fabricantes definen sus propias coordenadas de cromaticidad dentro de la Zona Energy Star.
- 2) Otros fabricantes definen diferentes coordenadas de cromaticidad para diferentes potencias. Para el mismo fabricante, y dentro del rango de TCC, una de 13W tiene una apreciable diferencia de color con una de 26W.
- 3) Finalmente, algunos fabricantes tienen mucha dificultad en controlar el color de las lámparas. Lámparas de la misma potencia y fabricante presentan notables diferencias de color.

**Estabilidad de color (color stability) :** las propiedades de color de la fuente, pueden cambiar a lo largo de su vida útil aunque hayan sido construidas cuidando los dos aspectos anteriores de TCC y constancia de color

### Estabilidad de color de lámparas CFL

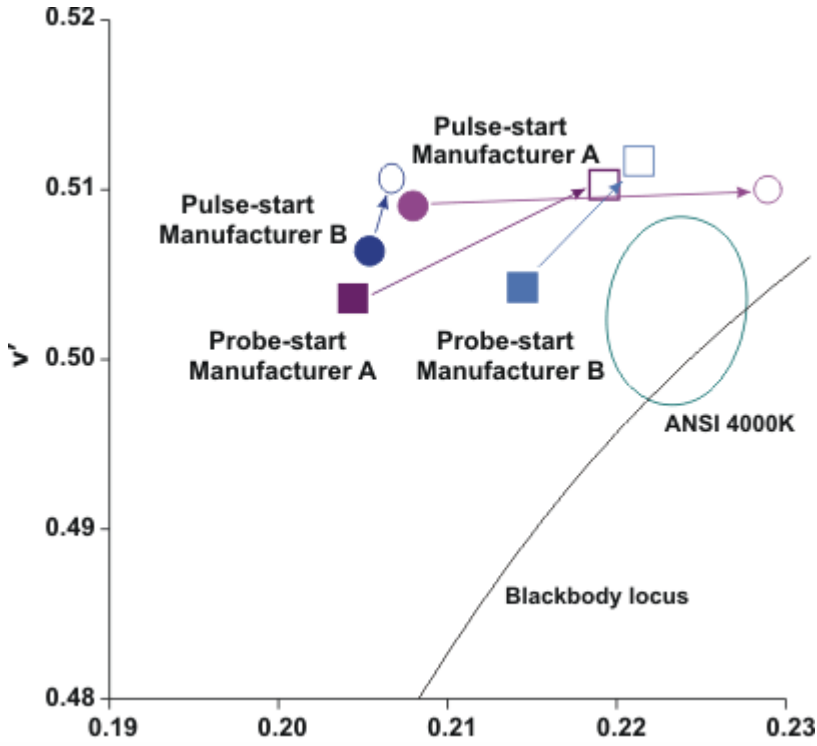


-Elegidas entre 100 lámparas producidas por 10 fabricantes medidas en los laboratorios de la NLPPIP.

-La medición de la diferencia de color se realizó entre las 100 y 2400 horas de funcionamiento. Este período representa el 40% de su vida media

-Para ambos fabricantes, el corrimiento medio de la cromaticidad es menor a las cuatro unidades de la elipse MacAdam lo que sugiere que la estabilidad de color es buena para ambas lámparas a pesar de la diferencia de desplazamiento de ambas lámparas.

# Estabilidad de color de lámparas de mercurio halogenado

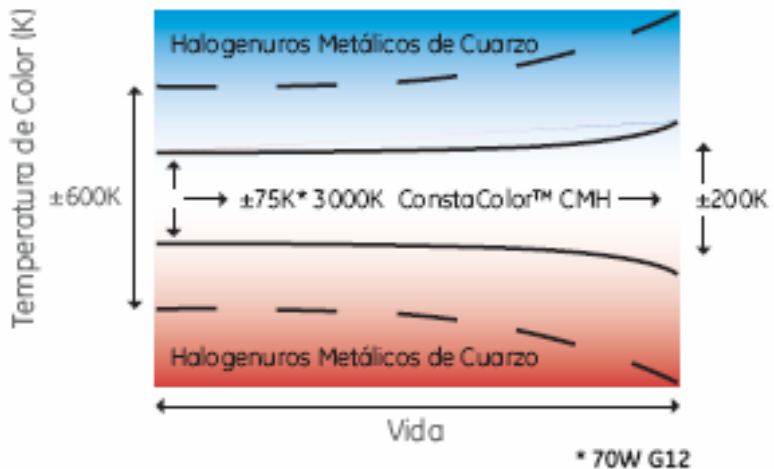


-Mediciones realizadas a las 8000 horas de funcionamiento, 40% de su vida media sobre dos fabricantes A y B.

-El corrimiento de las coordenadas de cromaticidad de ambos fabricantes es superior a las cuatro unidades MacAdam.

-La única que encuadra es la pulse start fabricante B.

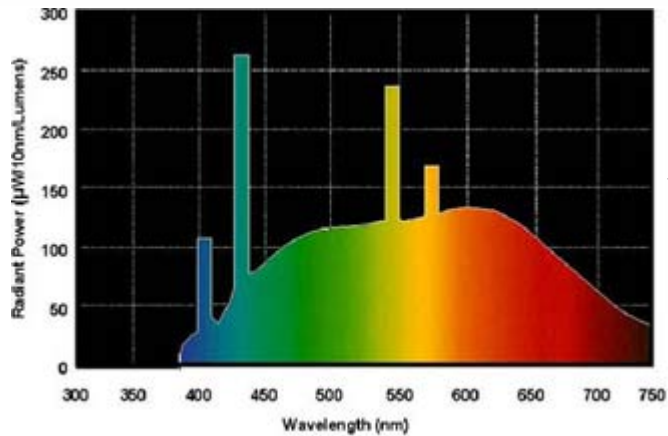
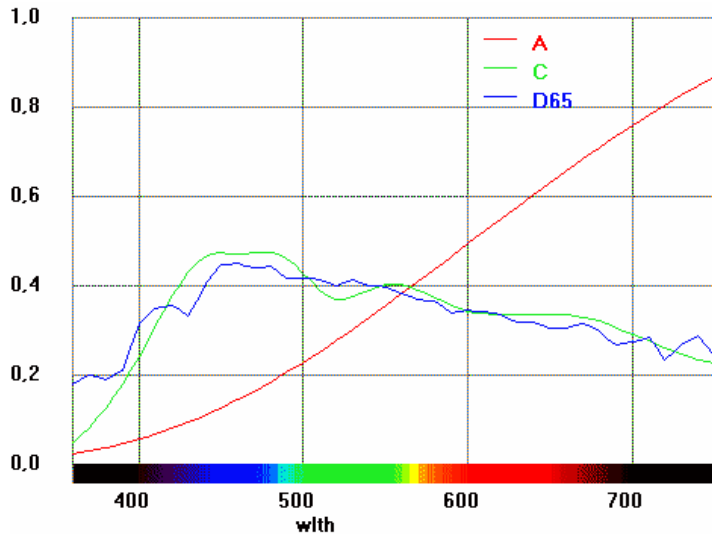
- De allí la importancia que le asignan los encuestados al tipo de lámpara a utilizar.



Las modernas lámparas de mercurio halogenado con tubo de descarga cerámico constituyen una gran solución a la estabilidad de color a lo largo de las horas de funcionamiento.

# IRC- INDICE DE REPRODUCCION CROMATICA

Illuminante de la misma TCC



$$\Phi(\lambda) = E(\lambda) \cdot R(\lambda),$$

$$X = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

$$R_a = 100 - 4,6\Delta\bar{E}a$$

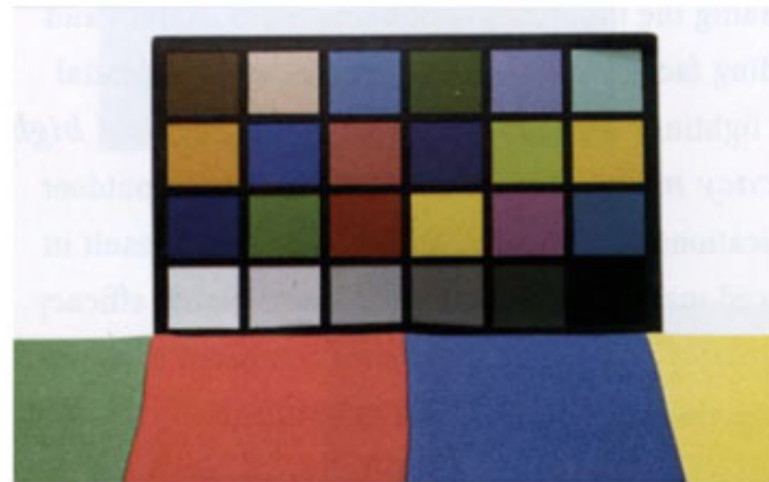
$$\Delta\bar{E}a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=8} \Delta E_i$$



## Color Rendering



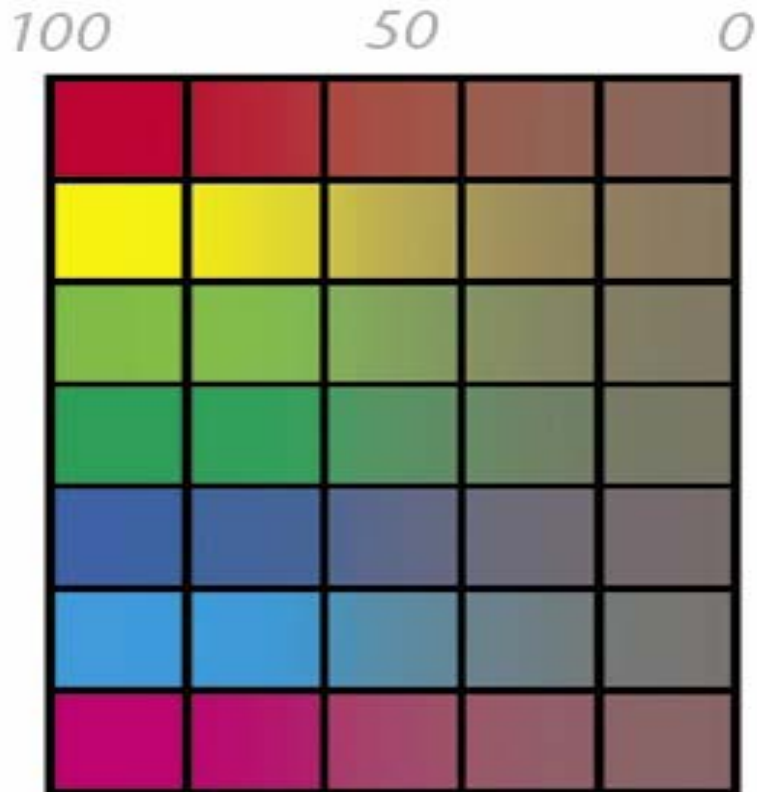
CRI 85



CRI 70

A CRI of 80 should be considered as minimum for most retail applications

# IRC



**IRC** es el único índice reconocido internacionalmente (CIE 1986,1995) y es usado universalmente por la industria.

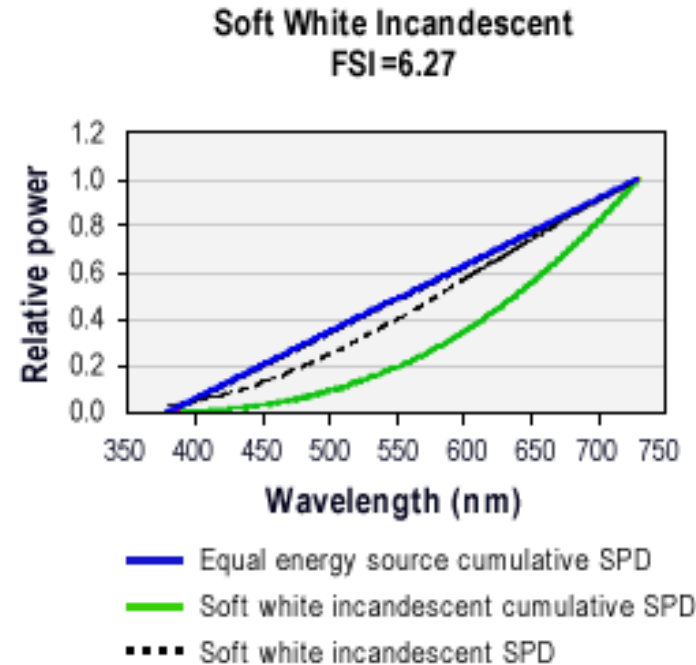
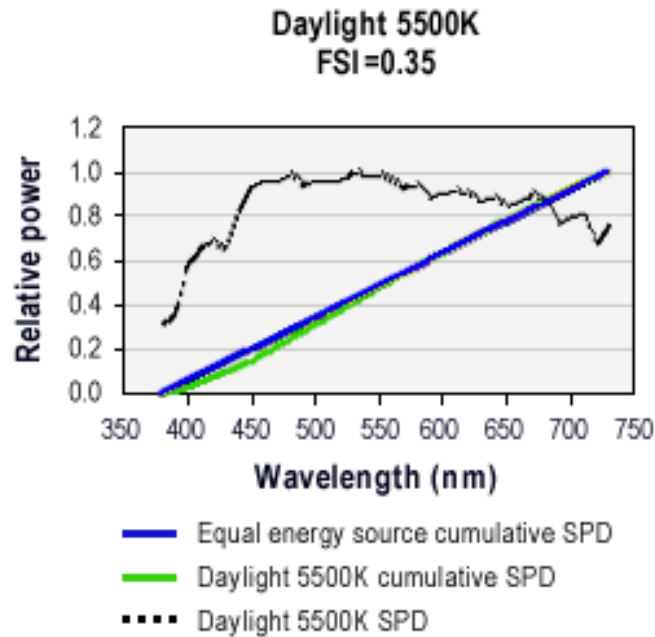
Sin embargo se han propuesto otros métodos (Guo y Houser).

Todos estos métodos, incluyendo IRC, tienen limitaciones para caracterizar los varios aspectos de la percepción del color asociada con el rendimiento en color (***vivacidad, diferenciación, naturalidad***)

Todos los métodos utilizan la distribución espectral de la fuente. Muchos, pero no todos, incorporan

uno o más iluminantes de referencia para comparar la fuente a considerar y también muchos incorporan un conjunto de muestras de color para ser iluminadas.

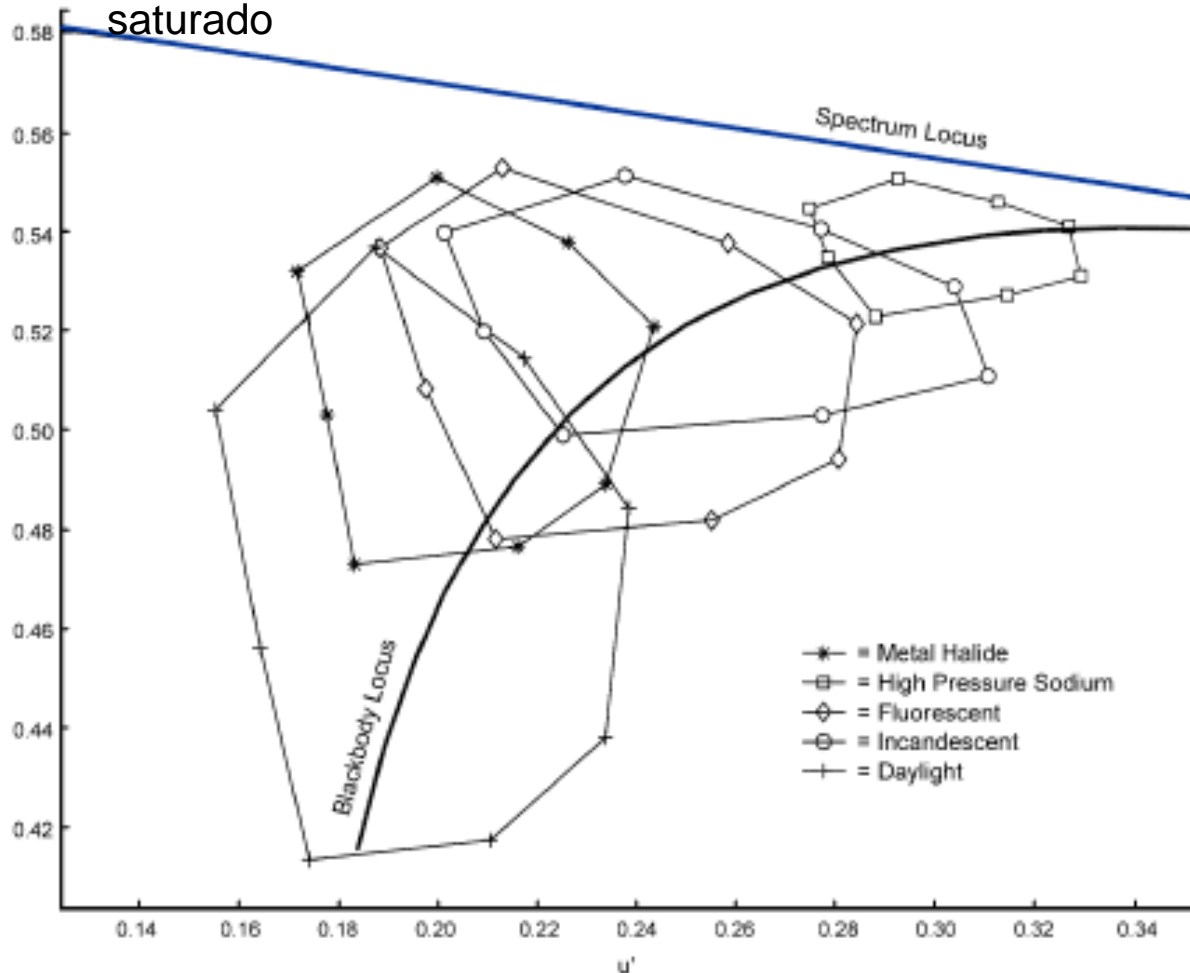
## FSI - FULL-SPECTRUM INDEX



Es una medida matemática de cuanto se desvía el espectro de una fuente de luz respecto de un espectro equienergético (NLPIP 2003). Se trata de un espectro imaginario que tiene **la misma energía radiante** entre 380 y 780 nm. Cuando el espectro de la luz se parece más al espectro ideal, menor es la desviación (Daylight 5500K). La fuente incandescente no tiene radiaciones en el azul y la desviación es mayor.

## GA - GAMUT AREA

Se define como el área abarcada por tres o más coordenadas de cromaticidad en un determinado espacio de color. Para rendimiento en color, es el área del polígono definido por las ocho coordenadas de cromaticidad de las muestras CIE (mismas del IRC) en el espacio de color CIE 1976 cuando se iluminan por una determinada fuente de luz (Boyce 2003). Cuando mayor es el área, el color de los objetos se verá más saturado



**GA** no se define en base a ningun iluminante de referencia como lo requiere el **IRC** o el **FSI**

## PROPIEDADES DE LOS INDICES EN TERMINOS GENERALES

- **Un alto valor del IRC implica que los colores se verán con un aspecto muy natural.**
- **Un bajo FSI (full-spectrum index) implica que la fuente de luz permitirá una buena discriminación entre mínimas variaciones de color.**
- **Una gran área GA (Gamut area) implica que los colores se verán bien saturados.**

Una lámpara incandescente tendrá un alto IRC y un bajo FSI porque su espectro es pobre en las longitudes de onda cortas.

IRC es pobre frente al GA para pronosticar definidas precisiones de color (Deng 2001).

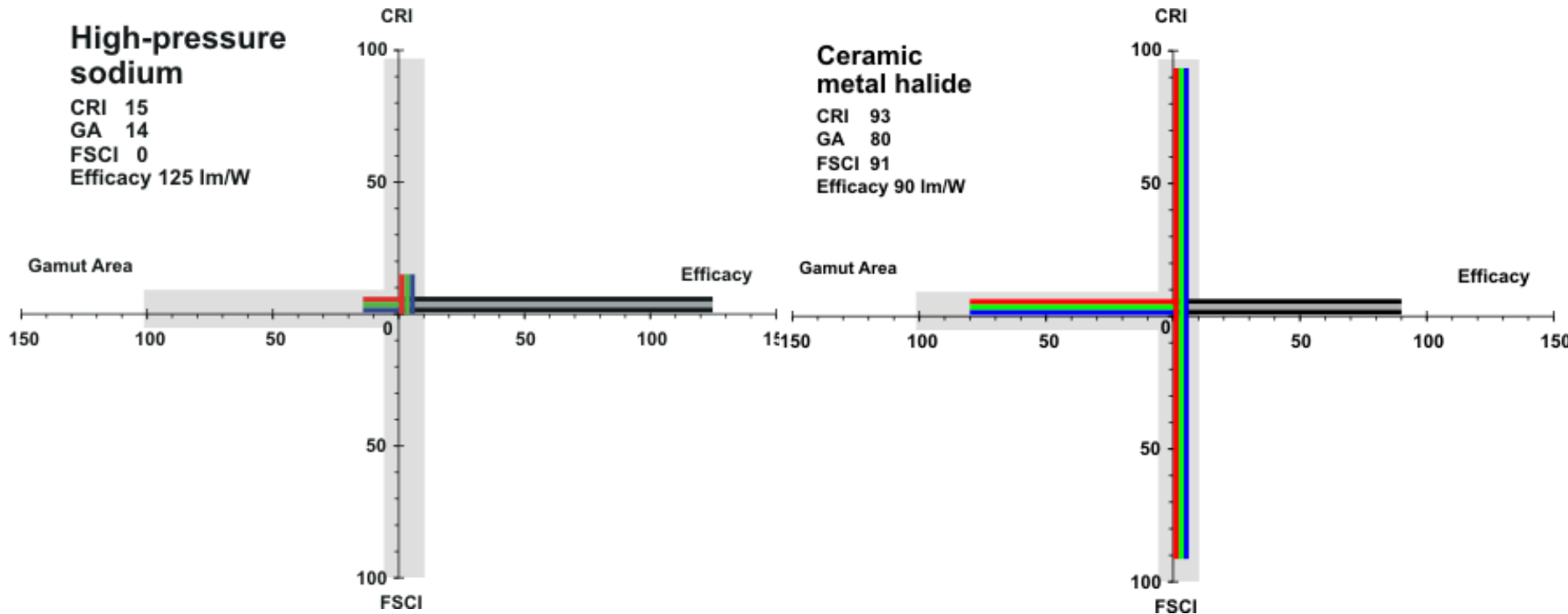
Fuentes de luz con grandes valores de GA y bajos valores de IRC son muy apreciadas en términos de preferencia de color (Narendran y Deng 2002)

**De acuerdo a la aplicación y al efecto deseado, uno de estos índices de rendimiento en color puede ser más apropiado que el otro.:**

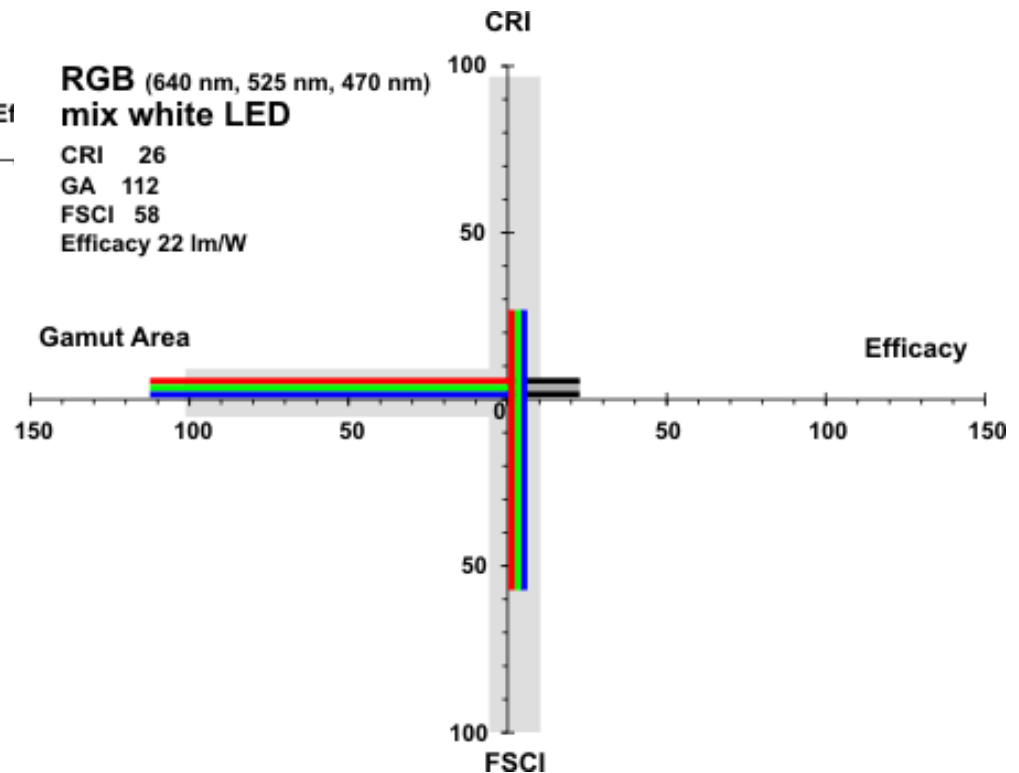
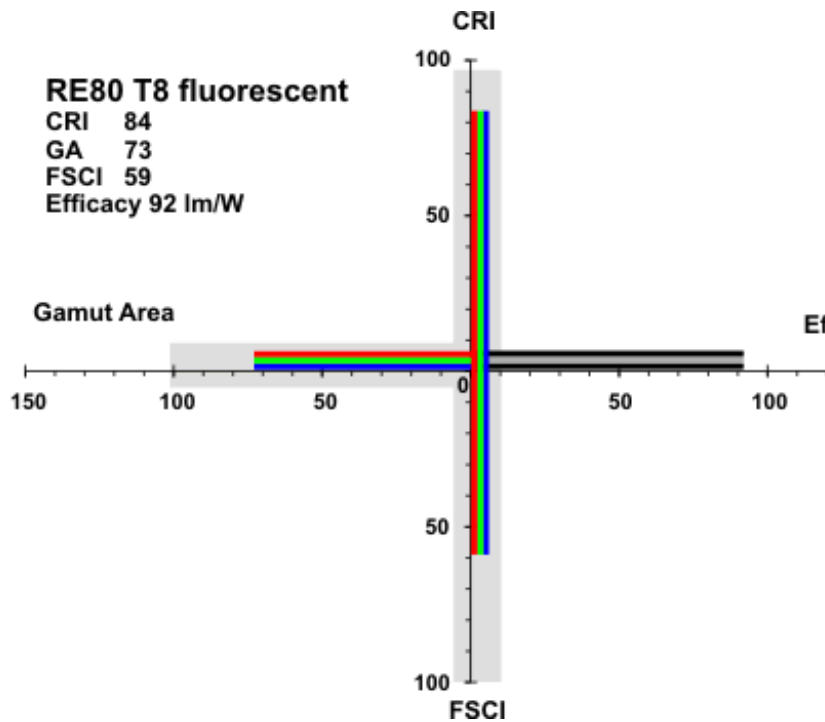
**En alumbrado residencial el IRC será una medida más relevante mientras que el GA será más apropiado para destacar los colores de los alimentos en un supermercado.**

**NLPIP recomienda utilizar los tres valores para seleccionar la fuente más adecuada de acuerdo a lo deseado en los aspectos cromáticos del proyecto.**

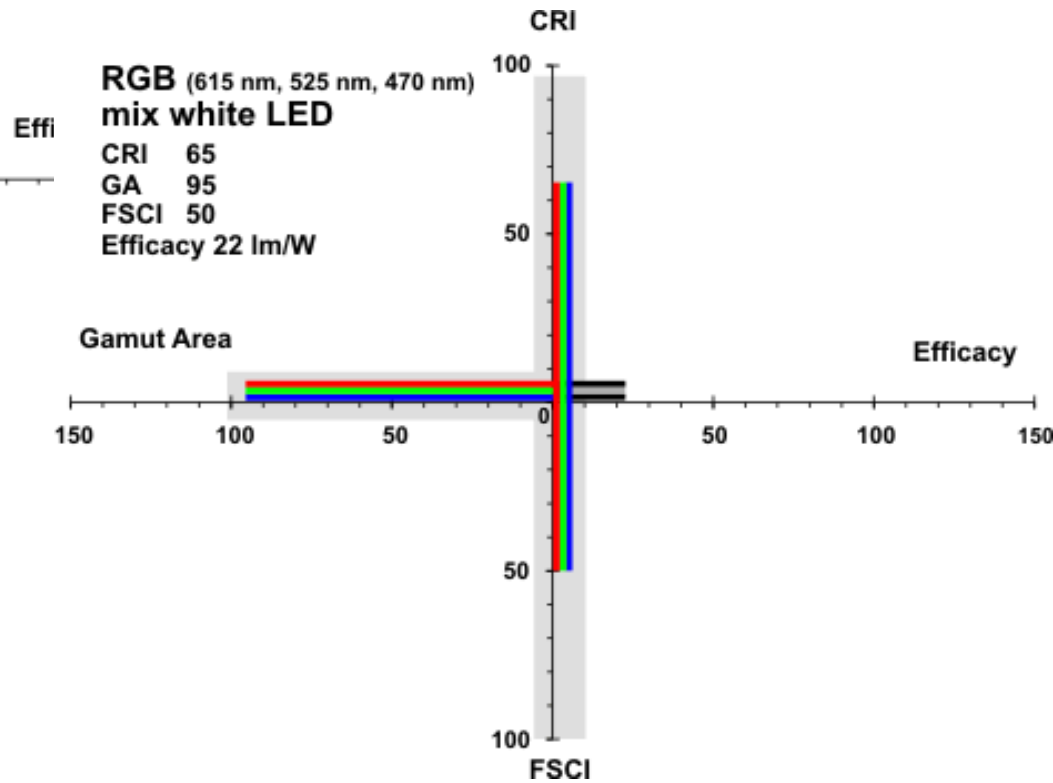
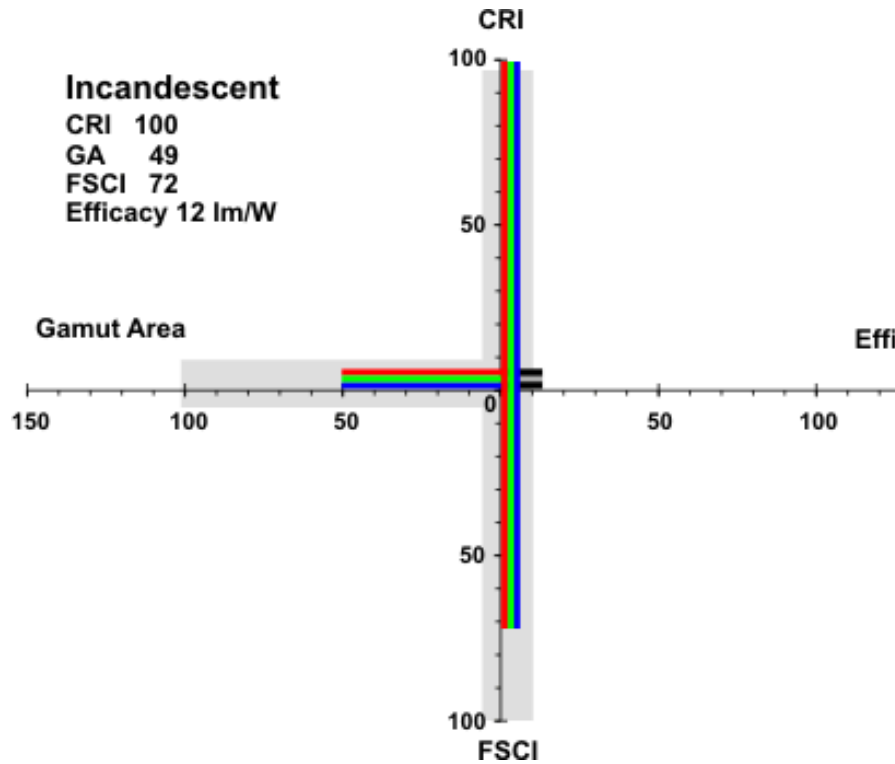
# CARACTERISTICAS DE COLOR DE VARIAS FUENTES DE LUZ



# CARACTERISTICAS DE COLOR DE VARIAS FUENTES DE LUZ



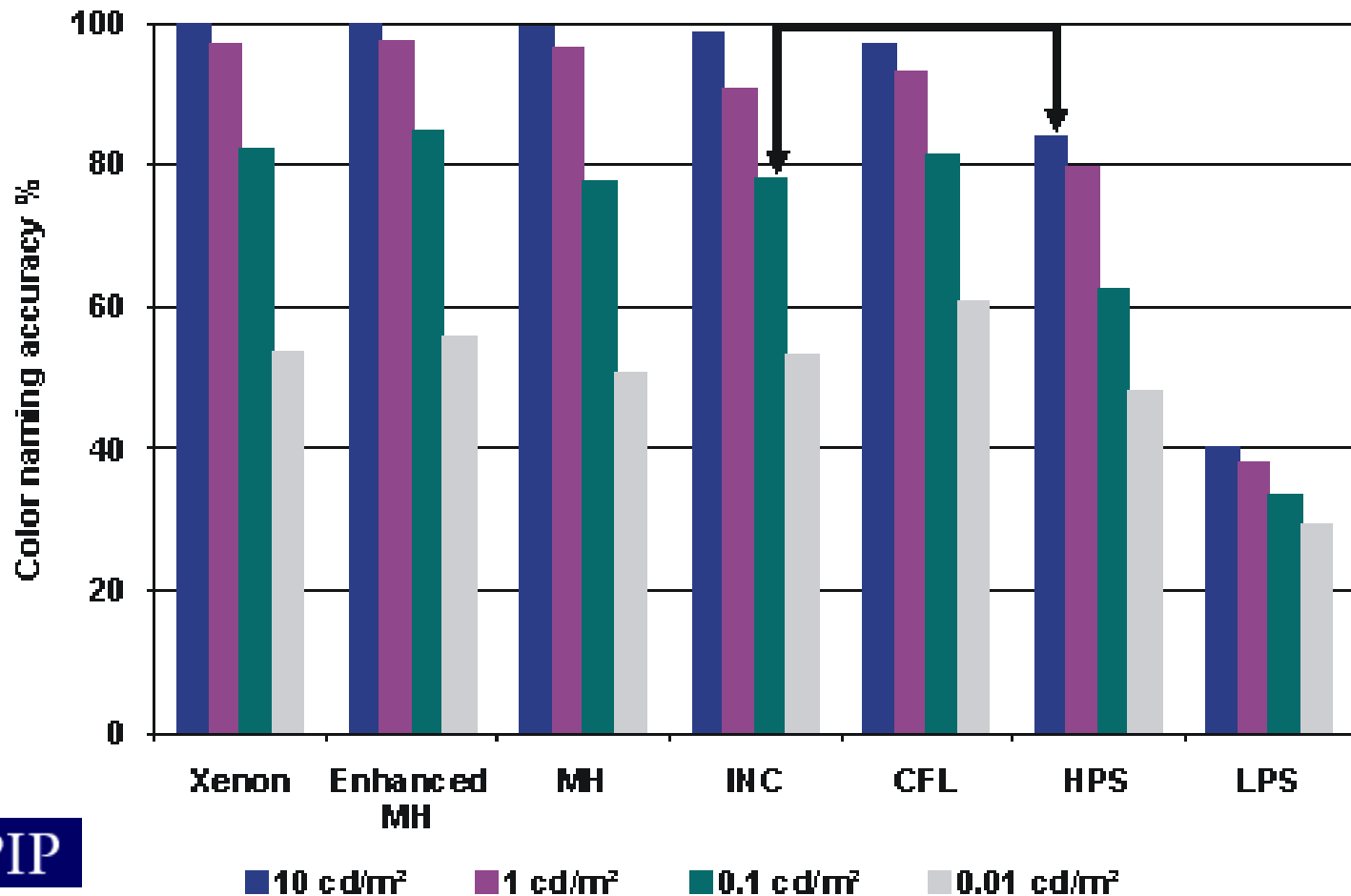
# CARACTERISTICAS DE COLOR DE VARIAS FUENTES DE LUZ



# Relación entre rendimiento en color y niveles de luminancia

Ambos valores son cruciales en la percepción del color

Una lámpara incandescente con IRC = 100 distorsiona más a 0,1 cd/m<sup>2</sup> que una SAP(HPS) con IRC = 22 a 10 cd/m<sup>2</sup> ( Deng et al. 2004)





*Muchas Gracias*

Lighting  
Research Center