

La Cámara CCD como Detector en Espectrorradiometría: Medición de las Coordenadas Cromáticas x,y,z de muestras de Colores

A.J. Cabello[‡], J.L. González Vizmanos^{*}, C.F. Kirschbaum[‡]

[‡] Instituto de Luminotecnia, Luz y Visión "Ing. Herberto C. Bühler"
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología- Universidad Nacional de Tucumán
- Av. Independencia 1800 - 4000 Tucumán
e-mail: ilum@herrera.unt.edu.ar

^{*} Departamento de Optica, Facultad de Ciencias
Universidad de Valladolid -47071-Valladolid, España
e-mail: vizma@hp9000.cpd.uva.es

Resumen

El propósito de este trabajo consiste en verificar la factibilidad del uso de una cámara CCD como detector en espectrorradiometría. En tal sentido, se determinaron las coordenadas cromáticas x,y,z por medio de dos metodologías: por un lado la correspondiente a un sistema experimental constituido por un espectrorradiómetro y una cámara CCD, y por otra parte mediante el uso de un colorímetro convencional con filtros triestímulos.

Se obtiene en primer lugar la distribución espectral de flujo radiante $R(\lambda)$ empleando una cámara CCD como detector situado en la ranura de salida del monocromador. De esa forma se obtienen las imágenes del estímulo luminoso correspondientes a longitudes de onda seleccionadas dentro de un determinado rango. A partir de estos resultados, podemos calcular x, y, z.

En segundo término, se obtuvieron dichas coordenadas utilizando el colorímetro mencionado precedentemente.

En ambos casos, como muestras de referencia de color se dispuso de un conjunto de siete colores proporcionados por el muestrario "KODAK® Color Control Patches" de amplio uso en fotografía.

Se efectuó una comparación de los resultados correspondientes a cada método, arrojando como resultado que la desviación no es mayor que el 5%.

Abstract

The aim of this entire project is to check and verify the factibility of the use of the CCD camera as a detector in spectroradiometric measurements. Within such frame, the present paper inform about a specific colorimetric application: the chromaticity coordinates x, y, z are calculated by mean of two different methodologic ways: in one hand, that corresponding to an experimental system constituted by a spectroradiometer and a CCD camera; in the other, a colorimeter based on a set of three color filters.

First, the radiant flux spectral distribution $R(\lambda)$ are obtained, employing a CCD camera as a detector located at the output slit of the monochromator. In that manner, the images of the luminous stimulus corresponding to selected wavelengths within a specific range are recorded. From this results, we were able to calculate x, y, z.

Second, an equivalent set of values were obtained using an above mentioned colorimeter.

As reference color samples, a set of seven color targets taked from the "KODAK Color Control Patches" catalogue widely applicated in photography was used in both cases.

The results corresponding to each method were compared, the resulting deviation being no grater than 5% in the whole range.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los métodos más usuales de medición de colores están basados en el uso de conjuntos de filtros de color. Los detectores conectados a estos filtros poseen una respuesta espectral conforme a las funciones triestímulo definidas por la CIE, las cuales, conjuntamente con una adecuada normalización de la respuesta nos proporcionan las coordenadas cromáticas de una muestra dada. Las coordenadas cromáticas se definen así^[1]:

$$\begin{aligned}x &= X/(X+Y+Z) \\y &= Y/(X+Y+Z) \\z &= Z/(X+Y+Z)\end{aligned}\quad (1)$$

donde X,Y,Z, son las componentes cromáticas de la muestra.

Por otra parte, las componentes cromáticas se definen de la siguiente manera^[1]:

$$\begin{aligned}X &= \int_{\lambda} R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\Y &= \int_{\lambda} R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\Z &= \int_{\lambda} R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda\end{aligned}\quad (2)$$

donde $R(\lambda)$ representa the la distribución espectral de una fuente; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ son los *coeficientes de distribución* o funciones de igualación del Sistema CIE-1931 de color. Estos coeficientes se encuentran tabulados (ver figura 1).

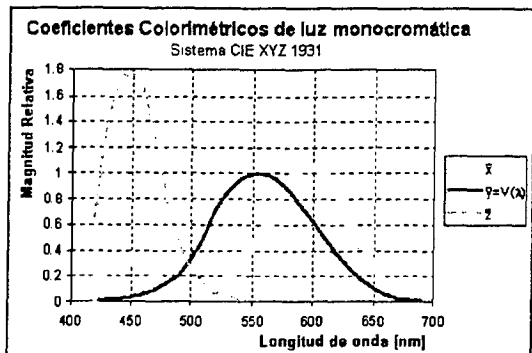


Figura 1. Curvas correspondientes a los coeficientes de distribución del Sistema de Color CIE-XYZ 1931.

La otra técnica empleada para la determinación de X,Y,Z surge a partir de las expresiones (2), o sea consiste en la determinación de la distribución $R(\lambda)$ mediante un espectrorradiómetro, que básicamente es un conjunto monocromador-detector y que mide cantidades radiométricas en función de la longitud de onda, permitiendo la determinación de la distribución de energía radiante espectral de estímulos luminosos. Una vez determinada la distribución $R(\lambda)$ con este sistema, se resuelven las integrales (2).

El objetivo de esta experiencia es verificar las cualidades de una cámara CCD como detector radiométrico, cuando se instala en la rendija de salida de un monocromador para el registro de las imágenes del estímulo luminoso correspondientes a longitudes de ondas seleccionadas dentro de un determinado rango, lo que permite la obtención de $R(\lambda)$ y el consiguiente cálculo de X,Y,Z. Estos valores se comparan con los obtenidos mediante un colorímetro de filtros triestímulos y se evalúa la efectividad del uso de la cámara CCD en el método con espectrorradiómetro.

II. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

Como muestras de referencia de color se dispuso de un conjunto de siete colores proporcionados por el muestrario "KODAK® Color Control Patches"^[4] de amplio uso en fotografía. Los siete colores utilizados fueron el azul, cian, verde, amarillo, rojo, magenta y blanco, y denominados BLUE, CYAN, GREEN, YELLOW, RED, MAGENTA Y WHITE respectivamente por KODAK®.

Cada muestra se coloca sobre un soporte montado en banco fotométrico a una distancia de 0,8 metros entre la muestra y la rendija de entrada al monocromador. En el camino óptico se coloca un diafragma regulable para el control de la intensidad del estímulo incidente, además de una lente con focal $f=12,5\text{cm}$ y cuya función es la de formar la imagen del estímulo luminoso de tal modo que

se cubra con luz la rendija de entrada en forma homogénea. A 30 cm de la muestra y formando un ángulo de 45° respecto del eje óptico, se encuentra la fuente luminosa, consistente de una lámpara incandescente halogenada con reflector dicróico, de 50w y 12v, con temperatura color de 3000°K (ver figura 2).

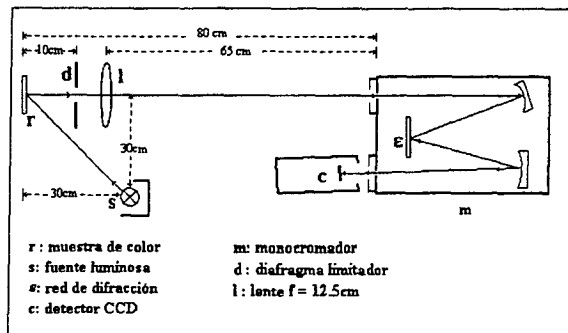


Figura 2.-Disposición en planta del montaje de los componentes de la experiencia.

Previo al montaje de la muestra de color se efectuó la medición de la distribución espectral relativa de la energía radiante de la fuente luminosa, denominada $S(\lambda)$ y que puede observarse en la figura 3.

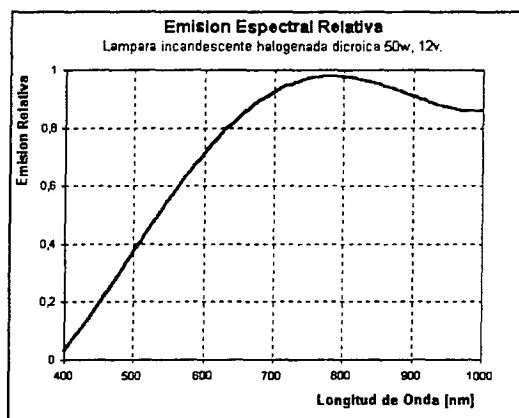


Figura 3.-Emisión espectral relativa del iluminante empleado, también denominado factor de emisión espectral $S(\lambda)$.

En la trayectoria del camino recorrido por la radiación luminosa, comprendida entre la fuente y el dispositivo de medición, en este caso el CCD, se encuentra el monocromador marca ORIEL modelo 77200 que posee un red de difracción modelo 77233 1/4 con 1200 surcos/mm, y que posee una *eficiencia espectral relativa* $\epsilon(\lambda)$ que se muestra en la figura 4.

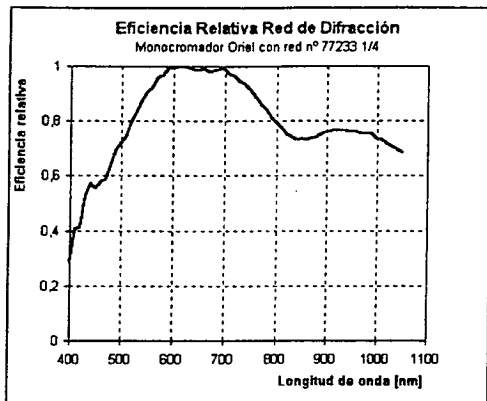


Figura 4.- Curva que representa el factor de eficiencia espectral relativa $\epsilon(\lambda)$ de la red de difracción montada en el monocromador ORIEL.

Video cámara de estado sólido empleada

Se utilizó una video cámara CCD B/W fabricada por PULNIX® America Inc., modelo TM-765, de resolución 756 (H) x 581 (V) con área sensible de 8.4 mm x 6.4mm^[3].

La señal analógica de la video cámara es transformada en una imagen digitalizada por medio de una placa digitalizadora, la cual se encuentra instalada en una PC /AT-486DX, HP Vectra RS / 20C, IBM compatible donde además se encuentra instalado el software de manejo de la tarjeta digitalizadora y el software MATROX de procesamiento de imágenes

La respuesta espectral $C(\lambda)$ de la cámara CCD utilizada se determinó en una experiencia previa y se puede observar en la figura 5.

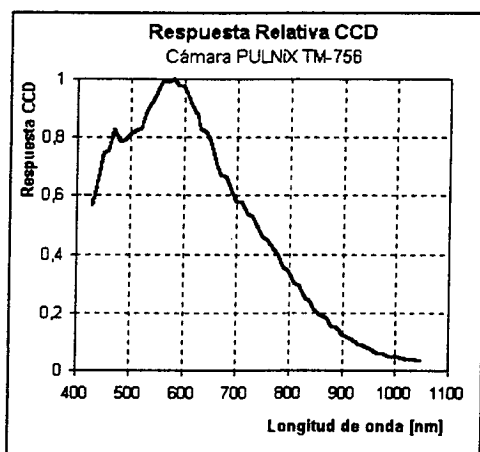


Figura 4.- Curva de la respuesta espectral relativa $C(\lambda)$ de la cámara CCD utilizada.

Procedimiento de medición

Primero se deben efectuar compensaciones en caso de variaciones debidas a la "corriente oscura" o sea el nivel de corriente en ausencia de luz en el detector. La "corriente oscura" medida en el detector CCD se refiere a la luminosidad de la imagen adquirida cuando no incide luz en el detector. Esta corriente se incrementará al aumentar la temperatura del detector. Los valores de

Offset y Ganancia de la tarjeta digitalizadora podrían ajustarse de tal manera que todos los pixels tengan una luminosidad por encima de cero, en el rango de temperaturas y tiempos de exposición para los cuales se utilizará la cámara^[6].

A continuación se procede a adquirir imágenes colocando la CCD (sin su sistema de lentes) sobre la rendija de salida del monocromador, para diferentes longitudes de onda, desde 400 nm hasta 700 nm, cada 10 nm. Esta secuencia se repite luego para cada una de las restantes muestras de color.

Por último, de cada imagen adquirida obtenemos un nivel de gris promedio del área de la rendija de salida. Con estos valores dibujamos una distribución espectral de niveles de gris para cada muestra, denominada $M(\lambda)$.

Determinación de la respuesta espectral $R(\lambda)$ de una muestra de color

La respuesta del sistema fuente-muestra-monocromador-detector, medida en niveles de gris, es de la siguiente forma:

$$M(\lambda) = S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot C(\lambda) \quad (3)$$

donde:

$S(\lambda)$ es la distribución espectral de la fuente,
 $R(\lambda)$ es la distribución de niveles de gris obtenidos a distintos λ para cada muestra de color,
 $C(\lambda)$ es la respuesta espectral de la cámara CCD y
 $\epsilon(\lambda)$ es la eficiencia de la red.

por lo tanto la distribución espectral de la radiación luminosa reflejada por la muestra de color se puede obtener haciendo:

$$R(\lambda) = M(\lambda) / [S(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot C(\lambda)] \quad (4)$$

Se obtiene una curva para cada muestra en unidades equivalentes a niveles de gris, que se pueden apreciar en la figura 6.

Con el objeto de resolver las integrales (2), se normaliza cada una de las distribuciones $R(\lambda)$ respecto de su valor máximo, obteniéndose así la distribución espectral relativa $R(\lambda)$ de cada una de las muestras de color empleadas (ver figura 7).

III. RESULTADOS OBTENIDOS

Componentes Cromáticas obtenidas con Colorímetro de Filtros triestímulos

Se utilizó como colorímetro un fotómetro fotoeléctrico de reflectancia (difusa) marca CARL ZEISS modelo ELREPHO número de serie 52501.

Las mediciones hechas con los tres filtros especiales del colorímetro se usaron para el cálculo de las componentes cromáticas. Los resultados se muestran en la tabla I.

Las componentes cromáticas X, Y y Z se calcularon con la ayuda de las siguientes fórmulas, válidas para un iluminante estándar C de la CIE:

$$Z = 1.181 R_z \quad (5c)$$

$$X = 0.782 R_x + 0.198 R_z \quad (5a)$$

Por último, y mediante la aplicación de las relaciones (1) obtenemos las coordenadas cromáticas x,y, z. Estos resultados se muestran en tabla II.

$$Y = R_y \quad (5b)$$

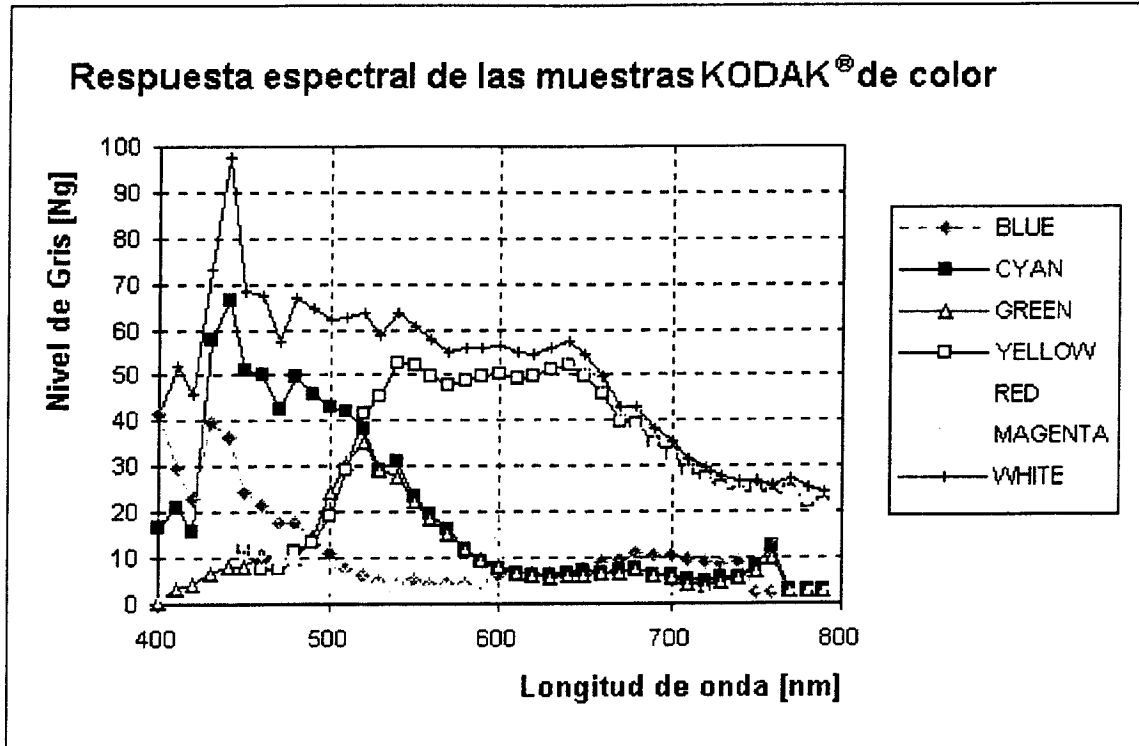


Figura 6.- Distribución espectral $R(\lambda)$ de cada una de las muestras de colores KODAK®.

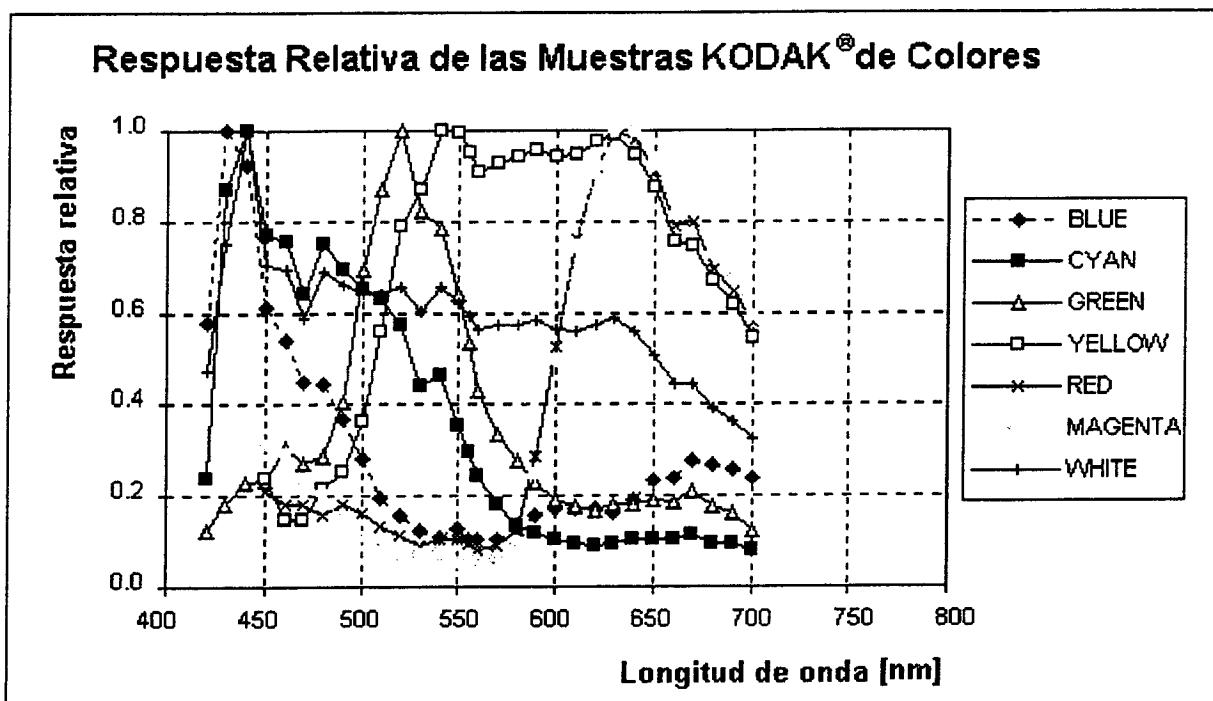


Figura 7.- Distribución espectral relativa de las muestras

TABLA I: GRADO DE REFLEXIÓN DIFUSA DE LAS MUESTRAS, POR FILTRO Y COLOR.

Color Muestra	Grado de Reflectancia Difusa[%]		
	R_x (filtro FMX/C)	R_y (filtro FMY/C)	R_z (filtro FMZ/C)
BLUE	9.40	8.75	19.65
CYAN	14.15	27.35	53.20
GREEN	15.40	23.20	10.85
YELLOW	68.50	58.00	8.10
RED	33.10	17.15	8.20
MAGENTA	29.40	13.80	10.50
WHITE	91.50	90.60	85.80

TABLA II: COORDENADAS Y COMPONENTES TRICROMÁTICAS DE LAS SIETE MUESTRAS EVALUADAS.

Color Muestra	Componentes Tricromáticas			Coordenadas Tricromáticas		
	X [%]	Y [%]	Z [%]	x [-]	y [-]	z [-]
BLUE	11.241	8.75	23.207	0.260	0.202	0.537
CYAN	21.599	27.35	62.829	0.193	0.245	0.562
GREEN	14.191	23.20	12.814	0.283	0.462	0.255
YELLOW	55.171	58.00	9.566	0.449	0.472	0.078
RED	27.508	17.15	9.684	0.506	0.316	0.178
MAGENTA	25.070	13.80	12.400	0.489	0.269	0.242
WHITE	88.541	90.60	101.330	0.316	0.323	0.361

Obtención de las Componentes Tricromáticas con el método del Espectroradiómetro con CCD

Con este método se obtienen las componentes colorimétricas a partir del cálculo de cada una mediante las integrales (2). En la práctica se resuelve calculando la sumatoria de los sucesivos productos $R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$, comenzando con el primer término correspondiente a $\lambda=420\text{nm}$, y el último para $\lambda=700\text{nm}$. Se repite este procedimiento para obtener las componentes Y y Z.

IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En tabla III se pueden apreciar los resultados correspondientes a cada uno de los métodos empleados.

Tomando como base de comparación la diferencia porcentual del método propuesto respecto del convencional, existe un buen ajuste de los resultados. Con excepción de las muestras BLUE y MAGENTA, la diferencia porcentual no supera el $\pm 5\%$. En el caso de la muestra BLUE, quizás se deba a la absorción de los azules por parte de los cristales intercalados en la marcha de los rayos luminosos. En el caso de la muestra MAGENTA, la mayor diferencia porcentual posiblemente se deba a defectos de impresión observados en la muestra.

TABLA III: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON: MÉTODO A: COLORÍMETRO CON FILTROS TRIESTÍMULOS; MÉTODO B: ESPECTRORRADIÓMETRO CON CÁMARA CCD

Color Muestra	Coordenada x		Coordenada y		Coordenada z	
	Método A	Método B	Método A	Método B	Método A	Método B
BLUE	0.26	0.24	0.20	0.17	0.54	0.59
CYAN	0.19	0.20	0.24	0.25	0.56	0.54
GREEN	0.28	0.27	0.46	0.48	0.25	0.24
YELLOW	0.45	0.44	0.47	0.49	0.08	0.07
RED	0.51	0.53	0.32	0.33	0.18	0.14
MAGENTA	0.49	0.52	0.29	0.24	0.24	0.19
WHITE	0.32	0.31	0.32	0.33	0.36	0.36

V. CONCLUSIONES

Aunque con ambas metodologías se puede determinar el color de una muestra, los valores obtenidos con el espectrorradiómetro se consideran más confiables. Esto se debe a que con el espectrorradiómetro el cálculo de las componentes y coordenadas cromáticas es exacto (si están perfectamente establecidas las distribuciones espectrales del iluminante y la muestra), mientras que con un colorímetro, tanto el iluminante como las funciones de igualación se intentan imitar con filtros y plantillas; imitación no siempre perfecta^[7].

La utilización de una cámara CCD en lugar de un detector convencional permite la obtención de valores confiables en mediciones colorimétricas. Por ahora, la principal desventaja de esta alternativa, reside en la lentitud de la adquisición de la magnitud relevante dado que debe hacerse un barrido manual del rango útil de longitudes de onda, a diferencia del colorímetro, que permite obtener rápidamente las coordenadas, aunque sin brindar ningún tipo de información acerca de la distribución espectral de la muestra. En ese sentido la alternativa con espectrorradiómetro ofrece una mayor información, siendo ésta su principal ventaja.

Con esta información además es posible obtener fácilmente otras magnitudes relevantes como por ejemplo el Índice de Respuesta al Color, Temperatura Color, etc.

VI. VERIFICACIÓN PRÁCTICA DE LOS RESULTADOS

Se efectúa un análisis de las respuestas espectrales obtenidas en base al *Método Sustractivo de Reproducción del Color*, utilizado en fotografía, imprenta y pintura^[7].

En el mencionado proceso sustractivo de reproducción de un color, el mecanismo básico es la *absorción* de los pigmentos *cyan*, *amarillo* y *magenta*, que actúan como primarios ideales en las mezclas sustractivas.

Como ejemplo de lo antedicho si se considera un *Filtro Cyan*, significa que el material absorbe el rojo y deja pasar el azul y el verde. En forma análoga un *Filtro Magenta* es un material que absorbe el verde y deja pasar el azul y el rojo. En las siguientes figuras, 8 y 9, se han representado estas situaciones. Por ejemplo, en el caso del filtro magenta (figura 9), se representa la respuesta correspondiente a MAGENTA, la que se compara con la curva resultante de efectuar la suma (BLUE + RED), mostrando esta última un comportamiento análogo al de un *Filtro Magenta*; verificándose la teoría en lo que respecta a la tendencia de dicha curva. El ajuste no es perfecto dado que un material real, magenta en este caso, no sólo absorbe el verde, sino también una gama de longitudes de onda próximas al valor teórico. Lo mismo se puede decir de las longitudes de onda que refleja. Además se deben tener en cuenta las limitaciones de montaje de la experiencia ya mencionadas.

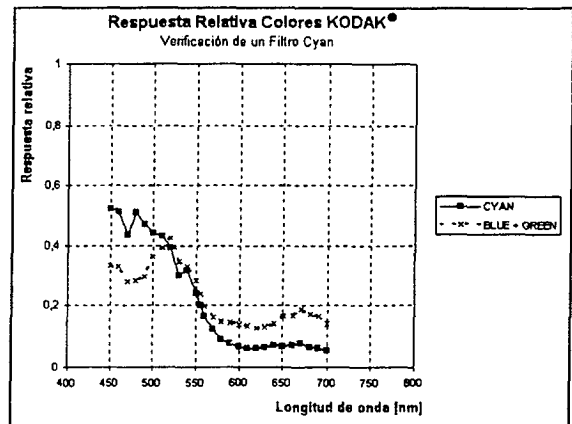


Figura 8.- Resultado de la verificación de un Filtro Cyan.

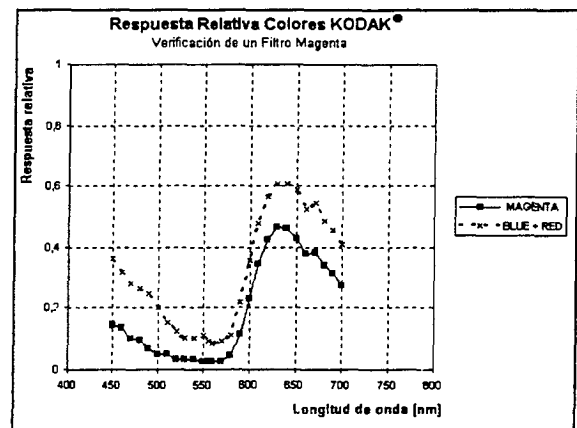


Figura 9.- Resultado de la verificación de un Filtro Magenta.

Agradecimientos

Al Lic. Luis M. Fuentes García, del Dpto. de Optica de la Fac. de Ciencias de la Univ. de Valladolid, por la valiosa colaboración en la preparación del equipamiento y asesoramiento.

Este trabajo fué posible gracias a una pasantía financiada por el FOMEC, y efectivizada por el primer autor en el Dpto. de Optica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid, España, desde el 08/02/96 hasta el 31/05/96.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - McCluney R. 1994. Introduction to Radiometry and Photometry. Artech House, Boston. chap.11, pg.356.
- 2 - Rea M.S., Jeffrey I.G. *Journal of the IES*: 64-72. (1990)
- 3- Dereniak E.L., Crowe D.G. 1984. Optical Radiation Detectors. John Wiley & Sons: chap.9, pg.186.
- 4 - KODAK. Color Separation Guides and Gray Scale. Kodak Publication N°Q-14, Rochester, New York.
- 5 - Fuentes García, L.M. Octubre 1991. Analisis Semiautomatico de Luminancias en Escenas Complejas: Dispositivo y calibrado". Reporte del Departamento de Fisica Aplicada III, Fac. de Ciencias, Universidad de Valladolid, España.
- 6 - Cabello A., Gor S., Sandoval J. La Camara CCD como Sensor Fotometrico. Póster presentado en el 3° Congreso Panamericano de Iluminación - III LUX AMERICA '95 desde el 8 al 11/11/1995, Montevideo, Uruguay.
- 7 - Artigas J.M., Capilla P., Felipe A., Pujol J. 1995. Optica Fisiologica. Psicofisica de la Vision, Interamericana McGraw-Hill, Madrid: chap.C3, pg. 551- 553, 561.