

## **PARTE II:**

# **Resumen y análisis de los resultados de la tesis.**

En esta parte desarrollamos el esquema que se ha presentado en el capítulo anterior (Esquema 1.1) para mostrar el contenido de la tesis. De forma resumida, se describirán los aspectos abordados a lo largo de la investigación realizada, los resultados obtenidos y su análisis. Todo ello se recoge en el compendio de publicaciones que acompaña la tesis. Se construye aquí un hilo argumental que facilita la presentación del trabajo llevado a cabo, relacionándolo con las publicaciones compendiadas, de manera que queda justificada nuevamente su unidad temática. La conexión entre el tema tratado en cada apartado y la publicación o las publicaciones en las que aparece se irá indicando, mediante las oportunas referencias, a lo largo de todo el capítulo. En algún caso, se presentan resultados obtenidos muy recientemente que no están incluidos en ninguna de las publicaciones del compendio. Esta circunstancia también se hará explícita en su momento.



## **Capítulo 2:**

# **Adquisición de la imagen digital en color**

Dentro del esquema del a tesis (Esquema 1.1) en este capítulo se tratan los siguientes apartados:

## **2. Adquisición de la imagen digital en color**

### **2.1. Caracterización colorimétrica de la cámara**

2.1.1. Caracterización espectral de la cámara

2.1.2. Caracterización del ruido. Medida unificada de bondad (UMG)

2.1.3. Transformación RGB – XYZ

### **2.2. Descripción de los dispositivos de captación analizados**

2.2.1. Cámara 3CCD

2.2.2. Cámara fotográfica de sensor multicapa

### **2.3. Caracterización experimental de las cámaras**

2.3.1. Cámara 3CCD

2.3.2. Cámara fotográfica Sigma SD-9 con sensor multicapa

### **2.4. Medida del color mediante cámara**

2.4.1. Condiciones de captación

2.4.2. Elaboración del test

2.4.3. Medida (absoluta) del color mediante la cámara 3CCD

## 2.1 Caracterización colorimétrica de la cámara

La caracterización de un sistema de captación de imagen digital consiste en construir un modelo que relacione las distribuciones espectrales de energía del estímulo con los valores digitales de la imagen y éstos, a su vez, con la respuesta del sistema visual humano. Este modelo depende no sólo de la cámara, sino que requiere fijar la apertura del objetivo, la distancia de trabajo, el campo, la geometría de iluminación/captación y minimizar la influencia de otras luces ambientales. Suponiendo que todos los parámetros de control de la cámara están fijados, podemos determinar el valor digital  $t$  de un píxel en el canal  $i$  mediante la expresión

$$t_i = F_i(v_i) = F_i\left(\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s_i(\lambda)P(\lambda)d\lambda + \xi_i\right) \quad i = 1, 2, \dots, J, \quad (2.1)$$

donde  $v_i$  es la señal inicialmente registrada en el canal  $i$  para un píxel dado,  $P(\lambda)$  es la distribución de radiancia espectral del estímulo,  $s_i(\lambda)$  es la función de sensibilidad espectral del sensor en el canal  $i$  y  $\xi_i$  es el ruido añadido. La función  $F_i(\cdot)$  manipula la señal original  $v_i$  para proporcionar el valor final  $t_i$ . Esta función es normalmente la llamada corrección de gamma [Giorgianni 1998], [Holst 1998], de aplicación opcional, que incrementa la señal de manera no lineal. En las cámaras de uso científico suele ser preferible la desactivación de esta corrección para obtener un comportamiento aproximadamente lineal. En cuanto al número de canales,  $J$  en la ecuación (2.1), quedarán reducidos a tres - los canales RGB- en las cámaras analizadas en este trabajo. La sensibilidad de la cámara quedará definida en el intervalo de longitudes de onda  $\{\lambda_{\min}, \lambda_{\max}\}$  que corresponde al espectro visible y suponemos que el sensor dispone de filtros de corte de las regiones infrarroja y ultravioleta. Para objetos iluminados, la distribución de radiancia espectral del estímulo  $P(\lambda)$  es el producto de las distribuciones espectrales del iluminante y de la reflectancia del objeto. Con todo ello, podemos reescribir la ecuación (2.1) de la forma

$$t_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s_i(\lambda)L(\lambda)r(\lambda)d\lambda + \xi_i. \quad (2.2)$$

Esta ecuación y buena parte del cálculo asociado con ella permiten un tratamiento matemático en formato matricial. Se procede análogamente al caso del sistema visual

humano, suponiendo que todas las distribuciones espectrales están limitadas en banda y que las funciones continuas que dependen de la longitud de onda pueden remplazarse por funciones discretas, obtenidas al muestrear las funciones continuas en pequeños intervalos ( $\leq 10nm$ ). El resultado para cada píxel es un vector cuyas componentes son los valores digitales en los diversos canales. En nuestro caso, típicamente  $t = (t_R, t_G, t_B)$  o simplemente los valores RGB.

Como decíamos al principio del apartado, la caracterización de una cámara también relaciona los valores RGB con la respuesta del sistema visual humano ante el mismo estímulo (Figura 2.1) y bajo unas mismas condiciones de observación que incluyen el iluminante.

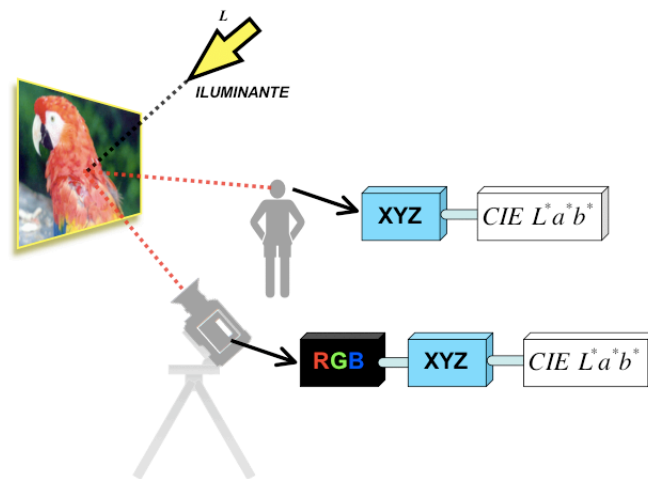


Figura 2.1 – Relación entre la respuesta de una cámara y la respuesta visual.

Los valores RGB están referidos, o como se dirá en adelante, son dependientes del dispositivo de adquisición de imagen. Por otra parte, la respuesta del sistema visual humano se representa mediante los valores triestímulos CIE 1964 XYZ, o posteriores transformaciones hacia espacios de mayor uniformidad, como los valores CIELAB [Wyszecki 1982], [Berns 2000]. Los valores XYZ que caracterizan la respuesta del sistema visual humano (observador patrón) ante un estímulo dado pueden medirse utilizando un espectrofotómetro o un espectrorradiómetro. La transformación que relaciona los valores RGB de la cámara con los valores triestímulos XYZ constituyen la caracterización colorimétrica de una cámara. Los modelos más utilizados para la caracterización de cámaras consideran transformaciones lineales [Horn 1984], [Maloney 1986], [Simpson 1991], [Corbalán 2000] o, al menos, consideran que las posibles no

linealidades del comportamiento de la cámara son independientes de la longitud de onda [Barnard 2002], [Vora 1997a], [Vora 1997b]. La transformación de los valores RGB a los triestímulos XYZ y su inversa permiten pasar de un espacio de especificación del color dependiente del dispositivo a un espacio de especificación independiente del dispositivo y viceversa.

En nuestro trabajo se optó por una caracterización colorimétrica de la cámara basada, en primer lugar, en la determinación de su respuesta espectral y, en segundo lugar, en la evaluación del ruido introducido en la imagen. A continuación se describen ambas etapas.

### **2.1.1 Caracterización espectral de la cámara**

Para la caracterización de la respuesta espectral se midieron las curvas de sensibilidad espectral relativa en los canales rojo, verde y azul de la cámara. Se han considerado dos maneras de efectuar estas medidas:

Una de ellas, consiste en utilizar una serie de filtros interferenciales y un espectrorradiómetro [Park 1995]. En nuestro caso se utilizaron filtros de 9.5 nm de anchura de banda en promedio para cubrir un rango de 400 nm ~ 700 nm en intervalos de 20 nm, con la excepción del paso 440 nm que se emplea 450 nm. La Tabla 2.1 describe los filtros empleados. Los filtros se aplican a una lámpara incandescente de espectro continuo para obtener un conjunto de sucesivos haces de banda estrecha (cuasimonocromáticos) que inciden sobre un difusor (Figura 2.2(a)). La relación, para cada longitud de onda, entre las respuestas RGB de la cámara y la medida del espectrorradiómetro, permite construir las funciones muestreadas de la sensibilidad espectral de la cámara en cada canal.

Otra manera más precisa de medir las funciones de sensibilidad espectral de la cámara consiste en utilizar un monocromador [Barnard 2002], [Martínez-Verdú 2002]. En este caso los haces pueden reducir sensiblemente su ancho de banda a 2-4nm y seleccionarse con intervalos más pequeños de manera que las funciones estén muestreadas en un mayor número de puntos en el rango visible. Por ejemplo, en nuestro caso, se tomaron muestras cada 5 nm en un rango desde 400 nm hasta 700 nm. El haz que emerge del monocromador ilumina un difusor de referencia, por transmitancia o bien por

reflectancia, que es sucesivamente captado por la cámara y medido por el espectrorradiómetro en las mismas condiciones (Figura 2.2(b)). La relación de ambas respuestas permite reconstruir, como antes, las funciones de sensibilidad espectral relativa de los canales rojo, verde y azul de la cámara.

*Tabla 2.1 - Filtros interferenciales empleados.*

<b>Longitud de onda (<math>\lambda</math>)</b>	<b>Anchura de banda</b>
400 nm	9,0 nm
420 nm	7,0 nm
450 nm	12,0 nm
460 nm	6,8 nm
480 nm	7,1 nm
500 nm	7,4 nm
520 nm	8,2 nm
540 nm	8,7 nm
560 nm	9,4 nm
580 nm	9,8 nm
600 nm	10,1 nm
620 nm	10,6 nm
640 nm	11,3 nm
660 nm	11,6 nm
680 nm	11,5 nm
700 nm	12,3 nm

En la parte experimental de esta tesis se han utilizado los dos procedimientos (mediante los filtros interferenciales y mediante el monocromador) para determinar las curvas de sensibilidad espectral de las dos cámaras analizadas. El procedimiento del monocromador se utilizó con la cámara 3CCD y el procedimiento de los filtros interferenciales se utilizó con la cámara fotográfica de sensor multicapa. En el apartado 2.3 se justifica la utilización de uno y otro procedimiento.

Como resultado de la medida de las funciones de sensibilidad espectral de la cámara para cada canal se obtienen los valores numéricos de las funciones  $s_i(\lambda)$ , donde  $i = 1, 2, 3$  corresponde a los canales R, G, B.

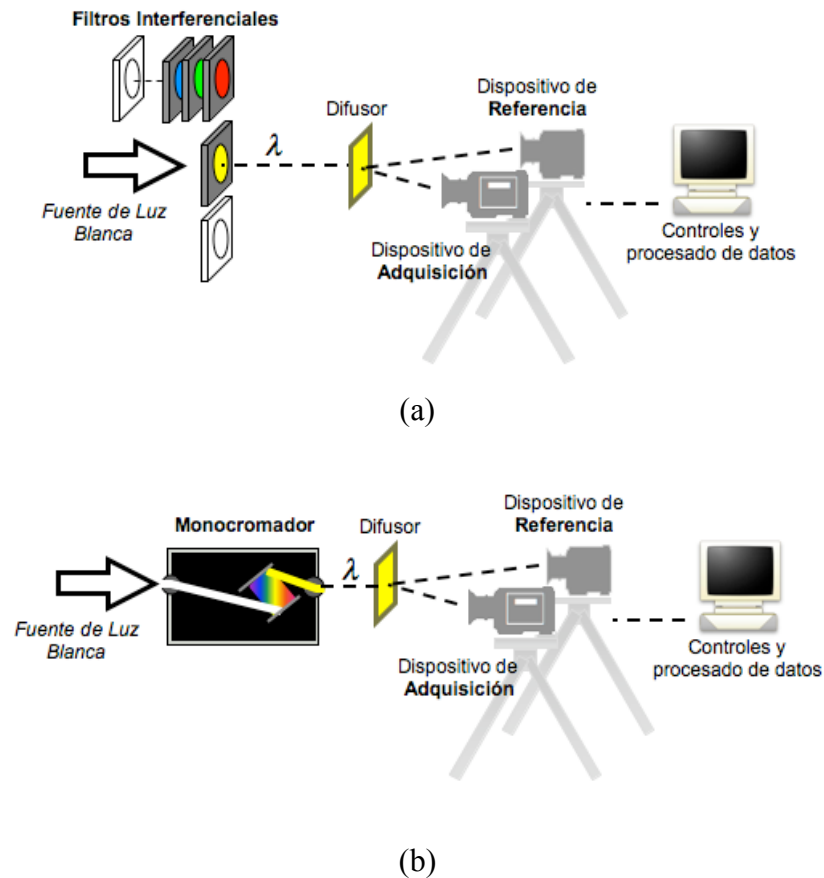


Figura 2.2 - Montaje para la medida de las funciones de sensibilidad espectral relativa de la cámara. (a) Utilizando filtros interferenciales interpuestos entre la lámpara y la cámara; (b) Utilizando un monocromador.

Las tres funciones de sensibilidad espectral RGB pueden considerarse como un conjunto de filtros de color para los cuales se establece la medida de bondad definida por Vora-Trusell, conocida como factor  $\nu$  [Vora 1993]. El factor  $\nu$  se utiliza para caracterizar dispositivos de adquisición de imágenes, tales como cámaras o escáner, e indica el grado de semejanza que existe entre el conjunto de sensibilidades espectrales del dispositivo y las funciones de igualación del color del observador humano patrón. El valor  $\nu = 1.0$  indica un ajuste perfecto entre los subespacios de color que pueden percibirse por ambos sistemas (el dispositivo de captación y el sistema visual humano). De acuerdo con Berns y Rieman [Berns 2002], para aplicaciones colorimétricas, es deseable disponer de dispositivos con un factor  $\nu$  superior a 0.9 en primera aproximación.

Como se ha dicho, la representación del color basada en los valores RGB es dependiente del dispositivo y puede expresarse en otros valores estándar independientes



del dispositivo, como los valores triestímulos CIE XYZ, mediante una transformación lineal [Horn 1984], [Maloney 1986].

### 2.1.2 Caracterización del ruido. Medida unificada de bondad (UMG)

La calibración de una cámara debe tener en cuenta no sólo sus sensibilidades espectrales sino también sus características de ruido. Estas características deben asimismo ser consideradas en la medida de la bondad de la cámara. Entre los trabajos de calibración de cámaras que consideran el ruido citamos el de Healey y Kondepudy [Healey 1994] para cámaras de un solo sensor CCD y, como más próximo al nuestro, el trabajo de Quan y colaboradores [Quan 2002a]. En éste último, el modelo de ruido del sensor CCD tiene dos componentes principales: un ruido cuyo origen es independiente de la señal (ruido de corriente oscura) y un ruido dependiente de la señal (*shot noise*). El ruido de la corriente oscura puede medirse captando imágenes, a temperatura ambiente, con la apertura de la cámara totalmente cerrada. El ruido registrado tiene un valor medio, que suele restarse de la imagen resultante, pero que también presenta fluctuaciones que contribuyen a la formación de un patrón de ruido constante [Holst 1998]. El *shot noise* tiene su causa en la naturaleza cuántica y discreta de los fotones que llegan al sensor. Las fluctuaciones estadísticas en la llegada de fotones siguen una distribución de Poisson y, consecuentemente, la varianza de este tipo de ruido es proporcional al valor medio de la señal de entrada.

Al igual que Quan y colaboradores [Quan 2002a], asumimos un modelo de ruido en la imagen de valor medio nulo cuya varianza  $\sigma_{\eta}^2$  viene dada por

$$\sigma_{\eta}^2 = \sigma_d^2 + \sigma_i^2 = \sigma_d^2 + k\mu_i, \quad (2.3)$$

donde  $\sigma_d^2$  representa la varianza del ruido de corriente oscura,  $\sqrt{k}$  es el coeficiente de eficiencia cuántica de conversión fotón-electrón del sensor CCD y  $\mu_i$  es la intensidad de la señal de entrada en el sumando que corresponde a la varianza del *shot noise* ( $\sigma_i^2$ ). De la ecuación (2.3) se deriva que, cuando la intensidad de la señal es baja, el ruido está dominado por la componente de corriente oscura, mientras que cuando la intensidad de la señal aumenta, la componente de *shot noise* pasa a ser la que predomina. Los niveles de ruido pueden representarse en la ecuación (2.3) mediante valores relativos al valor

digital de la intensidad máxima. El coeficiente  $k$ , asociado al *shot noise*, puede obtenerse a partir del registro de una serie de señales de distinto valor medio y midiendo sus variaciones. A continuación, se realiza una regresión lineal de los puntos experimentales ajustándolos por mínimos cuadrados a la ecuación (2.3).

Teniendo en cuenta la medida unificada de bondad UMG (del inglés, *unified measure of goodness*) propuesta por Quan y colaboradores en [Quan 2002a], se pueden recalcular los coeficientes de la matriz de transformación de los valores RGB a valores triestímulos XYZ de manera que se minimice la propagación del ruido. El error se minimiza haciendo mínimo el promedio de la diferencia de color para un conjunto variado de muestras estándar en un espacio de color perceptualmente uniforme. Para una lectura más detallada de las propiedades del método y del procedimiento de cálculo se recomienda la lectura del trabajo de Quan [Quan 2002a].

### 2.1.3 Transformación RGB→XYZ

En este trabajo de tesis, hemos considerado dos vías para calcular los coeficientes de la matriz  $M$  de conversión de los valores RGB a triestímulos XYZ, según la expresión

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = [M] \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

En la primera de ellas, se ha utilizado exclusivamente la caracterización espectral de la cámara. En ese caso los coeficientes se han calculado siguiendo el procedimiento descrito por Simpson y Jansen [Simpson 1991] y Corbalán y colaboradores [Corbalán 2002] que tiene en cuenta las curvas de sensibilidad espectral de la cámara (a las que se les asocia una medida de bondad dada por el factor  $v$  de Vora-Trussell), las respuestas del observador patrón ( $\bar{x}_{10}$ ,  $\bar{y}_{10}$ ,  $\bar{z}_{10}$ , CIE 1976) y la distribución espectral de energía de la fuente de luz blanca. El procedimiento se basa en minimizar la función de error por mínimos cuadrados. Como resultado, se han obtenido los [3x3] coeficientes de la matriz de la transformación lineal, que llamaremos  $M_{CSS}$  por basarse en las curvas de sensibilidad espectral.

*El trabajo realizado para la obtención de los coeficientes de la matriz  $M_{CSS}$  está descrito en la publicación incluida en el compendio con referencia [Millán 2004a].*

En la segunda vía, se han puesto a punto los algoritmos de cálculo para la obtención del valor de la medida unificada de bondad (UMG) a partir de la medida de las curvas de sensibilidad espectral de la cámara y de sus características de ruido. También se ha elaborado el algoritmo para el cálculo de los coeficientes de la matriz  $[3 \times 3]$  de conversión, que ahora llamaremos  $M_{UMG}$ , basada en esta caracterización unificada, espectral y de ruido, de la cámara. Como conjunto variado de muestras estándar sobre el que se efectúan las medidas y se minimiza el error hemos utilizado el conjunto de Hardeberg, que contiene veinte muestras Munsell [Hardeberg 1998], uno de los considerados por Quan en su propuesta. Esta vía requiere mayor trabajo experimental en la caracterización de la cámara, la utilización de algoritmos más complejos y también mayor tiempo de cálculo que la primera. Pese a ello, se ha considerado por tratarse de una caracterización más completa.

*El trabajo realizado para la obtención del valor UMG y de los coeficientes de la matriz  $M_{UMG}$  está descrito en la publicación incluida en el compendio con referencia [Valencia 2005c].*

Como describiremos en los apartados siguientes, las dos vías de trabajo han dado lugar a comparaciones de los resultados experimentales obtenidos por cada una de ellas, tanto en medidas absolutas del color como en medidas de diferencias de color entre pares de muestras.

## **2.2 Descripción de los dispositivos de captación analizados**

En la investigación realizada en esta tesis nos hemos centrado en dos cámaras: una videocámara de uso científico e industrial con triple sensor CCD y una cámara fotográfica de sensor multicapa CMOS.

### 2.2.1 Cámara 3CCD

Lo que denominamos cámara 3CCD en este trabajo es una videocámara SONY DX-9100P (Tabla 2.2), de triple sensor CCD y con una relación señal ruido nominal de 57 dB (Figura 2.3(a)). En este tipo de diseño, la luz es descompuesta por prismas dicróicos (Figura 2.3(b)) en los canales R, G y B y cada haz se desvía para ser captado por su respectivo sensor CCD (Figura 2.3(c)), uno por cada canal. Los sensores para el verde y el rojo suelen ser iguales, pero el sensor azul suele estar optimizado. Hasta el momento se considera que las cámaras con arquitectura 3CCD son una buena opción para procesos colorimétricos, aplicaciones científicas y técnicas, porque permiten captar imágenes con una gran resolución y calidad cromática.

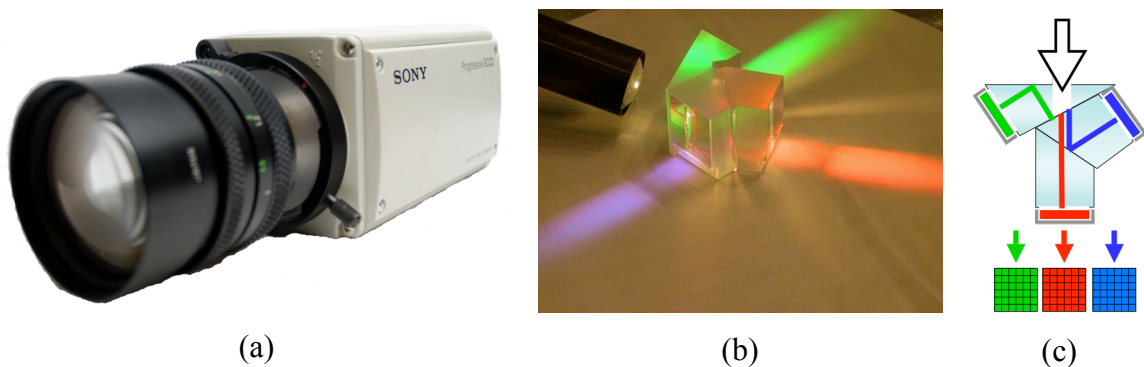


Figura 2.3 - Cámara 3CCD

Tabla 2.2 - Características de la cámara 3CCD empleada

#### ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA 3CCD

Modelo: Sony DXC-9100P

##### Sistema de Imagen

- Píxeles efectivos (resolución entre la cámara y la tarjeta de adquisición): 649 x 780

##### Características

- Relación señal ruido: 57 dB
- Control de ganancia: AGC y de 0 a 18 dB en unidades de 1 dB
- Balance de blanco: Automático, manual (ajuste individualizado de las ganancias Roja y Verde), y dinámico (ATW, *auto-tracing white balance*).
- Compensación de la Gamma: intercambiable entre *on/off*
- Temperatura de Color: 3200K/5600K

##### Objetivo

- Distancia focal: 75 mm
- Apertura (f/#):
  - Máxima: 1.4
  - Mínima: 22

La tarjeta de adquisición es MATROX Meteor II M/C (8 bits) que acepta las imágenes de tamaño 640x780 píxel (~0.5 Megapixels) captadas por la cámara y digitaliza la señal analógica en 256 niveles de gris para cada componente R, G, y B de la imagen. La tarjeta está integrada en un ordenador personal que dispone de la aplicación informática de control.

### 2.2.2 Cámara fotográfica de sensor multicapa

La cámara de sensor multicapa es una cámara fotográfica digital SIGMA SD-9 (Tabla 2.3) con un sensor CMOS multicapa (Figura 2.4(a)). El sensor está fabricado por Foveon de tecnología reciente [Foveon]. Se basa en registrar, en cada píxel, los estímulos de los tres canales básicos R, G, B en un conjunto de sensores situados en profundidad (multicapa), de manera similar a como se efectuaba en las antiguas películas fotográficas de diapositiva. En este caso, no hay necesidad de descomponer la luz en tres haces espacialmente separados R, G, B. En cuanto a la resolución, el resultado es, teóricamente, similar a una imagen capturada con sensores en la arquitectura 3CCD ya que en cada píxel se transporta la información de los tres canales RGB (Figura 2.4(b)). Esta arquitectura sólo requiere un sensor en lugar de tres, y no genera efectos indeseados del tipo moiré, como sucede con las cámaras con filtros tipo mosaico y patrones de distribución espacial de píxeles R, G, y B (por ejemplo, el mosaico muy común de patrón Bayer en la Figura 2.5). Las cámaras con un único sensor (CMOS) multicapa son poco sensibles por lo que requieren una mayor iluminación.

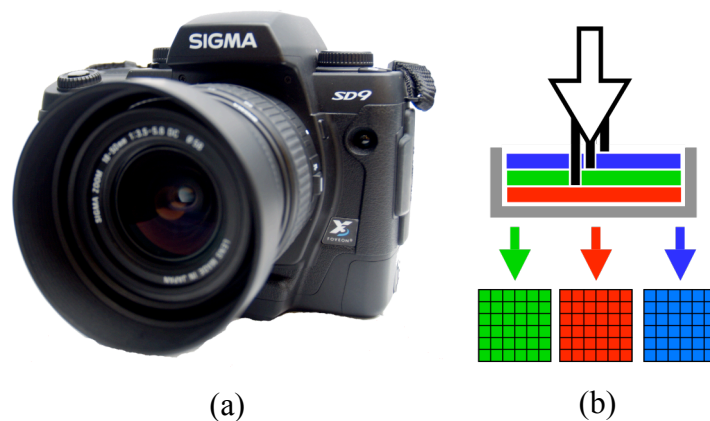


Figura 2.4 - Cámara de sensor CMOS multicapa

Tabla 2.3 - Características de la cámara multicapa empleada

<b>ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA DE SENSOR MULTICAPA</b>	
Modelo: Sigma SD9	
<b>Sistema de Imagen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor: CMOS Foveon X3 (3.54 Megapíxeles por 3)</li> <li>• Píxeles efectivos (resolución): 2268(vertical) x 1512(horizontal)</li> </ul>	
<b>Características</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad ISO: 100, 200, 400.</li> <li>• Velocidad de obturación: de 1/6000 sec a 15 seg (ISO 100), de 1/6000 seg a 1 seg (ISO 200, ISO 400)</li> <li>• Balance de blanco: Manual. Se realiza fotografiando la placa de referencia iluminada con la fuente de luz que se empleará en las pruebas.</li> </ul>	
<b>Objetivos</b> (Sigma AF-MF zoom lens)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia focal: 18-50 mm</li> <li>• Distancia mínima de enfoque: 0.25 m</li> <li>• Ángulo de visión: 76.5° ~31.7°</li> <li>• Apertura (f/#): <ul style="list-style-type: none"> <li>Máxima: 3.5 – 5.6</li> <li>Mínima: 22</li> </ul> </li> </ul>	

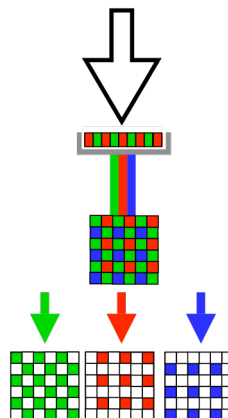


Figura 2.5 - Configuración de un sensor con distribución filtros RGB en mosaico (patrón Bayer).

Para la experiencia se ha considerado la configuración: ( $t = 1 / 30 \text{seg}$ ,  $f/\# = 8.0$ ).

La conversión de la señal analógica a digital se hace integrada en el sensor de la cámara. La imagen digital proporcionada por la cámara Sigma tiene un tamaño de 1134x756 píxeles (~3.4 Megapíxeles).

El estudio de las posibilidades de esta cámara en aplicaciones colorimétricas nos pareció muy interesante por la novedad técnica del sensor multicapa, alta resolución y bajo costo en comparación con la cámara 3CCD.

### 2.3 Caracterización experimental de las cámaras

Las medidas efectuadas con las cámaras se comparan con un espectrorradiómetro calibrado que tomaremos como instrumento de referencia. Hemos utilizado el espectrorradiómetro Photo Research PR-715 (Figura 2.6) para la caracterización de las cámaras en esta tesis. El instrumento es sensible en un rango de longitudes de onda (380 nm – 1068 nm), una precisión espectral de  $\pm 4$  nm y se ajustó para un ángulo de apertura de  $1^\circ$ . De hecho, a lo largo del trabajo se ha utilizado el espectrorradiómetro para efectuar diversas medidas: las funciones de sensibilidad espectral de los canales RGB de las cámaras, la distribución de radiancia espectral y la temperatura correlacionada de color del simulador del iluminante  $D_{65}$  instalado en una cabina de observación, la reflectancia espectral y los valores triestímulos de las muestras Munsell seleccionadas que componen los tests.



Figura 2.6 - Espectrorradiómetro Photo Research PR-715

En la preselección de algunos controles de las cámaras y, más adelante, en la toma de medidas en general, se utilizó una cabina de observación (VeriVide CAC 120H4) con un simulador de luz de día  $D_{65}$  constituido por un conjunto de lámparas fluorescentes F40/T12. Medimos su distribución de radiancia espectral (Figura 2.7) y su temperatura correlacionada de color (6438 K, observador  $10^\circ$ ).

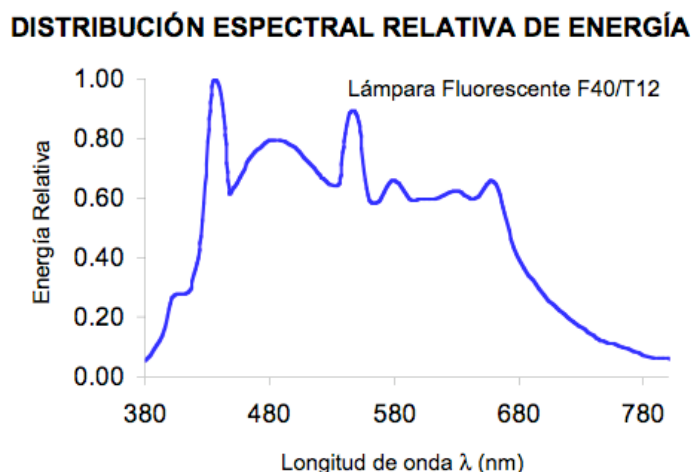


Figura 2.7 - Distribución de la radiancia espectral relativa de la lámpara fluorescente F40/T12 instalada en la cabina de observación como simulador de la luz de día D65.

### 2.3.1 Cámara 3CCD

#### REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS

El contenido de este apartado se encuentra en las publicaciones del compendio con las siguientes referencias:

Millán, M. S., Valencia, E., Corbalán, M., "3CCD Camera's capability for measuring color differences: experiment in the nearly neutral region", *App. Opt.* **43**(36), 6523-6535 (2004).

Valencia, E., Millán, M. S., "Small color differences in the very pale and dark grayish regions measured by camera", *J. Imaging Sci. Technol.* **49**(6), 605-619 (2005).

En la configuración inicial de la cámara 3CCD, se desactivó el control de ganancia automática (nivel de 0 dB) y se fijó la función gamma a 1.0 a fin de situar el comportamiento de la cámara en un régimen lo más lineal posible. Para realizar el balance del blanco, se captó un patrón calibrado de reflectancia blanca (Photoresearch RS-3) iluminado por el simulador de luz de día  $D_{65}$  de la cabina. Estando todo el campo de la imagen ocupado por el área blanca del patrón, se fijó el balance de blanco, por el cual la cámara realiza un ajuste automático de las respuestas de los canales que le permite fijar la señal de referencia blanca. La reflectancia espectral del patrón utilizado era prácticamente constante e igual a 1.0 (su calibración no excedía de  $\pm 0.6\%$  de los valores de una fuente calibrada de referencia en el intervalo 380-780nm). Para tomar la referencia del negro, se captó una imagen cerrando totalmente la apertura de la cámara.



En la adquisición de imágenes para la obtención de las curvas de sensibilidad de la cámara 3CCD, la apertura se mantuvo fija ( $f/\#=4$ ). En cada imagen se seleccionó un área central de  $300 \times 300$  píxeles, de aspecto uniforme.

La tarjeta de adquisición requiere fijar los controles de ganancia y compensación en un rango de (0,255) como paso previo a la captación de imágenes. En adelante, se usarán los términos en inglés *gain*, para referirnos a la ganancia, y *offset*, para la compensación, dado que su uso está muy difundido. Parte de la caracterización de la cámara consiste en determinar unos valores adecuados de *gain* y *offset*. En los siguientes apartados se describe el procedimiento seguido y los resultados obtenidos.

### ***Selección de los valores de los controles de gain y offset.***

En la inicialización de la cámara, los valores de los controles de *gain* y *offset* tienen que ser fijados para que la tarjeta convierta las señales analógicas R, G, B de la cámara en tres valores RGB digitales de 8-bits, en el rango de 0 a 255, que representan una imagen digital. En un principio, se ha evaluado el comportamiento de la conversión para cuatro combinaciones simples en las que *gain* y *offset* toman valores extremos del rango, es decir, 0 ó 255. Para estos cuatro casos se estudiaron los valores R, G, B de respuesta de la cámara (Figura 2.8) para una escala de 31 muestras grises de la colección mate del libro Munsell dentro del rango de la componente *Value Munsell* desde 2.0 (oscuro) hasta 9.5 (claro). El Valor 0 corresponde a una imagen adquirida con la apertura de la lente totalmente cerrada y el valor 10 corresponde a la imagen adquirida de la referencia blanca. El iluminante utilizado era el simulador  $D_{65}$ .

Normalmente, se busca aquella configuración de la cámara que aprovecha el mayor rango dinámico posible junto con la mínima manipulación de la señal. Esta circunstancia corresponde a las respuestas RGB de la gráfica de la Figura 2.8(a). Obsérvese en las Figura 2.8(a) y (b), que el valor de *offset* = 0, da lugar a valores muy próximos y no nulos para las señales R, G, B correspondientes a las muestras de *Value Munsell* más bajo (grises y oscuros cercanos a negro). Esto pone de manifiesto la existencia de un fondo constante o un ruido de corriente oscura introducido por la cámara. Los valores de *gain* = 0 y *offset* = 0 (Figura 2.8(b)) no son mejores que los

valores de  $gain = 255$  y  $offset = 0$  (Figura 2.8(a)) porque ellos llevan a una saturación del sensor para los valores altos de luminancia y, además, la constante de fondo es casi el doble. Las otras dos configuraciones (Figura 2.8(c) y (d)) se descartan porque sólo aprovechan un pequeño rango. Así pues, partimos de los valores  $(gain, offset) = (255, 0)$  como valores orientativos iniciales de configuración de la cámara 3CCD.

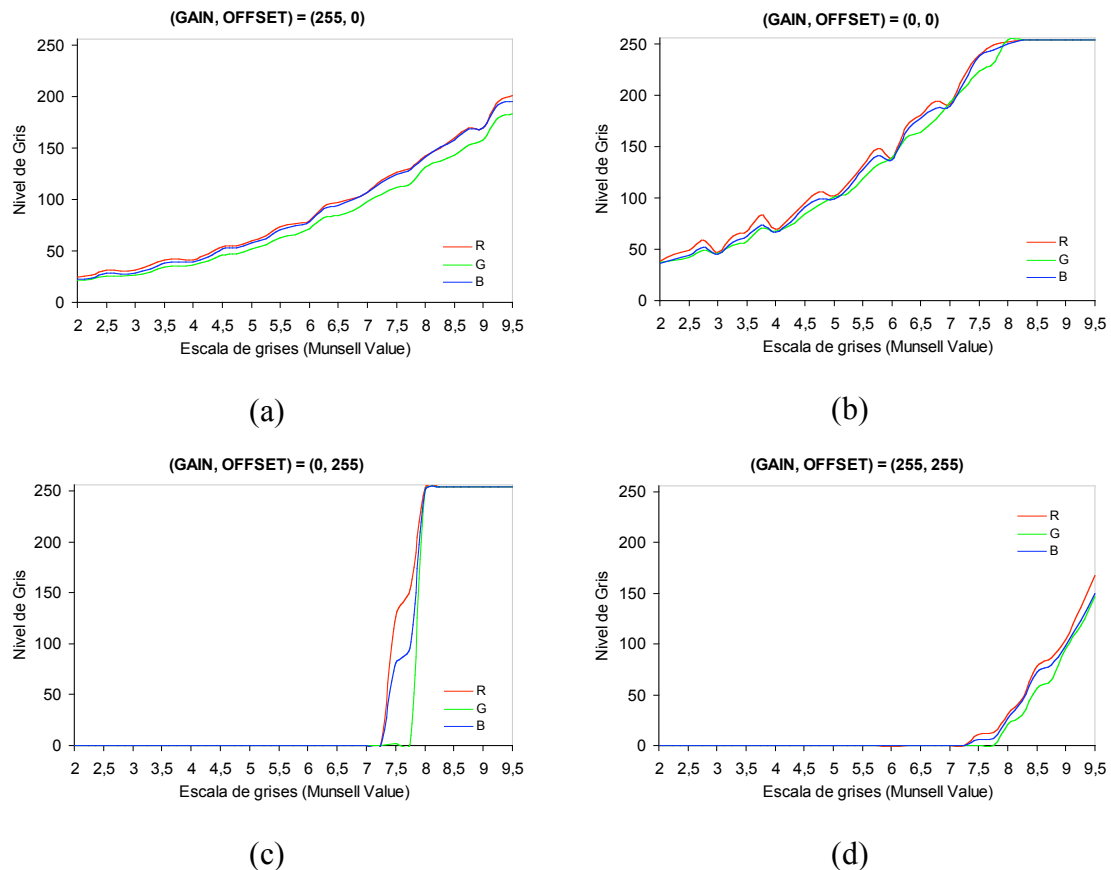


Figura 2.8 - Respuesta RGB de la cámara para la escala de grises y varias combinaciones de los valores  $(gain, offset) = \{(255, 0), (0, 0), (0, 255), (255, 255)\}$

***Determinación de las curvas de sensibilidad espectral. Medida de bondad de los filtros (factor  $v$ ). Influencia de los valores de  $(gain, offset)$ .***

Se han medido las curvas de sensibilidad espectral R, G, B de la cámara Sony DXC-9100P para dos valores de  $gain = \{128, 255\}$  y tres de  $offset = \{0, 32, 64\}$  alrededor de los valores inicialmente seleccionados de  $gain = 255$  y  $offset = 0$ . Se aplicó la técnica basada en estimular la cámara con haces de luz de banda espectral muy estrecha (de

4nm aprox.) procedentes de un monocromador. Se tomaron las medidas con intervalos de muestreo de 10nm. Se comparan las señales obtenidas con la respuesta del espectrorradiómetro (Figura 2.9).

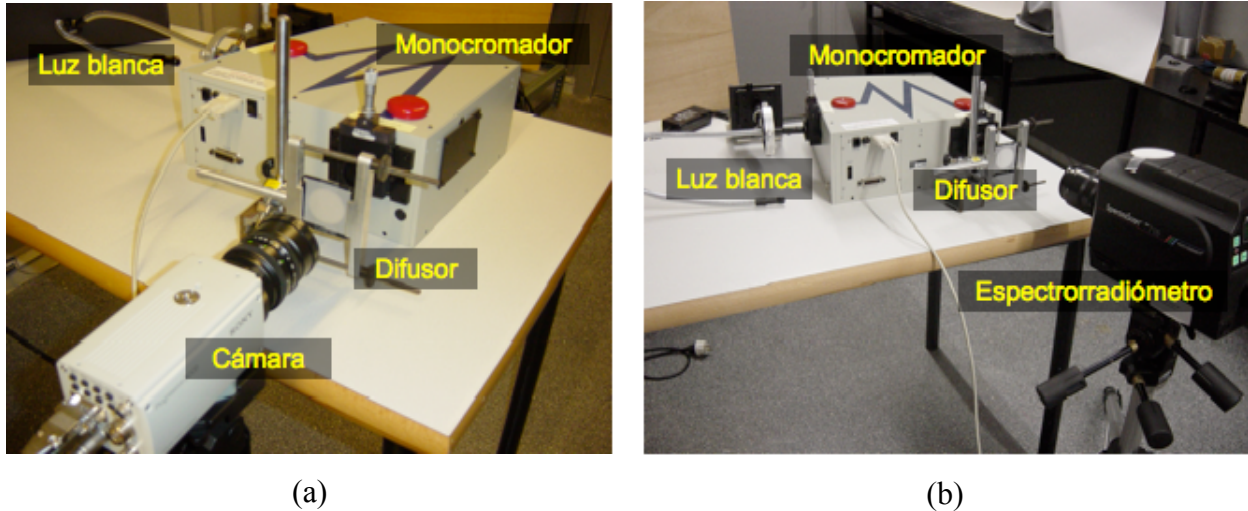


Figura 2.9 - Fotografías del montaje experimental para la medida de sensibilidad espectral de la cámara 3CCD. (a) Registro con la cámara, (b) registro con el espectrorradiómetro.

La Figura 2.10 muestra los gráficos de las tres curvas de sensibilidad espectral de la cámara medidas para las seis combinaciones de los valores de  $gain = \{128, 255\}$  y  $offset = \{0, 32, 64\}$ .

Para cada conjunto de tres funciones de respuesta espectral R,G,B se ha calculado la medida de bondad, expresada en el factor  $\nu$  [Vora 1993]. En la Figura 2.10, el valor  $\nu > 0.9$  es superado por las parejas  $(gain, offset) = \{(128, 32), (255, 32)\}$ . Preferimos los resultados que se obtienen para la pareja de valores  $(gain, offset) = (255, 32)$ . Aunque el factor  $\nu$  es ligeramente inferior al que se obtiene para la otra pareja de  $(gain, offset) = (128, 32)$ , el máximo de la función de sensibilidad para el canal R presenta una forma más adecuada. Por otro lado, la pareja  $(gain, offset) = (255, 0)$  obtiene el valor  $\nu = 0.8208$ , el más bajo entre los pares estudiados. Puede verse que las variaciones del valor de  $offset$  tienen mayor influencia que las del  $gain$  en las funciones de sensibilidad R, G, B y en el factor  $\nu$ .

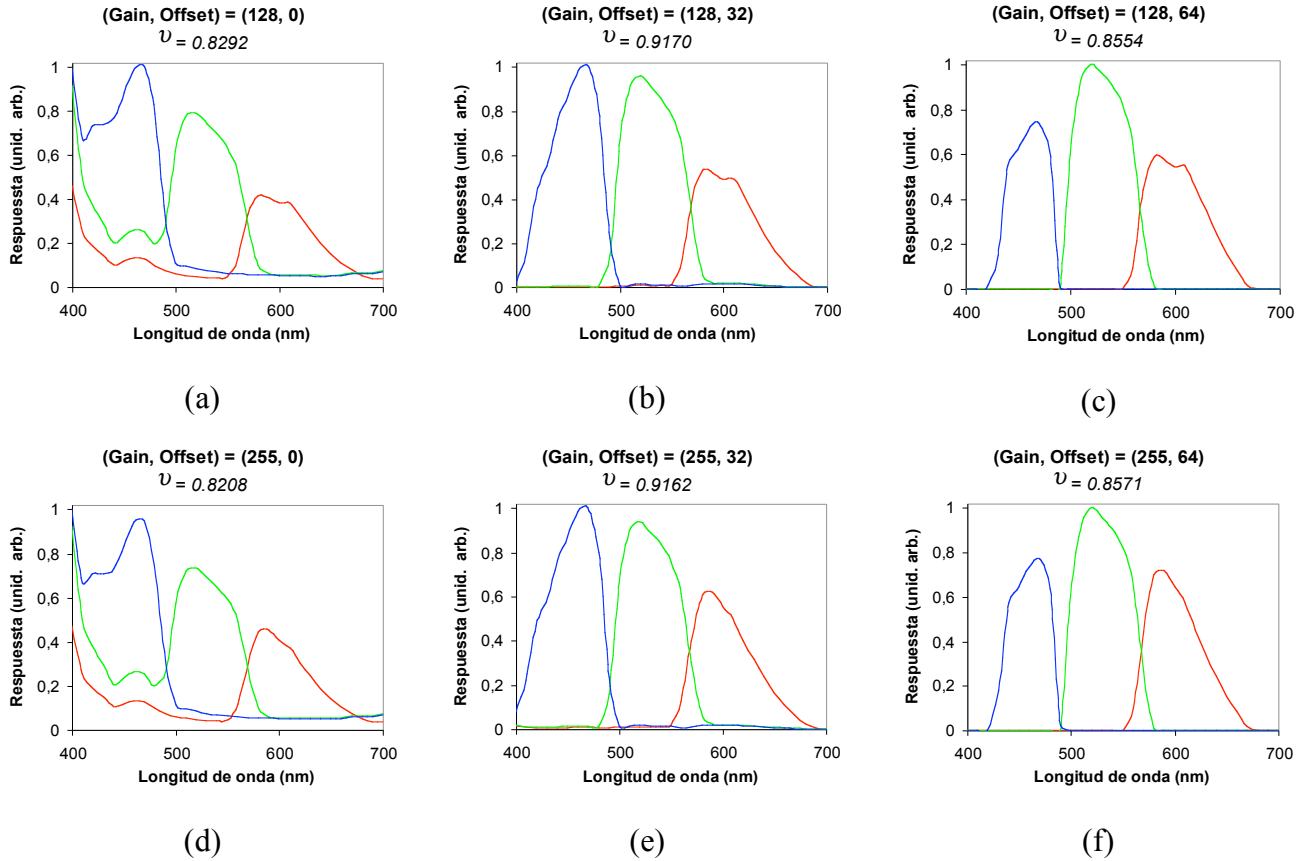


Figura 2.10 – Curvas de sensibilidad espectral de la cámara Sony DXC-9100P medida con diferentes valores de (*gain*, *offset*). En cada figura se indica el valor del factor de bondad Vora-Trussell ( $v$ ).

A partir de las diferentes curvas de sensibilidad presentadas en la Figura 2.10, de la distribución de energía espectral del simulador de luz de día  $D_{65}$ , y las funciones de igualación del observador patrón, se calculan los coeficientes de las transformaciones lineales que relacionan los valores triestímulos XYZ con los valores R, G, B proporcionados por la cámara para una configuración establecida de (*gain*, *offset*). Se sigue el procedimiento descrito en las referencias [Maloney 1986], [Simpson 1991], [Corbalán 2000]. Para la pareja (*gain*, *offset*) = (255, 32), se obtuvo la siguiente matriz de transformación lineal

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.947 & 0.237 & 0.373 \\ 1.155 & 1.000 & 0.103 \\ 0.062 & 0.112 & 2.179 \end{pmatrix}_{CSS} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Con los valores triestímulos XYZ, que ya son independientes de la cámara, se calculan las coordenadas CIELAB  $L^*a^*b^*$  siguiendo la formulación CIE 1976 [Wyszecki 1982], [Berns 2000], [Westland 2004]. Dicha formulación requiere de un blanco de referencia. Como blanco de referencia para estos cálculos se usan los valores  $X_n$ ,  $Y_n$  y  $Z_n$  obtenidos al captar la placa de reflectancia estándar Photoresearch RS-3 iluminada con el mismo tipo de iluminante, el simulador de  $D_{65}$ , empleado en la experiencia.

### ***Influencia del gain y offset en el registro de estímulos acromáticos.***

Se ha realizado una experiencia para evaluar la influencia de los valores de (*gain*, *offset*) seleccionados en las coordenadas CIELAB medidas por la cámara para la escala de muestras Munsell neutras (grises). Se aplica la transformación lineal (ecuación (2.5)) para obtener los valores XYZ a partir de los valores RGB registrados por la cámara bajo una determinada configuración de (*gain*, *offset*). Se emplea posteriormente la formulación CIE 1976 para calcular las coordenadas CIELAB. A continuación se comparan los datos colorimétricos obtenidos por la cámara con los obtenidos por el instrumento de referencia (espectrorradiómetro).

Varios valores de  $gain = \{128, 255\}$  y  $offset = \{0, 32, 64\}$  se han combinado para captar con la cámara las muestras grises de la escala Munsell. La Figura 2.11 muestra un gráfico de la luminancia CIELAB ( $L^*$ ) versus la componente *Value Munsell*. En dicho gráfico se representan conjuntamente los valores  $L^*$  medidos con el instrumento de referencia (línea continua negra) y con la cámara para las diversas condiciones de captación (*gain*, *offset*) consideradas. Todas las curvas revelan que la respuesta de la cámara está realmente cercana a la respuesta del espectrorradiómetro (línea negra) en la región clara de la escala de grises. Las curvas parecen bastante lineales y este hecho está en correspondencia con la escala casi lineal de las muestras neutras de Munsell. Entre los gráficos de respuesta de la cámara representados en la Figura 2.11, las curvas que corresponden a  $(gain, offset) = \{(128, 32), (255, 32)\}$  están muy cercanas a la respuesta del espectrorradiómetro a lo largo de toda la escala de grises.

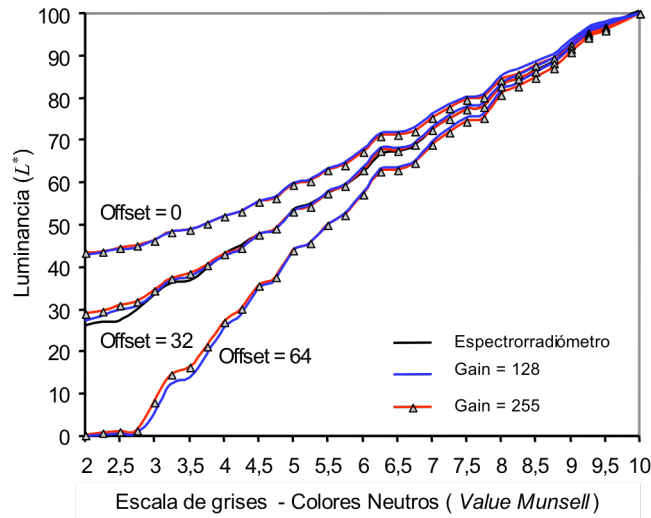


Figura 2.11 - Medida de  $L^*$  para la escala de grises

Por otro lado, si consideramos el plano cromático definido por las coordenadas CIELAB  $a^*$ ,  $b^*$ , todas las muestras grises deberían estar representadas por puntos cercanos al origen. Como la Figura 2.12 ilustra, esto es bastante cierto para las mediciones obtenidas por el espectrorradiómetro, salvo dos muestras *Munsell* con los valores de la componente *Value* más altos. Hay una desviación ligera hacia la región amarilla del plano cromático. Se incluye en la Figura 2.12 el grupo de datos que corresponden a la adquisición mediante cámara con las configuraciones de  $(gain, offset) = \{(128, 32), (255, 0), (255, 32)\}$ . Las medidas obtenidas con la cámara tienden a desviarse hacia el rojo o zona del rojo-naranja (valores de  $a^*$  y  $b^*$  positivos). El gráfico que corresponde a  $(gain, offset) = (255, 32)$  tiene sus valores comprendidos entre los otros dos gráficos de la cámara. Si comparamos los resultados de la Figura 2.11 y la Figura 2.12, se analiza lo siguiente: con respecto a la escala  $L^*$  (Figura 2.11), el par  $(gain, offset) = (255, 32)$  es mejor que el  $(gain, offset) = (255, 0)$ , pero analizando el plano cromático (Figura 2.12), se concluye lo contrario, es decir el par  $(gain, offset) = (255, 0)$  obtiene los resultados ligeramente mejores que el par  $(gain, offset) = (255, 32)$ .

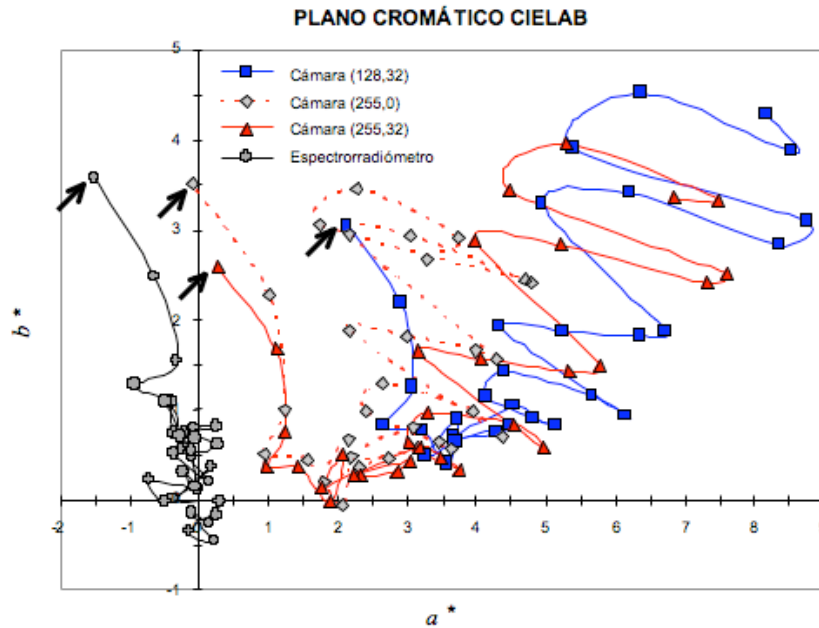


Figura 2.12 - Distribución de las muestras de grises en el plano cromático CIELAB. Las flechas indican las respuestas obtenidas para la muestra de  $V=9.5$ .

La Figura 2.13 reúne información contenida en la Figura 2.11 y Figura 2.12, y muestra la luminancia  $L^*$  versus el croma  $C_{ab}^*$ . Puede verse que, al usar la cámara, el par  $(gain, offset) = (255, 0)$  da los valores del croma más bajos para la escala de grises (indicado con flechas en la figura). Pero, por otro lado, también tienen importancia los valores de luminancia que se alcanzan con los pares  $(gain, offset) = \{(255, 32), (128, 32)\}$  y el recubrimiento que se hace de la escala de luminancia de las muestras. De nuevo, el gráfico que corresponde a  $(gain, offset) = (255, 32)$  es el preferible frente a los otros dos. Además, teniendo en perspectiva la región de interés de los colores pálidos (colores cuyo valor de *Value Munsell* está en el rango de 7.0 a 9.0), se observa que las curvas que corresponden a  $(gain, offset) = \{(255, 32), (255, 0)\}$  aparecen muy juntas en la Figura 2.13 y, de hecho, también en la Figura 2.11. En conclusión, todas estas consideraciones nos llevan a elegir finalmente la condición de  $(gain, offset) = (255, 32)$  frente a las otras estudiadas. Insistimos en que la selección del *offset* es más determinante que la del *gain* en el comportamiento analizado de la cámara y que podría admitirse cierta tolerancia en el valor del *gain* seleccionado.

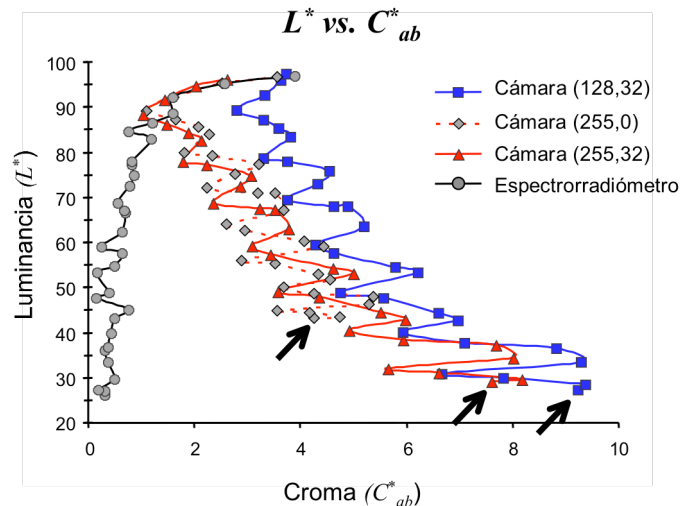


Figura 2.13 - Luminancia versus Cromo de la medidas de la escala de grises.

### Caracterización del ruido introducido por la cámara.

#### REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS

El contenido de este apartado se encuentra en la publicación del compendio con la siguiente referencia:

*Valencia, E., Millán, M. S., "Small color differences in the very pale and dark grayish regions measured by camera", J. Imaging Sci. Technol. 49(6), 605-619 (2005).*

Entre las diversas fuentes de ruido introducido en la adquisición de la imagen mediante cámara, nosotros hemos seguido el modelo de Quan y colaboradores [Quan 2002a] y hemos considerado la influencia del ruido de corriente oscura y del *shot noise*.

El ruido de corriente oscura es independiente de la señal y puede estimarse a partir de las fluctuaciones en la señal registrada cuando el sensor se expone en la oscuridad (ausencia de señal incidente). En nuestro caso, cuando el *offset* = 0, el ruido de corriente oscura en los canales R, G, y B presenta valores medios no nulos (un valor de 14 para el canal azul, y un valor de 15 tanto para el canal rojo como el verde) y una varianza similar  $\sigma_d^2$  (Figura 2.14). Para la configuración de *offset* = 32, obtenemos una distribución de valor medio no nulo pero muy cercano a cero (Figura 2.14). Este resultado para el nivel de corriente oscura revela una característica físicamente significativa de la cámara y sustenta nuestra selección de tomar finalmente el valor de *offset* = 32.



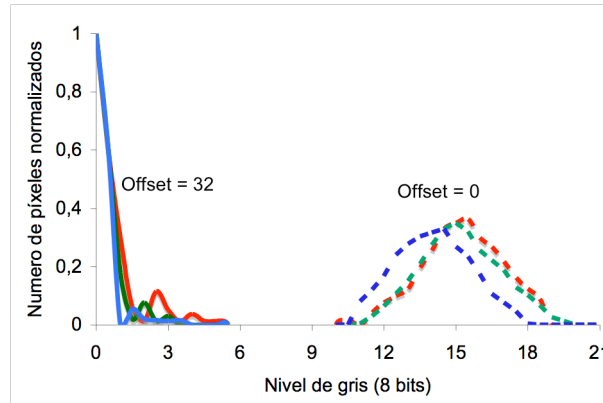


Figura 2.14 - Datos experimentales para la evaluación del ruido de corriente oscura (*Dark noise*) para una configuración de  $gain = 255$  y  $offset = \{0, 32\}$ . Se ha tomado como constante de normalización el área central de  $300 \times 300$  píxeles.

El *shot noise* es un ruido que depende de la señal, y se puede estimar a partir de las variaciones que se obtienen para una serie de señales de distinta intensidad. El coeficiente  $k$  asociado al *shot noise* se puede calcular ajustando los valores experimentales a la ecuación (2.3). Los niveles de ruido se representan mediante su valor digital normalizado al valor digital de la señal de mayor intensidad. Para caracterizar el ruido en la imagen registrada por la cámara, configurada con los valores de  $(gain, offset) = (255, 32)$ , nosotros captamos múltiples imágenes del patrón blanco calibrado, uniformemente iluminado, variando la apertura del objetivo de la cámara (incluyendo el caso de oclusión total). Las aperturas que producen saturación del sensor quedan excluidas de la experiencia. De esta forma tan simple, obtenemos una variación en el nivel de la señal de entrada sin modificar ninguna otra condición de captación. Se han calculado las varianzas de las componentes RGB en las imágenes captadas de la serie de señales de entrada. La Figura 2.15 presenta los valores experimentales y los resultados obtenidos tras ajustarlos a la ecuación (2.3) para los canales R, G, y B de la cámara. Los tres canales obtuvieron ajustes lineales muy próximos. Para el coeficiente  $k$  asociado al *shot noise* se obtuvieron los valores  $(k_R, k_G, k_B) = (3.318, 3.383, 3.218) \times 10^{-4}$ . Puesto que son valores muy próximos, consideramos el promedio,  $k = 3.306 \times 10^{-4}$ , como valor común para los tres canales. A partir de los valores de la ordenada en el origen de los datos experimentales ajustados se

obtuvieron las varianzas normalizadas  $\left( \frac{\sigma_{dR}^2}{\mu_{\max R}}, \frac{\sigma_{dG}^2}{\mu_{\max G}}, \frac{\sigma_{dB}^2}{\mu_{\max B}} \right) = (5.5, 6.5, 1.4) \times 10^{-6}$

para el ruido de corriente oscura. Los coeficientes de correlación de los ajustes  $(r_R, r_G, r_B) = (0.993, 0.995, 0.995)$  eran buenos.

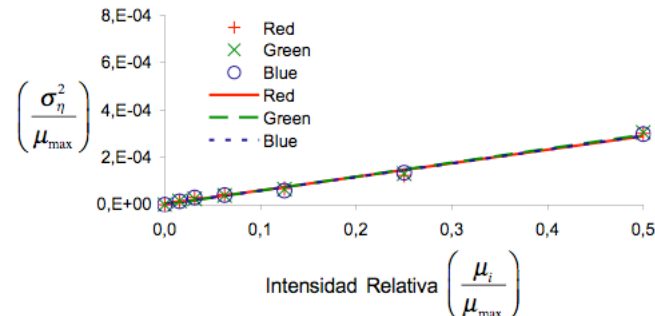


Figura 2.15 - Modelo de ruido para una cámara de arquitectura 3CCD con contribuciones de la corriente oscura y del shot noise. Valores experimentales para la videocámara Sony DXC-9100P y ajustes lineales para los tres canales R, G y B

### **Transformación lineal de RGB a XYZ basada en la Medida Unificada de la Bondad (UMG)**

Hemos calculado los coeficientes de la matriz de transformación lineal de los valores RGB a valores XYZ considerando la medida unificada de bondad UMG propuesta por Quan y colaboradores [Quan 2002a]. El cálculo incorpora, junto a la caracterización espectral, la caracterización del ruido introducido por la cámara, de modo que la transformación lineal se obtiene imponiendo la minimización de la propagación del ruido. El modelo de ruido asumido en [Quan 2002a] es un ruido de valor medio cero, cuya varianza tiene como principales contribuciones las que proceden del ruido de corriente oscura y del *shot noise*. La métrica UMG minimiza el valor medio de las diferencias de color (o error) para un conjunto de muestras estándar distribuidas en un espacio de color uniforme. En primera aproximación hemos considerado diferencias de color CIELAB aunque se podrían utilizar diferencias de color con otras fórmulas como por ejemplo CIEDE2000. Como conjunto representativo de muestras estándar utilizamos el conjunto de Hardeberg [Hardeberg 1998], compuesto por 20 muestras Munsell (Tabla 2.4) que se distribuyen de manera aproximadamente uniforme en el plano cromático CIELAB  $(a^*, b^*)$ .

Tabla 2.4

<b>Conjunto Hardeberg de 20 muestras Munsell</b>			
7.5RP9/2	10R7/12	10B6/10	7.5PB5/12
5R4/14	7.5RP6/10	10Y8/4	10Y8.5/6
7.5Y8/12	2.5B5/8	7.5YR8/8	10PB4/10
2.5G7/10	10P3/8	10RP8/6	10YR3/1
5P2.5/6	7.5R7/4	10R3/2	7.5YR6/4

Además de la reflectancia espectral medida experimentalmente por nosotros para cada muestra del conjunto Hardeberg, tuvimos en cuenta los siguientes datos para el cálculo de la UMG y los coeficientes de la matriz de transformación  $M_{UMG}$ : las curvas de sensibilidad espectral RGB de la cámara, la caracterización del ruido de imagen (varianza del ruido de corriente oscura y el coeficiente  $k$  asociado al *shot noise*), la distribución de energía espectral del iluminante (simulador de luz de día  $D_{65}$ , Figura 2.7), y las funciones de igualación del color de la CIE del observador patrón. El procedimiento de cálculo de la UMG y de la matriz  $M_{UMG}$  (véase [Quan 2002a] para una información más detallada) es más complejo y requiere más tiempo de cómputo que el cálculo del factor  $\nu$  de Vora-Trussell y la matriz  $M_{CSS}$ .

Hemos obtenido los siguientes resultados:

- La transformación lineal es

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.761 & 0.319 & 0.206 \\ 0.867 & 1.139 & 0.003 \\ -0.075 & 0.009 & 1.886 \end{pmatrix}_{UMG} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

- El error o diferencia de color minimizada para el conjunto Hardeberg es  $\varepsilon_{\min} = 1.423$  unidades CIELAB
- La medida unificada de bondad UMG es igual a  $\theta = 0.899$ .

Hacemos notar que el valor UMG ( $\theta = 0.899$ ) es menor que el valor del factor  $\nu$  ( $\nu = 0.9162$ ). Puesto que los efectos del ruido son tenidos en consideración en la métrica UMG, ésta proporciona una medida más completa de la bondad de la cámara y, consecuentemente, su valor es inferior al del factor  $\nu$ , que caracteriza exclusivamente la desviación del subespacio de color de la cámara respecto al de la visión humana.

### 2.3.2 Cámara fotográfica Sigma SD-9 con sensor multicapa

#### REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS

*El contenido de este apartado se encuentra en la publicación del compendio con la siguiente referencia:*

Millán, M. S., Valencia, E., Corbalán, M., Gastón, G. "A comparison of a multi-layer silicon sensor camera and a 3CCD camera for measuring small colour differences" en *10th Congress of the International Colour Association – AIC Colour 05*, ISBN: 84-609-5162-6, 299-302, Granada, España, 2005.

#### ***Caracterización espectral. Curvas de sensibilidad espectral. Medida de bondad (factor $v$ ).***

Se ha repetido el procedimiento de caracterización espectral para la cámara fotográfica digital de sensor multicapa. Esta cámara no dispone de controles de *gain* y *offset*, por lo que el procedimiento se simplificó notablemente. Se analizaron los valores de apertura y tiempo de exposición que pudiesen permitir mayor rango de muestras adquiridas sin variar las condiciones de captación. Resultaron unos valores de  $(f/\#)=8$  para la apertura y  $(1/30)$ s para el tiempo, que permanecieron fijos a lo largo de toda la experiencia a fin de poder comparar las medidas.

En la caracterización espectral de esta cámara no se utilizó el monocromador porque la fuente de luz no tenía la energía suficiente ni la cámara la sensibilidad necesaria para poder registrar las señales. En su lugar, se utilizó la opción de interponer filtros interferenciales de banda estrecha (en promedio de 9.5 nm de anchura de banda, ver Tabla 2.1) entre la lámpara halógena y la cámara (Figura 2.2a). Las curvas de sensibilidad espectral de los canales RGB que se obtubieron como resultado de las medidas se representan en la Figura 2.16.

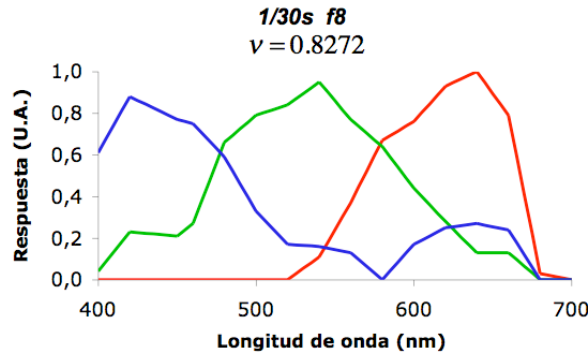


Figura 2.16 - Curvas de sensibilidad espectral RGB de la cámara Sigma SD-9 con sensor multicapa.

El cálculo del factor de bondad Vora-Trussell o factor  $\nu$  para las curvas de la Figura 2.16 proporciona el valor  $\nu = 0.827$ , que es inferior al que se obtuvo para la cámara Sony 3CCD ( $\nu = 0.916$ ). Esto indica que la cámara Sony 3CCD tiene unas sensibilidades espectrales que se acercan más a las del observador humano patrón que las sensibilidades de la cámara Sigma SD-9. Utilizando las sensibilidades espectrales de la Figura 2.16, el simulador de iluminante de luz de día  $D_{65}$  (Figura 2.7), las curvas de igualación de la CIE y siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó con la cámara 3CCD, hemos calculado los coeficientes de la matriz de transformación de valores RGB a XYZ. El resultado obtenido para la cámara Sigma SD-9 es la transformación:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.054 & 0.161 & 0.315 \\ 0.353 & 0.956 & -0.251 \\ -0.185 & -0.393 & 2.256 \end{pmatrix}_{CSS} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

**Caracterización del ruido introducido por la cámara.**

El procedimiento que se empleó para evaluar el ruido de corriente oscura y el *shot noise* en la cámara de sensor multicapa es similar al empleado en la evaluación de la cámara 3CCD, el cual se estima a partir de las variaciones de se obtienen para una serie de señales de distinto nivel de intensidad. El coeficiente  $k$  asociado al *shot noise* se puede calcular ajustando los valores experimentales a la ecuación (2.3). Los niveles de ruido se representan mediante el valor digital de la varianza normalizado al valor digital de la señal de mayor intensidad.

Para caracterizar el ruido en la imagen registrada por la cámara de sensor multicapa, se fija el tiempo de exposición a 1/30 s y se registran múltiples imágenes del patrón blanco calibrado el cual está uniformemente iluminado, variando la apertura del objetivo de la cámara (desde la oclusión total hasta el primer nivel de saturación o de máxima apertura). De esta forma, obtenemos una variación en el nivel de la señal de entrada sin modificar ninguna otra condición de captación. La Figura 2.17 presenta los valores experimentales de la varianza normalizada obtenidos con la cámara Sigma SD-9. Los tres canales obtuvieron ajustes lineales muy próximos. Para el coeficiente  $k$  asociado al *shot noise* se obtuvieron los valores  $(k_R, k_G, k_B) = (1.472, 1.452, 1.541) \times 10^{-3}$ . Puesto que son valores muy próximos, consideramos el promedio,  $k = 1.488 \times 10^{-3}$ , como valor común para los tres canales. Comparando con el valor  $k$  obtenido para la cámara 3CCD ( $k = 3.306 \times 10^{-4}$ ) observamos que la influencia del *shot noise* en la cámara del sensor multicapa es unas 4.5 veces mayor que en la cámara 3CCD. A partir de los valores de la ordenada en el origen de los datos experimentales ajustados se obtuvieron

las varianzas normalizadas  $\left( \frac{\sigma_{dR}^2}{\mu_{\max R}}, \frac{\sigma_{dG}^2}{\mu_{\max G}}, \frac{\sigma_{dB}^2}{\mu_{\max B}} \right) = (-1.076, -1.433, -1.990) \times 10^{-4}$

para el ruido de corriente oscura. No tiene sentido obtener valores negativos para estas varianzas y este resultado sólo cabe explicarlo por tratarse de valores muy pequeños y, por ser ajustes con coeficientes de correlación no muy altos. Los coeficientes de correlación de los ajustes  $(r_R, r_G, r_B) = (0.984, 0.982, 0.982)$ , aunque pudieran ser considerados aceptables, son inferiores a los obtenidos en los ajustes realizados para la cámara 3CCD.

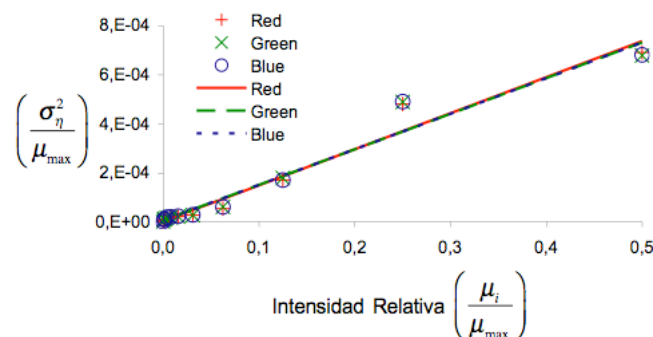


Figura 2.17 – Modelo de ruido para una cámara de arquitectura de sensor multicapa con contribuciones de la corriente oscura y del *shot noise*. Valores experimentales de la varianza normalizada para evaluar el ruido de la imagen usando la cámara fotográfica Sigma SD-9

No se ha completado el trabajo de obtener la UMG ni la matriz de conversión  $M_{UMG}$  para esta cámara, como se ha realizado con la cámara 3CCD, porque todos sus parámetros de bondad son inferiores a los de la cámara 3CCD. Por lo tanto, reduciremos el número de pruebas a realizar por la cámara de sensor multicapa, optamos preferentemente por la cámara 3CCD.

## 2.4 Medida del color mediante cámara

### REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS

*El contenido de este apartado se encuentra en las publicaciones del compendio con las siguientes referencias:*

Millán, M. S., **Valencia, E.**, Corbalán, M., "3CCD Camera's capability for measuring color differences: experiment in the nearly neutral region", *App. Opt.* **43**(36), 6523-6535 (2004).

**Valencia, E.**, Millán, M. S., "Small color differences in the very pale and dark grayish regions measured by camera", *J. Imaging Sci. Technol.* **49**(6), 605-619 (2005).

**Valencia, E.**, Millán, M. S. "Measuring small color differences in the nearly neutral region by 3CCD camera" en *The Iberoamerican Meeting on Optics and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications RIAO-OPTILAS 2004, Proc. SPIE* **5622**, ISBN: 0-8194-5575-X, Marcano O., A., Paz, J. L. ed., 1253-1258, Isla Margarita, Venezuela, 2004.

Millán, M. S., **Valencia, E.**, "Camera's performance in measuring small colour differences in the nearly neutral region" en *Proc. IS&T, CGIV 2004, the 2nd European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, ISBN: 0-89208-250-X, 469-474, Aachen, Germany, 2004.

En esta parte del trabajo experimental se compara la medida del color obtenida por la cámara con la que se obtiene mediante el instrumento de referencia (espectrorradiómetro) en las mismas condiciones de iluminación/observación (Figura 2.18).

### 2.4.1 Condiciones de captación

El sistema de adquisición de imagen en color por cámara comprende una cámara, un ordenador, un sistema de iluminación y la configuración geométrica de las direcciones de iluminación y observación. En el caso de utilizar la videocámara 3CCD, se requiere una tarjeta de digitalización que suele ir integrada en la unidad de procesado del ordenador. En el caso de la cámara fotográfica, la imagen digital puede leerse directamente en el ordenador. Como escena a captar, en primer lugar se utilizan muestras Munsell de la colección mate.

Utilizamos una cabina de observación estándar (VeriVide CAC 120H4) dotada de una fuente de luz calibrada (simulador de luz de día  $D_{65}$ ) y una geometría de iluminación/observación que evite la componente de reflexión especular en la adquisición de la escena. Cuando se utiliza la cámara 3CCD, se ajusta el objetivo y la distancia de trabajo de modo que la extensión de una sola muestra Munsell mate ( $\approx 3.5 \text{ cm}^2$ ) ocupe todo el campo de visión. Cuando se probó el estándar de iluminación a  $45^\circ$ , se observó cierto ruido o efecto indeseado de sombreado originado por la rugosidad superficial de las muestras. Puesto que las muestras son mate, la elección de la dirección de iluminación no ha de ser crítica para realizar la medida del color y evitar la componente especular. Por ello, para reducir el ruido, utilizaremos una iluminación a  $20^\circ$  con la normal a la superficie de la muestra en todas las medidas. En el interior de la cabina, se comprobó con un luxómetro que la iluminación era bastante uniforme en la plataforma donde se sitúa la muestra (Figura 2.18). Esto no es crítico en nuestro trabajo ya que las muestras son relativamente pequeñas ( $\approx 3.5 \text{ cm}^2$ ). A la dirección de iluminación a  $20^\circ$  habría que sumarle una iluminación difusa por reflexión en las paredes de la cabina. No obstante, estas consideraciones tienen una importancia muy reducida cuando se miden pequeñas muestras de superficie muy difusora tal y como sucede en nuestro caso con las muestras Munsell de la colección mate. En cuanto a la dirección de observación, la cámara se sitúa en la normal a la superficie de la muestra. En nuestro caso, una observación frontal es preferible a una inclinada porque, adelantándonos a posteriores aplicaciones, es la dirección que más se utiliza para captar imágenes ya que reduce los errores de enfoque y las distorsiones de campo producidas por la perspectiva. Por tanto la configuración iluminación/observación empleada es 20/0



(Figura 2.18). Esta será también la configuración utilizada para las medidas efectuadas con el espectrorradiómetro Photo Research PR-715, que operará con apertura de  $1^\circ$ .

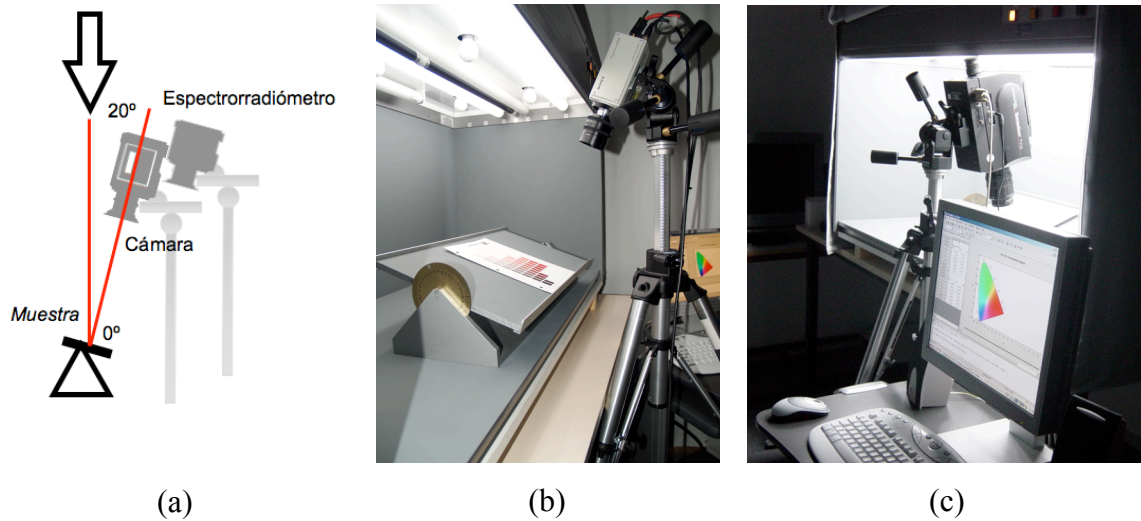
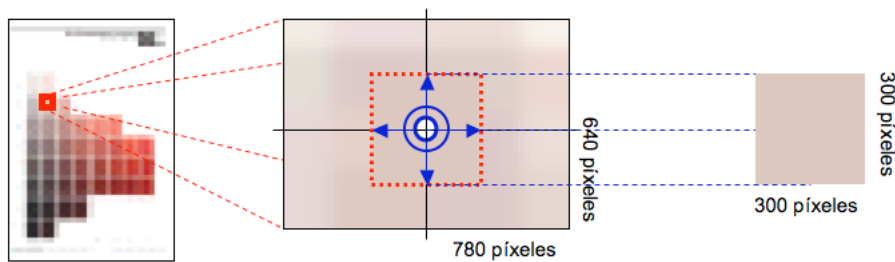


Figura 2.18 - (a) Condiciones de Iluminación/Observación = 20/0. (b) y (c) Fotografías del montaje experimental

Utilizamos la cámara 3CCD en las mismas condiciones con las que se ha caracterizado en los apartados anteriores: función gamma deshabilitada, balance del blanco ajustado automáticamente a la temperatura de color de 6,500 K de la luz de día  $D_{65}$ , referencia de negro correspondiente a la oclusión total de la apertura de la cámara, referencia del blanco correspondiente al patrón de reflectancia Photoresearch RS-3, apertura del objetivo fija ( $f/\# = 4$ ). Las imágenes son digitalizadas utilizando 8 bits (256 niveles de gris) en cada componente o canal R, G, B. En la conversión analógico/digital se consideran dos posibles combinaciones de  $(gain, offset) = \{(255, 32), (255, 0)\}$ .

Obtenemos imágenes de 640 x 780 píxeles de cada muestra Munsell captada por la cámara (Figura 2.19). Sin embargo, sólo analizamos una zona central cuadrada. De este modo, nos limitamos a la zona paraxial, donde aprovechamos las propiedades de una mejor calidad en la formación de imágenes del objetivo, y además, se reducen las posibles deficiencias de uniformidad en la iluminación. Aunque inicialmente se consideraron dos posibles tamaños para la zona de trabajo, de 500x500 píxeles y de 300x300 píxeles, pronto se observó que los valores RGB medios y las desviaciones estándar de estas zonas apenas variaban en un conjunto de imágenes de diversas

muestras de color uniforme. Por eso, nos decidimos a utilizar las ventanas pequeñas de 300x300 píxeles (Figura 2.19).



- El área de la muestra de color Munsell es alrededor de  $3.5\text{cm}^2$

Figura 2.19 - Área de análisis de una muestra de color Munsell.

#### 2.4.2 Elaboración del test

Las cartas de color reúnen un surtido de muestras estándar que pueden utilizarse para la caracterización de cámaras y otros dispositivos de adquisición y reproducción de imagen en color. Uno de los test más utilizados es la carta GretagMacbeth Color-Checker [McCamy 1976] aunque sólo contiene 24 muestras. En otros casos [Berns 2002] y también como haremos nosotros en este trabajo de tesis, se diseñan y se utilizan tests especiales que contienen un gran número de muestras.

Nosotros caracterizamos el comportamiento de la cámara cuando capta la imagen de un amplio test de muestras de color uniforme. En particular centramos nuestra atención en la región del espacio de color correspondiente a los colores poco saturados, o casi neutros. Además de otras circunstancias ya descritas en la introducción, esta región representa un cierto desafío para el instrumento. Los colores casi neutros constituyen una estimulación muy similar de los tres canales de sensibilidad roja, verde y azul de la cámara y, por tanto, las pequeñas diferencias entre estos colores implican variaciones muy sutiles sobre una señal de fondo constante casi uniforme ante la cual ponemos a prueba la capacidad de discriminación de la cámara. También se da la circunstancia de que disponíamos de dos colecciones Munsell de muestras mate para la realización del estudio: el libro de color y la colección de muestras casi neutras. Esto nos ha permitido generar tests compuestos por un gran número de muestras.

### *Test de colores claros (pálidos)*

Inicialmente, seleccionamos 10 muestras que se distribuyen uniformemente sobre el círculo de tono, tienen un croma bajo (2.0) y un valor (*Value Munsell*) alto (8.0). Cada una de estas muestras seleccionadas será comparada con sus vecinas más próximas en el sistema Munsell. Siguiendo la especificación Munsell de Tono Valor/Croma, las vecinas corresponden a variaciones de  $\pm 2.5$  Tono,  $\pm 0.5$  Valor,  $\pm 0.5$  y  $\pm 1.0$  Croma respecto de cada una de las diez muestras seleccionadas inicialmente. La Figura 2.20 representa la distribución de las muestras de este test en el espacio Munsell. El esquema presenta sombreadas las muestras seleccionadas inicialmente sobre el círculo de tono. Cada una de estas muestras ocupa el centro de un grupo formado por ella misma y sus vecinas (sólo se muestra completo el grupo centrado en **5B 8/2** en la Figura 2.20). Este test de colores pálidos consta de 90 muestras Munsell mate.

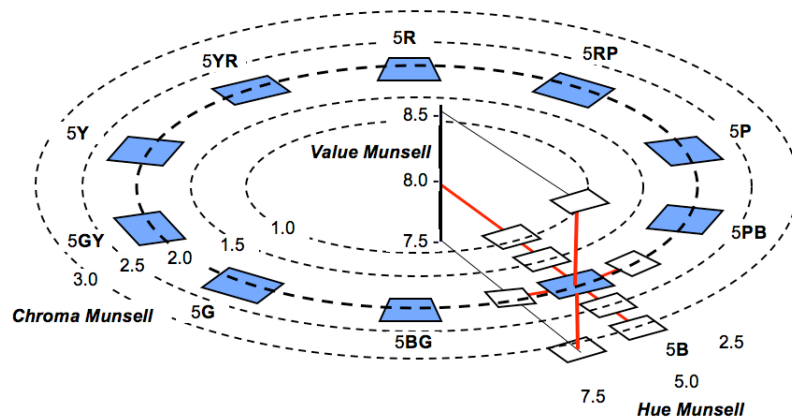


Figura 2.20 - Test de colores claros (pálidos). Sobre cada muestra en el círculo de tono Munsell se agrupa un conjunto de muestras como el que se representa para la muestra **5B 8/2**.

### *Test de colores oscuros (grisáceos)*

En este test seleccionamos inicialmente un conjunto de diez muestras distribuidas sobre el círculo de tono del mismo modo que en el test anterior, con croma bajo (2.0) y ahora con valor de *Value Munsell* bajo (4.0). Alrededor de cada una se consideran sus muestras vecinas, que distan de la muestra central en  $\pm 2.5$  Tono,  $\pm 1.0$  Valor y  $(+2.0, -1.0)$  Croma. La Figura 2.21 representa la distribución de las muestras de este test en el espacio Munsell, con el grupo centrado en **5B 4/2** al completo. Este test de colores oscuros consta de 70 muestras Munsell mate.

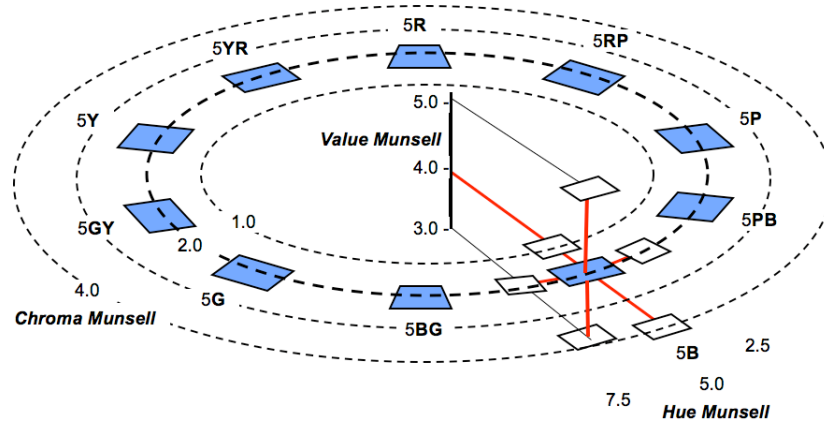


Figura 2.21 - Test de colores oscuros (grisáceos). Sobre cada muestra en el círculo de tono Munsell se agrupa un conjunto de muestras como el que se representa para la muestras **5B 8/2**.

### 2.4.3 Medida (absoluta) del color mediante la cámara 3CCD

En este apartado se compara la medida del color de una muestra Munsell obtenida utilizando la cámara 3CCD con la medida que proporciona el instrumento de referencia (espectrorradiómetro) en las mismas condiciones. Esta comparación se extiende al conjunto de las muestras del test de colores pálidos y se hace una valoración global de la capacidad de la cámara para la medida absoluta del color.

Hemos medido las coordenadas CIELAB, el croma  $C_{ab}^*$  y el tono  $h_{ab}$  de las muestras del test de colores pálidos (Figura 2.20) mediante el espectrorradiómetro y la cámara 3CCD en dos condiciones de captación  $(gain, offset) = \{(255, 32), (255, 0)\}$ . En la Figura 2.22 presentamos los resultados graficados para los grupos: (a) **5YR 8/2**, (b) **5G 8/2**, (c) **5B 8/2** y (d) **5P 8/2**, como casos representativos de los restantes. Para cada uno de los grupos, se presentan tres figuras (de izquierda a derecha):

- A la izquierda, se ilustra el plano cromático  $a^*$ ,  $b^*$  con los puntos que corresponden al centro de grupo y a las muestras vecinas que representan variaciones en la componente de croma (*Chroma Munsell*) o variaciones en la componente de tono (*Hue Munsell*) con respecto al centro;
- En el centro, se ilustra el diagrama de la luminancia  $L^*$  en función del croma  $C_{ab}^*$ , con los puntos que corresponden al centro de grupo y a las muestras vecinas que

representan las variaciones en la componente valor (*Value Munsell*) o variaciones de la componente croma con respecto al centro;

- A la derecha, se ilustra el diagrama de la luminancia  $L^*$  en función del croma  $C_{ab}^*$ , con los puntos que corresponden al centro de grupo y a las muestras vecinas que representan únicamente las variaciones en la componente de tono con respecto al centro.

En los diagramas de la Figura 2.22, se puede apreciar que, en general, los valores medidos por el espectroradiómetro no coinciden con aquéllos medidos por la cámara. Pero, por otro lado, hay cierta similitud, entre las posiciones relativas de unos y otros valores. Estas primeras valoraciones de los resultados experimentales nos llevan a intuir la existencia de un error apreciable en la medida absoluta del color mediante la cámara y de un error mucho menor en la medida de las diferencias de color.

Así, volviendo a la Figura 2.22, diagramas de la izquierda, las variaciones en croma Munsell aparecen ordenadas radialmente en el plano cromático  $a^*$ , y las variaciones en el tono Munsell aparecen con una distribución predominantemente angular en el mismo plano.

Como era de esperar para ambos dispositivos en los diagramas centrales  $L^*C_{ab}^*$  de la Figura 2.22, las variaciones en el croma Munsell permanecen con luminancia casi constante, y paralelamente, las variaciones de Valor Munsell ocasionan variaciones en luminancia pero son casi constantes en croma.

En las gráficas de la Figura 2.22 situadas a la derecha, las variaciones de la componente de tono Munsell apenas generan variaciones de  $L^*$  y  $C_{ab}^*$  apreciables por uno u otro instrumento, tal y como era de esperar. Esto se puede ver en que el centro del grupo y sus vecinos en tono Munsell aparecen apiñados en un simple punto relativamente pequeño.

Además de los resultados mostrados en la Figura 2.22 para los cuatro grupos, se han obtenido los resultados para el resto de los grupos. Todos ellos se ven bastante uniformes para la respuesta de la cámara a lo largo de las diferentes regiones de color.

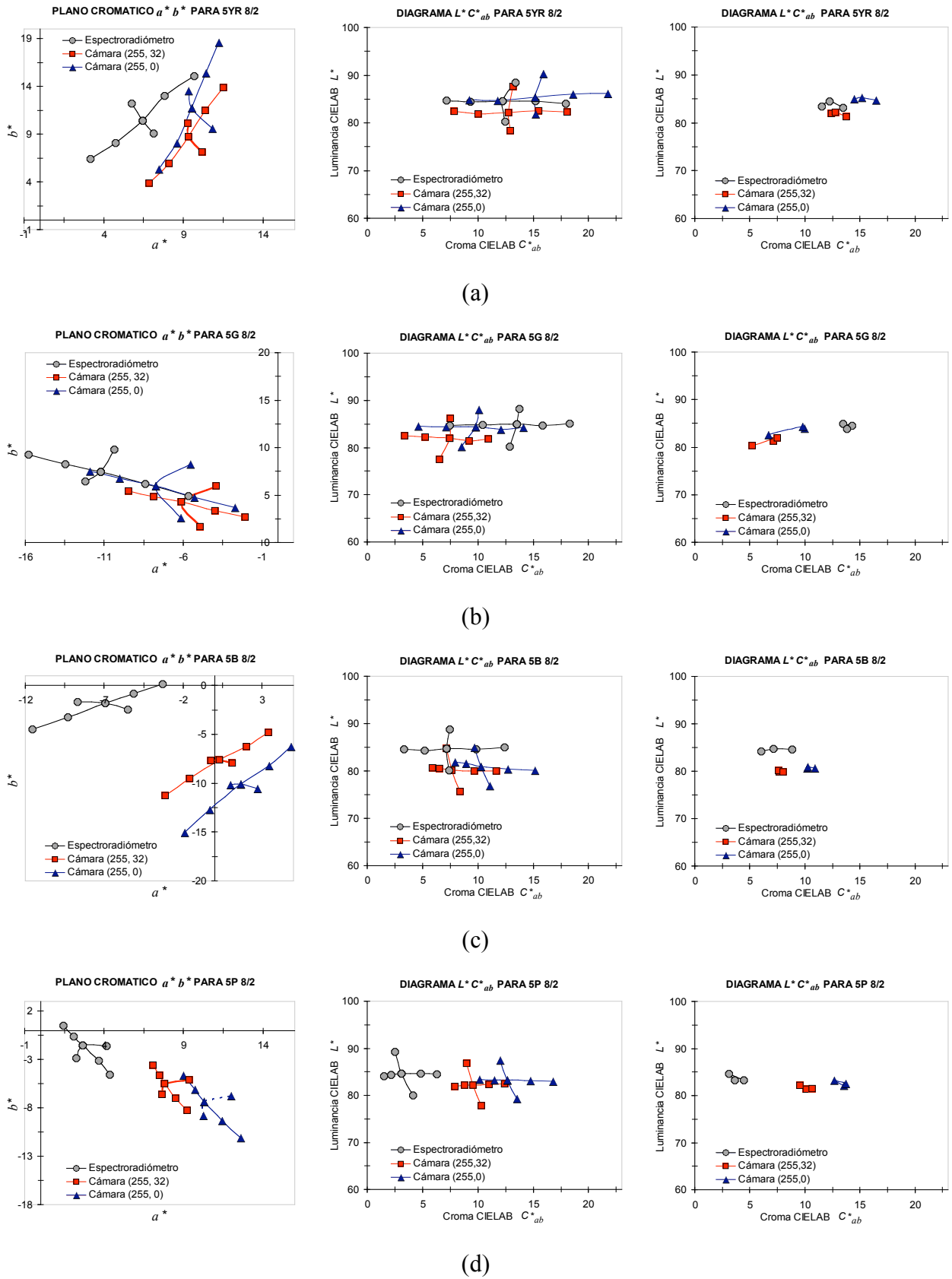


Figura 2.22 - Medidas (absolutas) CIELAB de muestras Munsell obtenidas mediante la cámara, para dos configuraciones (*gain, offset*), y el espectrorradiómetro. Relación entre muestras vecinas y el centro para los siguientes grupos (se especifica el centro de grupo): (a) 5YR 8/2, (b) 5G 8/2, (c) 5B 8/2, y (d) 5P 8/2.

Si, basándonos en la Figura 2.22, se comparan los resultados del espectrorradiómetro con los obtenidos por la cámara para las dos condiciones de captura  $(gain, offset) = \{(255, 32), (255, 0)\}$ , se puede decir que, en la valoración de este aspecto, ambas condiciones de captura llevan a resultados bastante similares y ninguna de ellas aparece como claramente ventajosa frente a la otra.

***Comparación de medidas (absolutas) del color calculadas mediante las transformaciones  $M_{CSS}$  y  $M_{UMG}$***

La Figura 2.23 muestra, en el plano  $a^*$ ,  $b^*$ , los puntos correspondientes a los valores deromaticidad CIELAB obtenidos para las muestras centro de grupo de los tests de colores pálidos y de colores oscuros. Las muestras de color se han medido utilizando el espectrorradiómetro y mediante la cámara 3CCD con configuración  $(gain, offset) = (255, 32)$ . En las medidas realizadas por la cámara se han tenido en cuenta dos transformaciones lineales: la que corresponde a una caracterización exclusivamente espectral de la cámara, con matriz de transformación  $M_{CSS}$  (ecuación (2.5)), y la que incluye también una caracterización del ruido, con matriz de transformación  $M_{UMG}$  (ecuación (2.6)).

Para cada muestra hemos calculado el error a través de la diferencia de color entre los valores CIELAB medidos por el espectrorradiómetro y los medidos por la cámara. El valor medio de las diferencias de color calculadas para el conjunto de 90 muestras del test de colores pálidos y el conjunto de 70 muestras del test de colores oscuros se indica en la Tabla 2.5. También se indica el valor correspondiente al test de colores oscuros. Los resultados son bastante próximos para ambos tests y también para las dos transformaciones lineales consideradas. Los valores indican que la fidelidad en la medida del color mediante la cámara está limitada por un error medio de 7.0 unidades CIELAB. Aunque la transformación lineal basada en la matriz  $M_{UMG}$  genera un error (o valor medio de las diferencias de color) mayor que la basada en la matriz  $M_{CSS}$ , (alrededor de 1.0 unidad CIELAB mayor) la desviación estandar es menor. Esto indica que la transformación basada en la matriz  $M_{CSS}$  permite medir el color con una exactitud ligeramente mayor, mientras que la transformación basada en la matriz  $M_{UMG}$  permite medir el color con una precisión ligeramente mayor (menor error).

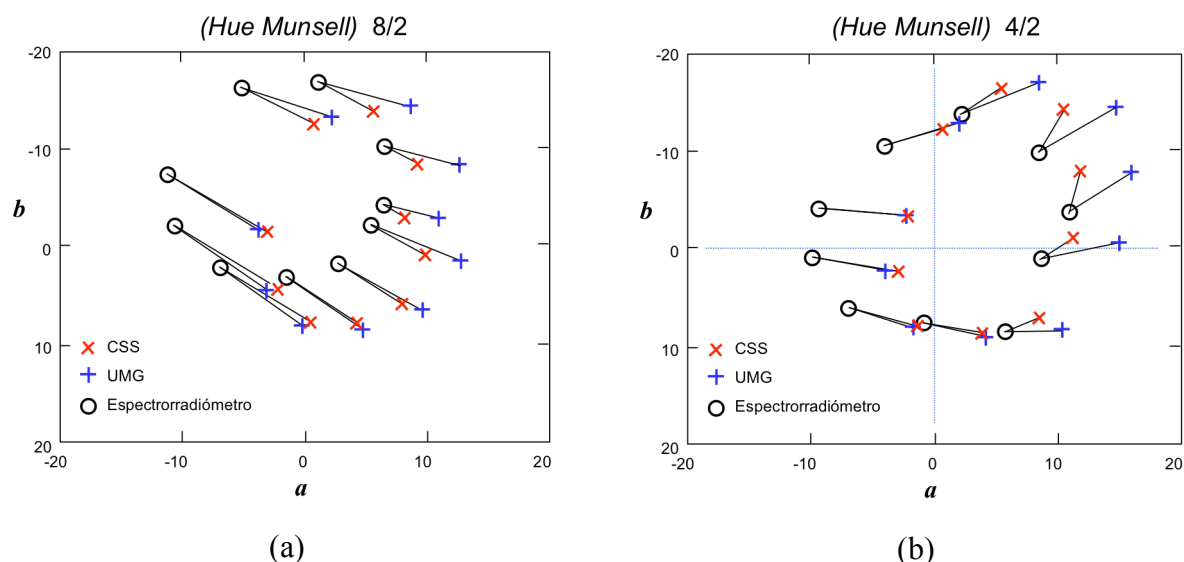


Figura 2.23 - Plano cromático con los valores CIELAB  $a^*b^*$  de las muestras centros de grupo medidos por el espectrorradiómetro y por la cámara 3CCD. En las medidas efectuadas por la cámara se han tenido en cuenta dos transformaciones lineales: ecuación (2.5) (CSS) y la ecuación (2.6) (UMG). (a) Resultados para el test de colores pálidos (Value/Croma Munsell = 8/2) y (b) para el test de colores oscuros (Value/Croma Munsell = 4/2).

Tabla 2.5 - Estadística de los errores o las diferencias de color calculadas entre los valores medidos por la cámara y por el espectrorradiómetro para cada muestra Munsell de las indicadas en la Figura 2.23. Se han considerado dos transformaciones lineales: ecuación (2.5) (CSS) y la ecuación (2.6) (UMG)

Errores o diferencias de color entre los valores CIELAB medidos por la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro						
Diferencias de color CIELAB	Claros		Oscuros		media	
	CSS	UMG	CSS	UMG	CSS	UMG
$Mean(\overline{\Delta E_{ab}^*})$	6.29	7.40	5.96	6.78	6.13	7.09
$std. dev.(\sigma)$	2.33	1.43	1.70	0.99	2.02	1.21
$Max(\{\Delta E_{ab}^*\}_{max})$	10.48	9.99	9.87	9.35		
$Min(\{\Delta E_{ab}^*\}_{min})$	1.19	3.70	3.38	5.06		
Diferencias de color CIEDE2000						
$Mean(\overline{\Delta E_{00}})$	7.25	8.50	6.68	7.61	6.97	8.06
$std. dev.(\sigma)$	2.85	1.75	2.40	1.63	2.63	1.69
$Max(\{\Delta E_{00}\}_{max})$	11.60	11.46	11.95	13.30		
$Min(\{\Delta E_{00}\}_{min})$	0.90	3.84	3.14	4.60		