

Conversión de un conjunto de imágenes multispectrales a un sistema RGB

J.C. Conde-Acevedo* and J.J. Báez-Rojas

Coordinación de óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Apartado postal 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., Mexico

e-mail: jconde@susu.inaoep.mx, jbaez@inaoep.mx

Recibido el 28 de enero de 1999; aceptado el 1 de octubre de 1999

El objetivo de este trabajo es describir una técnica para representar un conjunto de n imágenes digitales cuasi-monocromáticas o imágenes multi-espectrales mediante un modelo tradicional de color RGB. Para desarrollar este modelo, hemos utilizado treinta y dos imágenes digitales cuasi-monocromáticas en conjunción con las funciones estándar para la igualación de color (*color-matching functions*). Las imágenes digitales se obtuvieron con treinta y dos filtros ópticos, los cuales se encuentran caracterizados a lo largo del espectro visible por una función de transferencia de banda delgada (aproximadamente 20 nm.).

Descripciones: Valores triestímulos; funciones *color-matching*; imágenes multi-espectrales; estímulos metaméricos

The purpose of this work is to describe a technique to represent a set of n quasi-monochromatic digital images, also called multi-spectral images, by a customary system RGB of color. To develop this color model, we have used thirty-two multi-spectral digital images and the color matching functions. The set of digital images was obtained by using thirty-two optic filters, these filters are characterized along with the visible spectrum by narrow-band transference functions (20 nm approximately).

Keywords: Tristimulus values; color-matching functions; multi-spectral images; metameric stimuli

PACS: 42.66.Ne

1. Introducción

El color juega un papel importante en la determinación del estado, calidad y características de objetos tales como frutas, granos alimenticios, materiales y objetos construidos por el hombre. En el intervalo de la luz visible existe información que puede ser procesada y a partir de ésta clasificar objetos; en el caso de las frutas, tanto el color, como la forma y el tamaño son características que se toman en cuenta para poderlas clasificar como de alta, mediana o baja calidad. La clasificación de los objetos por medio de sus características de color se hace normalmente con luz visible; clasificar los objetos con otro tipo de radiación diferente de la luz visible genera la posibilidad de contaminarlos. Las imágenes multispectrales se obtienen al dividir el espectro visible en un gran número de intervalos, en cada uno de estos intervalos se diseña y construye un filtro. En aplicaciones donde se consideran las características de color de los objetos, una cámara blanco y negro puede ocultar estas últimas. La principal ventaja al aumentar el número de filtros utilizados es que se puede mejorar el discernimiento de las diferentes zonas de color del objeto. Una de las características de estos filtros es que sus distribuciones espectrales deberán tener un área de traslape significativa, de tal manera que las imágenes que se obtengan tengan una alta correlación entre ellas. La correlación entre las imágenes se usará para obtener la información perdida debido a la función de transferencia intrínseca de cada uno de los filtros. Nuestro propósito al desarrollar este trabajo es la conjunción de las imágenes multispectrales y la transformación de este modelo en un sistema RGB que permita desplegar en color la imagen original del objeto, utilizando

sistemas de desplegado comercialmente disponibles, basados en tres colores primarios R, G, y B.

2. Conceptos de color

El color se define como una percepción humana. Aunque los estímulos físicos que entran a nuestros ojos y producen la percepción del color pueden ser medidos por métodos físicos directos, el color percibido es el resultado de una serie compleja de procesos en el sistema visual humano. La palabra color tiene diferentes significados, los dos más comunes son: "color percibido" y lo que la comisión internacional sobre iluminación llama "color psicofísico" [1].

El color percibido es definido como el aspecto de un fenómeno visual que permite a una persona distinguir entre elementos en su campo visual y caracterizar a los elementos por nombres de colores tales como blanco, negro, rojo, verde, azul, amarillo, café, gris, etc. El color psicofísico se define como una característica de la radiación visible por la cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos de observación de la misma forma, tamaño, posición y estructura que pueden ser causados por diferencias en la composición espectral de la radiación, el color psicofísico generalmente se especifica en términos de cantidades operacionalmente definidas, tales como los valores triestímulos [1, 2].

Un estímulo de color es radiación electromagnética que puede ser caracterizada por una especificación de color psicofísica. Cada elemento de una imagen puede ser representado como una distribución de radiancia espectral, potencia radiante emanando del elemento por unidad de área por unidad

de ángulo sólido como función de la longitud de onda. El flujo radiante de la luz observada en cada una de las longitudes de onda del espectro visible está asociada con una distribución de potencia espectral. El color es una sensación visual, por lo tanto un color es creado cuando observamos una distribución específica de potencia espectral, el color es el resultado de una luz observada sobre la retina del ojo. Estrictamente hablando, no es legítimo atribuir colores a los objetos sino sólo a la luz que llega a nuestros ojos y que proviene de tales objetos. Cuando es posible decir que un objeto tiene color, éste consiste en la capacidad del objeto para modificar la luz incidente sobre él. Los colores que los seres humanos percibimos están determinados por los diferentes mecanismos (dispersión, esparcimiento, refracción, reflexión, interferencia y difracción), por los cuales las diferentes longitudes de onda que componen la luz blanca interfieren selectivamente con la materia en su camino hacia nuestros ojos [3]. Particularmente, si un cuerpo, el cual posee una determinada función de reflectancia espectral y es tal que refleja luz en forma relativamente equilibrada en todas las longitudes de onda, entonces aparecerá como blanco para el observador; por otra parte, un cuerpo de color tiene una mayor reflectancia en una determinada banda del espectro visible y absorbe casi toda la energía de las restantes longitudes de onda. Cuando la absorción varía con la longitud de onda se dice que el objeto exhibe absorción selectiva. Además de la absorción selectiva el color de un objeto depende de la radiación espectral de la energía radiante incidente y de las funciones psicofísicas de la visión humana. No hay un único color de un objeto, puesto que entre otras cosas, el color depende de la calidad y la intensidad de la energía radiante incidente, no obstante el color de la luz reflejada por un objeto bajo iluminación usual (luz de día, lámpara incandescente) es tan familiar que es usualmente considerada como el color típico de un objeto. La reflectancia luminosa del objeto, la longitud de onda dominante y la pureza de la luz reflejada son consideradas características del objeto. Éstas constituyen el color asignado al objeto [4]. La caracterización de la luz es un aspecto central de la ciencia del color. Si la luz es acromática (sin color), su único atributo es la intensidad, o cantidad de luz, así el término "nivel de gris" se refiere a una medida escalar de la intensidad que va del negro al blanco, pasando por una escala de grises. La luz visible abarca la región del espectro electromagnético comprendida entre los 400 nm y los 700 nm, aproximadamente. Para describir las características de una fuente cromática de luz se emplean tres magnitudes básicas [5]:

- Radiancia.- Cantidad total de energía que sale de la fuente de luz medida en watios (W).
- Luminancia.- Cantidad de energía que un observador percibe procedente de la fuente de luz medida en lumen (lm).
- Brillo.- Descripción subjetiva que resulta muy difícil de medir, atributo de una sensación visual de acuerdo a la cual un área parece exhibir más o menos luz.

Las características generalmente empleadas para distinguir un color de otro son brillo, tono y saturación. Como se indicó anteriormente el brillo está relacionado con la noción cromática de la intensidad. El tono es un atributo asociado con la longitud de onda dominante en una mezcla de luz. El tono representa el color dominante tal como lo percibe un observador; cuando decimos que un objeto tiene un determinado color estamos especificando su tono. La saturación se refiere a la pureza relativa o cantidad de luz blanca mezclada con un tono. Los colores puros del espectro están completamente saturados, siendo el grado de saturación inversamente proporcional a la cantidad de luz blanca añadida. El tono y la saturación en conjunto constituyen la cromaticidad y por tanto un color se puede caracterizar por su brillo y su cromaticidad.

Cuando la luz entra en el ojo ésta es enfocada sobre la retina, absorbida por fotorreceptores y convertida en señales neuronales. Tres tipos de fotorreceptores conocidos como conos, debido a su forma, son sensitivos al color. Los bastones, un cuarto tipo de fotorreceptor, se activan a bajos niveles de iluminación pero no contribuyen a la visión del color [6]. Los tres tipos de conos han sido referenciados como azul, verde y rojo, las respuestas espectrales de los tres conos tienen considerable traslape; una característica que es necesaria para permitir al sistema visual distinguir luz de diferentes longitudes de onda. Una consecuencia fundamental de la existencia de sólo tres tipos de fotorreceptores es que muchas diferentes distribuciones de potencia radiante espectral pueden producir el mismo color percibido. Así, no importa qué proceso subsecuente aplique el sistema visual a las señales de los tres tipos de conos, éste no podrá distinguir entre los estímulos. Los pares de estímulos que tienen diferente distribución de potencia espectral pero que producen el mismo color percibido, son llamados estímulos metaméricos [1, 2]. Bajo las mismas condiciones de iluminación, las distribuciones de radiancia espectral, reflejadas por estímulos metaméricos pueden ser diferentes pero producir exactamente las mismas absorciones en los tres tipos de conos y exactamente el mismo color percibido para un observador promedio, es por esto que la ventaja que se obtiene al utilizar más de tres filtros ópticos es que se revelan características de color del objeto que serían imposibles de resolver con solo tres filtros.

3. Color digital

Es posible capturar una imagen digitalmente por medio de un sistema de formación de imágenes electrónico, por ejemplo, la imagen digital puede ser obtenida al escanear una fuente análoga tal como una fotografía o una impresión a color o usando un digitalizador de imágenes, por ejemplo, una cámara CCD. En cualquier caso la imagen digital producida va hacia una computadora, la cual genera la imagen de salida *pixel por pixel*. La imagen de salida consiste en un arreglo bidimensional de valores muestra, tomados de la escena o impresión. Cada valor muestra específica la información

del color en un punto espacial en la imagen. Para caracterizar completamente la luz incidente sobre los detectores en la cámara o escaner es necesario especificar la radiancia en todas las longitudes de onda. No obstante, estamos interesados sólo en la especificación mínima que nos permita recrear la sensación de un color particular en la imagen original cuando ese color es reproducido en la salida de nuestro sistema, un monitor o un dispositivo de impresión [1, 7].

3.1. Representación tricromática de señales de color

El hecho de que tres valores puedan, con un nivel razonable de aproximación, representar un color, es una consecuencia de que la percepción humana del color está mediada por las respuestas de tres diferentes tipos de fotorreceptores en la retina. La especificación matemática del color (colorimetría) proporciona las bases para la especificación del color en términos de los valores triestímulos. Es importante señalar que la colorimetría no puede especificar la apariencia del color completamente, debido a que está basada en un simple modelo triestímulos. Mucha de la complejidad del color digital se deriva del hecho de que el significado específico del conjunto de tres números o "triada" usado para representar el color depende del contexto en el cual esté es usado. En la salida de una cámara digital o escaner, este vector se refiere a las respuestas de tres diferentes sensores o fotorreceptores, cada uno de los cuales puede ser modelado como la integral sobre la longitud de onda del producto de una función de sensibilidad espectral y la distribución de potencia espectral de la luz incidente sobre el fotorreceptor. Aunque las tres curvas de respuesta son de ancho de banda amplio, tienen picos en diferentes partes del espectro visible, en las regiones de longitud de onda larga, mediana y corta, por tanto es conveniente referirnos a las tres respuestas como rojo, verde y azul, aun cuando podemos no percibir el color espectral puro en la longitud de onda pico de cualquiera de las tres curvas de respuesta [8]. En la salida de una cámara digital o escáner los valores triestímulos de salida, correspondientes a un estímulo particular de entrada con distribución de potencia espectral $S(\lambda)$ estarán dados por:

$$R_S = \int S(\lambda) S_R(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$G_S = \int S(\lambda) S_G(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$$B_S = \int S(\lambda) S_B(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

donde $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$, y $S_B(\lambda)$ denotan las funciones de respuesta espectral para cada uno de los tres sensores. Debido a que diferentes dispositivos de captura de imágenes generalmente tienen respuestas espectrales diferentes, es decir, sistemas nativos de color diferentes, una triada particular puede representar colores diferentes en diferentes dispositivos. Con un apropiado conjunto de funciones de respuesta espectral $V_R(\lambda)$, $V_G(\lambda)$ y $V_B(\lambda)$ para un observador humano, las

ecuaciones anteriores pueden modelar también el sistema visual [8]. Matemáticamente estas ecuaciones definen una proyección del espacio infinito dimensional de todas las posibles distribuciones espectrales sobre el subespacio tridimensional expandido por combinaciones lineales de las tres funciones de respuesta espectral. Debido a que el ojo humano es el dispositivo de captura de imágenes, el cual en última instancia nos concierne, idealmente querríamos los mismos conjuntos de colores metaméricos tanto para el dispositivo de captura de imagen como para el observador humano. Esto puede ser alcanzado sólo si las funciones de respuesta espectral para el dispositivo son una combinación lineal de las del ojo humano. Los dispositivos de captura de imagen comercialmente disponibles generalmente no reúnen esta condición, limitando la exactitud en la reproducción digital del color. La iluminación es otro factor importante que uno debe tener en cuenta cuando se considera el metamerismo [9, 10]. Para un escaner, el estímulo $S(\lambda)$ es el producto de la distribución de potencia espectral $I(\lambda)$ de la luz que ilumina el material a copiar y la transmitancia o reflectancia espectral del material mismo:

$$S(\lambda) = I(\lambda)C(\lambda). \quad (4)$$

Así dos diferentes copias de color $C_1(\lambda)$ y $C_2(\lambda)$ pueden producir los mismos valores triestímulos bajo ciertas condiciones de iluminación, pero no bajo otras diferentes. Una situación similar se presenta en el caso de una cámara digital que obtiene la imagen de una escena. El conjunto descrito por todos los diferentes valores de las triadas de salida para un dispositivo de captura de imágenes en específico, es referido como el espacio de color nativo del dispositivo. Típicamente esos valores son enteros de 0 a 255, todas las posibles combinaciones de tres de esos valores nos dan 256^3 o 2^{24} , aproximadamente 16.7 millones de colores diferentes. Para ser capaces de procesar la imagen de color capturada por diferentes dispositivos usando una estación de trabajo o computadora personal, es necesario convertir los espacios de color nativos de cada uno de los dispositivos, a un espacio de color de referencia común.

3.2. Reproducción del color

Los dispositivos de salida electrónicos realizan una interpretación diferente para las triadas usadas para describir color. En el tubo de rayos catódicos de un monitor, los colores primarios se encuentran en una configuración en la que no se traslapan espacialmente, de tal manera que las triadas que representan a un punto de color en la imagen digital, son una combinación de sus fósforos rojo, verde y azul. Así, el color percibido depende de un promedio espacial por el sistema visual humano. Un modelo simple para la distribución de potencia espectral resultante $D(\lambda)$ es

$$D(\lambda) = R_D D_R(\lambda) + G_D D_G(\lambda) + B_D D_B(\lambda), \quad (5)$$

donde $D_i(\lambda)$ representa la distribución de potencia espectral para cada uno de los primarios y R_D , G_D , B_D son los valores triestímulos o intensidades de los estímulos primarios

asociados con el color que va a ser desplegado; esta triada representa la intensidad de los tres fósforos (primarios) y no la respuesta de tres sensores como sucede en el proceso de captura de las imágenes. El conjunto de colores generado por la combinación de todas las posibles triadas define el espacio de color nativo del dispositivo de despliegue. Debido a que este espacio es generalmente diferente del espacio de color de un dispositivo de captura de imágenes, debe realizarse una conversión entre espacios de color para reproducir fielmente la imagen capturada [8]. Los dispositivos de captura de imágenes proporcionan triadas de salida en sus espacios nativos de color. Por otra parte, un dispositivo de despliegue o impresión espera una triada de entrada que está en su espacio nativo de color. Hasta hace poco el usuario de un sistema de imágenes tenía que realizar su propia caracterización de los espacios de color de los dispositivos en el sistema y escribir su propio *software* para realizar la conversión entre espacios de color. A causa de la instrumentación especial y tediosas mediciones requeridas para hacer tal caracterización, fue común olvidarse del proceso entero y aceptar colores diferentes en los procesos realizados por el sistema. Ahora están disponibles sistemas para el manejo del color y herramientas de calibración que permiten al usuario trabajar con color de una manera independiente de los dispositivos. El sistema para el manejo del color reside en una computadora huésped y desarrolla una caracterización para cada uno de los dispositivos de entrada y salida conectados a la computadora realizando una serie de mediciones automáticas y semiautomáticas. De esta forma el usuario puede trabajar en un espacio de color estándar y tener un sistema de color completamente calibrado, sin tener que entender las especificaciones del espacio de color nativo de cada uno de los dispositivos del sistema. Un usuario que tiene imágenes representadas en un espacio de color estándar puede transferir datos libremente entre diferentes sistemas y capturar, procesar, desplegar o imprimir las imágenes con exactitud en cualquier sistema [8].

4. Imágenes multi-espectrales

Para la generación o captación del conjunto de imágenes multi-espectrales se utilizó una cámara CCD blanco y negro enfocada sobre una fotografía de color y conectada a una estación de trabajo; también se utilizaron treinta y dos filtros ópticos, los cuales se encuentran caracterizados por una función de transferencia o distribución espectral de banda delgada (20 nm aproximadamente) en la región visible del espectro electromagnético, (Fig. 1). En la salida del dispositivo de captura particularmente utilizado (cámara CCD), se obtienen valores de un *byte* por lo que los *pixeles* de la imagen toman valores entre 0 y 255. Existe la posibilidad de que la cámara se sature, para evitar esto se hace una calibración en la cual interviene la distancia de la cámara, la abertura de la lente y la intensidad de la fuente, lo cual nos ubica en la parte lineal de la respuesta del sistema. Aun cuando la cámara se sature, el máximo valor que pueden tomar los *pixeles* en la imagen digitalizada será de 255. La Fig. 1 muestra las distribuciones

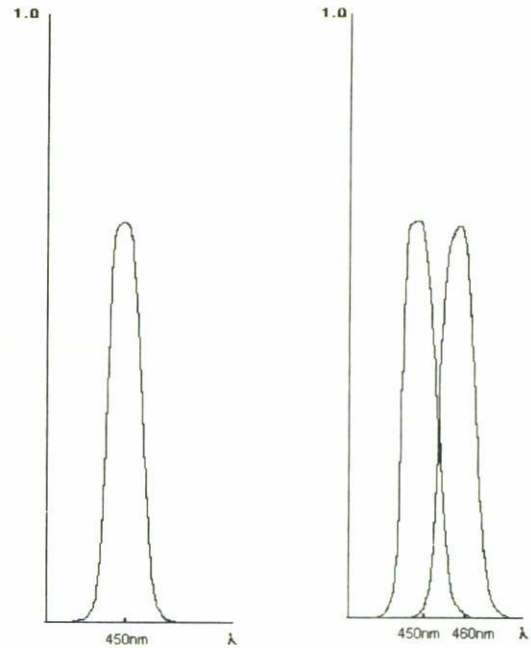


FIGURA 1. Distribución espectral de uno de los filtros utilizados y dos filtros superpuestos mostrando una área de traslape.

espectrales de dos de los filtros ópticos utilizados, los cuales poseen longitudes de onda pico en 450 nm y 460 nm, respectivamente. Las distribuciones espectrales de estos filtros tienen una considerable área de traslape con el propósito de recuperar la información perdida, debido a la función de transferencia intrínseca de los filtros ópticos. Las treinta y dos imágenes digitales capturadas en niveles de gris (0 a 255) contienen diferente información de la escena original y todas ellas conforman el conjunto de imágenes multi-espectrales de la escena original. Las Figs. 2 y 3 muestran dos de las imágenes capturadas de la escena original, con los filtros cuyas longitudes de onda pico se encuentran en 500 nm y 650 nm, respectivamente. En estas figuras es posible ver las diferencias originadas por la utilización de dos diferentes filtros. Cada una de ellas resalta las características de la escena original en la longitud de onda pico. Se considera que el objeto se encuentra bajo la iluminación de una fuente de luz, la cual está caracterizada por una distribución de potencia radiante espectral $S(\lambda)d\lambda$. Consideraremos a la imagen (objeto) como una función bidimensional de la intensidad, definida por $I(x, y)$, el valor de I da el valor de la intensidad en las coordenadas (x, y) . La distribución de potencia radiante espectral de un punto de la imagen con coordenadas (x, y) es $I(\lambda)_{(x,y)}$. Puesto que la luz es una forma de energía, la intensidad (iluminación) en el punto (x, y) debe ser mayor que cero y finita, es decir,

$$0 < I(x, y) < \infty$$

donde $I(x, y)$ es la intensidad o energía radiante emanando del punto (x, y) . Las imágenes que son percibidas por el sistema visual, en muchos casos, provienen de la luz reflejada por los objetos. $I(x, y)$ está caracterizada por dos componen-



FIGURA 2. Imagen impresa en niveles de gris filtrada a 650 nm.



FIGURA 3. Imagen impresa en niveles de gris filtrada a 500 nm.

tes, la distribución espectral la fuente $S(\lambda)_{(x,y)}$ que ilumina a la escena en el punto de coordenadas (x, y) y la distribución de reflectancia espectral $R(\lambda)_{(x,y)}$ del punto de coordenadas (x, y) . Las distribuciones espectrales $S(\lambda)_{(x,y)}$ y $R(\lambda)_{(x,y)}$ se combinan para dar la intensidad de la imagen en las coordenadas (x, y) :

$$I(x, y) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} S(\lambda)_{(x,y)} R(\lambda)_{(x,y)} d\lambda, \quad (6)$$

donde los límites de integración corresponden a los límites del intervalo visible del espectro electromagnético, además,

$$0 < S(x, y) < \infty, \\ 0 < R(x, y) < 1,$$

donde $S(x, y)$ es la cantidad de luz incidente sobre el punto (x, y) proveniente de la fuente de luz y $R(x, y)$ es la cantidad

de luz reflejada por el punto (x, y) de la escena. La Ec. (6) representa la energía radiante o cantidad de luz llegando al filtro y proveniente de las coordenadas (x, y) en la escena original.

Denotaremos a la función de transferencia del i -ésimo filtro utilizado como $F_i(\lambda)$. La Fig. 1 muestra la distribución espectral o función de transferencia del filtro cuya longitud de onda pico se encuentra en 450 nm. Recordando que se han utilizado 32 filtros ópticos, entonces i toma los valores desde $i = 1$ a $i = 32$. La intensidad emanando del i -ésimo filtro, proveniente de las coordenadas (x, y) y llegando a la cámara CCD, está dada por la ecuación

$$I(x, y) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} S(\lambda)_{(x,y)} R(\lambda)_{(x,y)} F_i(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

donde los límites de integración corresponden a las longitudes de onda en los extremos del espectro visible. Una imagen digital es una imagen que ha sido discretizada tanto espacialmente como en su amplitud y está representada por un muestreo espacial o arreglo matricial de elementos o *pixeles*, cada uno de los cuales tiene un valor que está determinado por la cantidad luz emanando de una pequeña región de la imagen original. En este caso los *pixeles* están representados por la Ec. (7) correspondiendo el valor más alto de 255 al blanco y el valor más pequeño de 0 al negro; esta energía dependerá de la cantidad de luz llegando a la cámara CCD.

5. Generación del sistema RGB

Considerando el hecho de que un estímulo de color Q , con distribución de potencia radiante espectral $P(\lambda)_Q$, puede ser representado por la mezcla aditiva de un conjunto de estímulos Q_i con distribución de potencia radiante espectral $P(\lambda)_{Q_i}$ confinados a n intervalos de longitud de onda de anchura $(\Delta\lambda)_i$ [2], podemos considerar las treinta y dos imágenes digitales filtradas como constituyentes de la imagen $I(n, m)$ (n, m enteros), la cual representa digitalmente a la imagen original $I(x, y)$. De esta forma podemos representar a $I(n, m)$ por la ecuación

$$I(n, m) = \sum_{i=1}^{32} I(n, m)_{\lambda_i}, \quad (8)$$

donde $I(n, m)_{\lambda_i}$ ($i = 1$ a $i = 32$) es la i -ésima imagen constituyente de $I(n, m)$ y está expresada por la ecuación

$$I(n, m)_{\lambda_i} = R_{I_i} R + G_{I_i} G + B_{I_i} B, \quad (9)$$

R, G, B es el sistema primario definido para las longitudes de onda 700 nm, 546.1 nm y 435.8 nm, respectivamente [11]. $R_{I_i}, G_{I_i}, B_{I_i}$ son los valores triestímulos de la i -ésima imagen. Debido a que estamos utilizando imágenes digitales, es decir, imágenes discretas tanto espacialmente como en amplitud, los *pixeles* de estas imágenes representan un muestreo de intensidades de la escena original cuyos valores son enteros en el intervalo de 0 a 255. Por otra parte, las funciones *color-matching* necesarias para la superposición de las

imágenes también se encuentran discretizadas a intervalos de 1 nanómetro [2]. Los valores triestímulos R_{Ii} , G_{Ii} , B_{Ii} se expresan por las ecuaciones

$$R_{Ii} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{r}(\lambda), \quad (10)$$

$$G_{Ii} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{g}(\lambda), \quad (11)$$

$$B_{Ii} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{b}(\lambda), \quad (12)$$

$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, y $\bar{b}(\lambda)$ son las funciones para la igualación de color (*color-matching functions*), los límites de las sumatorias son los límites de definición de las distribuciones espectrales de cada uno de los filtros. Combinando las Ecs. (8), (10), (11) y (12) se obtiene la ecuación para $I(n, m)$:

$$I(n, m) = \sum_{i=1}^{32} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{r}(\lambda) R + \sum_{i=1}^{32} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{g}(\lambda) G + \sum_{i=1}^{32} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{b}(\lambda) B, \quad (13)$$

donde los valores triestímulos de $I(n, m)$ son

$$R_I = \sum_{i=1}^{32} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{r}(\lambda), \quad (14)$$

$$G_I = \sum_{i=1}^{32} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{g}(\lambda), \quad (15)$$

$$B_I = \sum_{i=1}^{32} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(n, m)_{\lambda_i} \bar{b}(\lambda). \quad (16)$$

6. Resultados

Lo que las Ecs. (14) a (16) quieren decir, es que se debe dar un factor de peso a los valores de los *pixeles* de cada una de las 32 imágenes, para la i -ésima imagen, estos factores de peso estarán determinados por las funciones *color-matching* que corresponden al ancho de banda del i -ésimo filtro óptico. Considere la Fig. 1, para la imagen que fue obtenida con el filtro cuya longitud de onda pico se encuentra en 450 nm, los correspondientes factores de peso serán las funciones *color-matching* en el intervalo 440 nm a 460 nm aproximadamente. A partir de la distribución espectral del i -ésimo filtro, es posible determinar la longitud de onda que corresponde al máximo valor que toman los *pixeles* en la i -ésima imagen digital y pesar este valor por las funciones *color-matching* en esa longitud de onda. El problema surge cuando se intenta dar un factor de peso a los demás valores de la imagen, dada la

distribución espectral de los filtros ópticos utilizados, el detector no puede discernir, por ejemplo, entre las longitudes de onda de 440 nm y 460 nm del filtro óptico de la Fig. 1 y asocia a cada una de estas longitudes de onda el mismo valor de *pixel* en la imagen digital. La pregunta es, ¿qué *color-matching* se debe utilizar para pesar los valores de los *pixeles*?, ¿los que están definidos en la longitud de onda 440 nm o los que están definidos en la longitud de onda 460 nm?. Para resolver este problema se aprovecha el hecho de que las distribuciones espectrales de los filtros ópticos se traslapan entre sí. Las longitudes de onda a las cuales les fue asociado el mismo valor de *pixel* en la i -ésima imagen digital no tendrán el mismo valor de *pixel* en la i -ésima más una imagen digital. Por ejemplo, las longitudes de onda 440 nm y 460 nm que tienen el mismo valor de *pixel* en la imagen digitalizada con el filtro de longitud de onda pico en 450 nm, no tendrán los mismos valores en la imagen digitalizada con el filtro de longitud de onda pico en 460 nm, (Fig. 1). De esta forma, considerando el área de traslape de dos de los filtros ópticos es posible definir un valor de umbral que corresponde al punto donde el segundo filtro intercepta a la línea vertical que va del eje λ al máximo del primer filtro, así, si el valor del mismo *pixel* en la segunda imagen supera el valor de umbral, entonces el *pixel* en la primera imagen es pesado por las *color-matching* correspondientes a las longitudes de onda a la derecha de la longitud de onda pico del primer filtro. El programa de computación (en lenguaje C) desarrollado para realizar la superposición de las imágenes compara dos imágenes digitalizadas con filtros contiguos y automáticamente asocia a cada valor de los *pixeles* una correspondiente longitud de onda. Una vez terminado este proceso se está en posibilidad de poder desarrollar las sumatorias en las Ecs. (14) a (16), multiplicando las intensidades asociadas a su longitud de onda con los correspondientes valores de las funciones *color-matching* en esa longitud de onda. Una vez que la superposición ha sido realizada el resultado son las tres imágenes componentes de un sistema RGB; estas imágenes se combinan para generar la imagen en color. Las imágenes componentes y la imagen final obtenida se muestran en las Figs. 4 a 7. Es importante recordar que las imágenes se encuentran especificadas por las funciones *color-matching*, en el sistema particular de estímulos primarios $R = 700$ nm, $G = 546.1$ nm y $B = 435.8$ nm. Una transformación de este sistema al sistema nativo del monitor, generará colores más exactos a los de la imagen original.

7. Conclusiones

En este artículo se ha formulado matemáticamente una técnica para superponer un conjunto de imágenes multiespectrales en el intervalo visible del espectro electromagnético, dando por resultado un sistema RGB de color. Publicaciones recientes muestran la creciente investigación que se está desarrollando en el área de color e imágenes multiespectrales y el esfuerzo por aplicar estos sistemas al control de calidad, principalmente en la industria farmacéutica y de inspección



FIGURA 4. Imagen resultante de la combinación de las 32 imágenes multi-espectrales y la función *color-matching* $\bar{r}(\lambda)$.

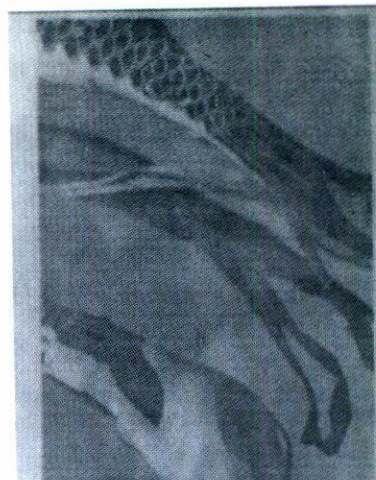


FIGURA 6. Imagen resultante de la combinación de las 32 imágenes multi-espectrales y la función *color-matching* $\bar{b}(\lambda)$.



FIGURA 5. Imagen resultante de la combinación de las 32 imágenes multi-espectrales y la función *color-matching* $\bar{g}(\lambda)$.

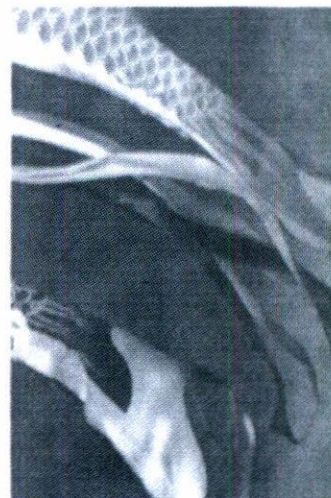


FIGURA 7. Imagen RGB que resulta al superponer las tres imágenes componentes, obtenida mediante la Ec. (13).

de alimentos, en donde el color representa el único factor de certeza de aceptación o rechazo.

Es importante señalar que las imágenes resultantes que se han presentado en este artículo se obtuvieron en base a aproximaciones lineales de las distribuciones espectrales de los

filtros, las cuales no tienen una relación funcional matemática conocida. Como un trabajo a futuro se planea la obtención numérica de los filtros a partir de las gráficas de cada uno de ellos.

* Becario de Conacyt.

1. A.R. Robertson, "The Physics of Digital Color", Special Issue, *Phys. Today* (1992) 24.
2. G. Wyszecki and W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods Quantitative data and Formulae*, 2nd ed., (John Wiley & sons, New York, 1982).
3. K. Nassau, *Color Res. Appl.* **12** (1987) 4.
4. Committee on colorimetry, *J. Opt. Soc. Am.* **34** (1944) 245.
5. R.C. González and R.E. Woods, *Tratamiento Digital de Imágenes*, (Addison-Wesley/Díaz de Santos, 1996).

6. E. Hecht and A. Zajac, *Optica*, (Addison Wesley, 1979).
7. B.A. Wandell, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **PAMI-9** (1987) 2.
8. J.P. Allebach, "The Physics of Digital Color", Special Issue, *Phys. Today* (1992) 32.
9. Committee on colorimetry, *J. Opt. Soc. Am.* **34** (1944) 633.
10. Q. Zaidi, *J. Opt. Soc. Am.* **15** (1998) 1767.
11. D.B. Judd, *J. Opt. Soc. Am.* **23** (1933) 359.