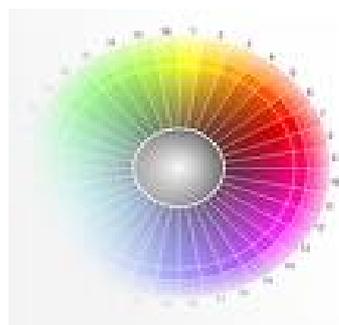
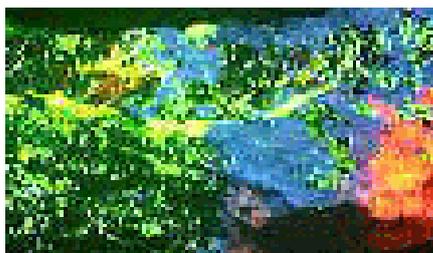
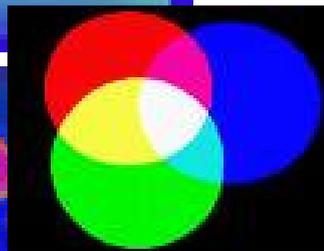
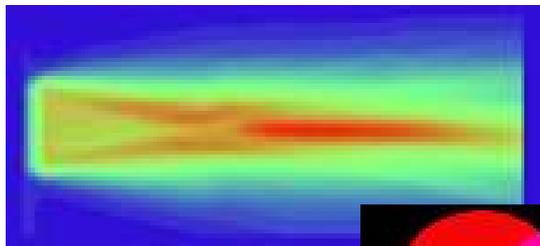
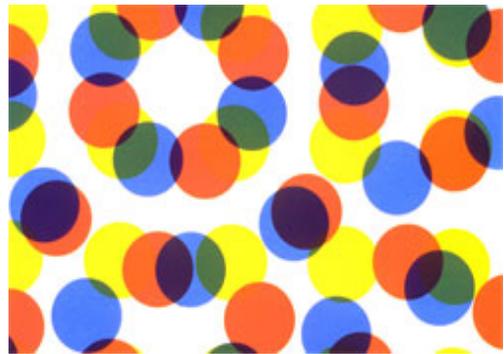
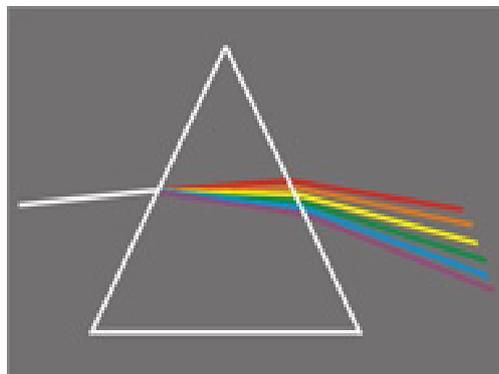


# ***CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL COLOR***

**SEMINARIO 2009 DE LA RED TEMÁTICA**



Título: Ciencia y Tecnología del Color. Seminario 2009 de la Red Temática.

Editores: Joaquín Campos Acosta y Rafael Huertas Roa, Red Temática  
“Ciencia y Tecnología del Color”

ISBN:

# Gonio-Espectrofotómetro para Medida de BSDF con Baja Incertidumbre

A. M. Rabal, J. L. Fontecha, A. Ferrero, A. Pons, J. Campos y A. Corróns

Dpto. de Metrología, Instituto de Física Aplicada, CSIC, C/. Serrano, 144. 28006 Madrid  
Email: rabal@ifa.cetef.csic.es

## Resumen

La función *BSDF* (Bidirectional Scatter Distribution Function) de una superficie describe la dispersión de la radiación óptica que se produce en esa superficie en todas las direcciones del espacio para cualquier dirección de iluminación de la muestra. Por tanto, el conocimiento de esta función es muy importante porque a partir de ella se pueden determinar todos los factores de reflectancia de la superficie y obtener la información que se necesita para aplicaciones en las que intervenga esa superficie, como es el caso de modelos de iluminación o estimación de apariencia.

**Palabras clave:** BSDF, BRDF, gonio-espectrofotómetro, Radiometría.

## 1. Introducción

La medida de la *BSDF* es compleja, por lo que hasta hace poco tiempo no se ponía mucho empeño en ella teniendo en cuenta que las superficies habituales se podían manejar con aproximaciones a superficies lambertianas y teorías simplificadas como la de Kubelka-Munk. Sin embargo, al aparecer con amplia difusión las superficies estructuradas complejas, la medida de la función *BSDF* ha tomado nueva relevancia, ya que no hay otra forma de evaluar correctamente y completamente las propiedades de estas superficies complejas.

En el Instituto de Física Aplicada del CSIC, al igual que han hechos otros laboratorios de prestigio, se ha diseñado y se está construyendo un gonio-espectrofotómetro (GEFE) que permita determinar la función *BSDF* de muestras con baja incertidumbre, limitada por el elemento detector que se utilice, y trazable a patrones internacionales. GEFE está constituido por un sistema de iluminación fijo, un sistema de sujeción de muestras y un sistema de detección móvil. Para poder seleccionar los distintos ángulos de incidencia, la muestra, colocada en un brazo robot de seis ejes, se orientará en las direcciones del espacio que se requieran para medir en todos los ángulos de incidencia de interés y permitir la reconstrucción de la *BSDF*.

Este instrumento permitirá la medida absoluta de la *BSDF* y, a diferencia de otros, permitirá medir la radiancia de la muestra en la dirección de incidencia de la iluminación, además de:

- Realizar patrones propios de medida de reflectancia difusa y de factores de reflectancia/radiancia siguiendo las recomendaciones de la CIE y otras organizaciones internacionales como ASTM.
- Estimar la incertidumbre que la falta de "lambertianidad" de los patrones que se usan en medidas de reflectancia difusa produce cuando se usan en instrumentos diferentes.
- Contribuir al estudio de la relación de la *BSDF* de objetos de color y la distribución espacial de las coordenadas cromáticas.

## 2. Concepto de *BSDF*

La *BSDF* es una función de distribución que expresa cómo una muestra determinada dispersa la energía radiante en cada dirección del espacio. Se define como:

$$BSDF = \frac{\mathbf{f}_{e,l,s}}{\mathbf{f}_{e,l,i}} \cdot |\cos\theta_s| \quad (1)$$

donde  $\mathbf{f}_{e,l,i}$  y  $\mathbf{f}_{e,l,s}$  son las densidades espectrales de flujo radiante incidente sobre la muestra y recibido por el detector, respectivamente,  $\Omega_s$  es el ángulo sólido subtendido por el detector y  $\theta_s$  define la dirección del detector con respecto a la fuente. Esta ecuación se puede describir como

$$BSDF = \frac{L(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s, \mathbf{I})}{E(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s, \mathbf{I})} \quad (2)$$

siendo  $(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i)$  y  $(\mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s)$  las coordenadas esféricas del haz incidente y dispersado, respectivamente,  $E$  la irradiancia sobre la muestra y  $L$  la radiancia de la

muestra en esa dirección. La irradiancia,  $E$ , se puede obtener de dos maneras: una, midiéndola directamente, lo que supone la inserción de un sistema auxiliar de medida en el brazo robotizado o la colocación del espectrorradiómetro tras el brazo-robot, y la otra, utilizando un patrón de referencia, cuyo factor de reflectancia,  $\rho$ , es conocido para uno o más ángulos, en cuyo caso se calcula la irradiancia como

$$E = 2\rho \frac{L_p(\mathbf{q}_{i0}, \mathbf{f}_{i0}, \mathbf{l})}{r(\mathbf{q}_{i0}, \mathbf{f}_{i0}, \mathbf{l})} \quad (3)$$

donde  $L_p$  es la radiancia del patrón en una dirección dada. Entonces, sustituyendo la Ec. (3) en la Ec. (2) queda

$$BSDF = \frac{L(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s, \mathbf{l})}{2\rho L_p(\mathbf{q}_{i0}, \mathbf{f}_{i0}, \mathbf{l})} \cdot r(\mathbf{q}_{i0}, \mathbf{f}_{i0}, \mathbf{l}) + \mathbf{x}(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i) + \mathbf{z}(\mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s) \quad (4)$$

siendo  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{z}$  factores de corrección de valor esperado nulo, que se introducen en la ecuación de medida para tener en cuenta, de forma sencilla, la incertidumbre debida al posicionamiento, tanto de la muestra como del detector, además de la colimación del haz y la detección del espectrorradiómetro. Los instrumentos que se basan en la Ec. (4) determinan la  $BSDF$  de forma relativa, mientras que los que se basan en la Ec. (2) la determinan de forma absoluta.

A partir de la  $BSDF$  es posible calcular la reflectancia y el factor de reflectancia en cualquier ángulo de observación cuando la muestra es iluminada desde cualquier ángulo sólido. Mediante la ecuación:

$$r(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_s) = \left( \frac{1}{\Omega_i} \right) \int_{\mathbf{w}_i} \int_{\mathbf{w}_s} BSDF(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i; \mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s) d\Omega_s d\Omega_i \quad (5)$$

se obtendrá la reflectancia en una situación general en la que se ilumina y observa con un ángulo sólido arbitrario, situación cónica. Casos particulares son:

- Iluminación y observación en una sola dirección, caso direccional.
- Iluminación y observación desde todas las direcciones, caso hemisférico.

### 3. Descripción del Instrumento

Tradicionalmente, para medir la  $BSDF$  se mantenía fija la muestra y se hacía girar el detector y la fuente a su alrededor. La diferencia con este sistema es que la iluminación permanece fija y lo que varía es, por un lado la inclinación de la muestra y, por el otro, el espectrorradiómetro, que se mueve únicamente sobre un plano (Fig. 1). GEFE tiene también un sistema de alineamiento (no mostrado en la figura) que permite determinar la

posición central del anillo sobre el que gira el espectrorradiómetro mediante dos láseres que se cruzan.

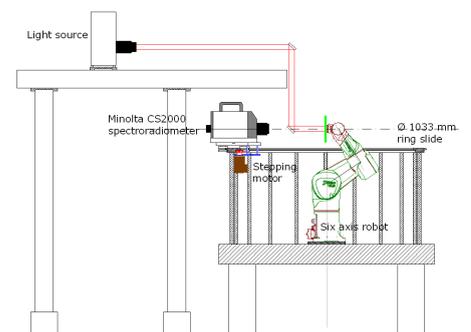


Figura 1. Esquema del instrumento.

#### 3.1. Sistema de Iluminación

En un primer momento los materiales a caracterizar no serán fluorescentes, por lo que se usa una fuente de banda ancha, en concreto, una lámpara de xenón (Super-Quiet Xenon Lamp, modelo L2175 150W, de la marca Hamamatsu) cuyas características se muestran en la Tabla I. La lámpara está metida en una carcasa (modelo E7536, de la marca Hamamatsu) que lleva la óptica integrada para colimar el haz, y que está conectada a una fuente de alimentación eléctrica (modelo C8849, de la misma marca) que le proporciona una corriente estable. Se seleccionó como fuente una lámpara de xenón, aun sabiendo de su mayor inestabilidad en comparación con una lámpara de incandescencia, porque emite mayor potencia para las longitudes de onda cortas, zona en la que la respuesta del espectrorradiómetro es menor. El haz de luz se conduce hasta la muestra mediante un sistema periscópico cuyo elemento inferior será semirreflejante para poder observar la muestra en la dirección de iluminación.

Corriente	7,5 A
Voltaje	20 V (típico)
Material	Sílice fundida
Dimensión	$f = 30$ mm
Distancia focal	$F = 30$ mm
Intervalo espectral de emisión	185 nm a 2000 nm

Tabla I. Características relevantes de la lámpara de xenón utilizada en este instrumento

Además de las características espectrales mencionadas anteriormente, el sistema de iluminación, debe producir una iluminación uniforme sobre la muestra con un área mayor que la observada desde el sistema de detección en cualquier orientación de la muestra y con una distribución angular conocida. Estos objetivos se consiguen con un camino óptico largo y un haz de

rayos paralelos cuyo diámetro será algo mayor que el tamaño mínimo necesario de la mancha luminosa. Si la divergencia del haz es menor que  $4^\circ$ , se puede considerar que todos los rayos son paralelos, pues el error por asumir esta hipótesis es menor que otras incertidumbres experimentales.

### 3.2. Sistema de Posicionamiento de Muestra

Al elegir un sistema de iluminación fijo, se necesita que la muestra se pueda orientar en distintas direcciones del espacio con respecto a la dirección de iluminación. La solución más eficaz en este sentido es utilizar un brazo robotizado, cuyo software de control permite definir diferentes sistemas de referencia y calcular las orientaciones. En particular, permite elegir un sistema de referencia que se relaciona fácilmente con el ángulo de incidencia. Se ha incorporado un brazo-robot de seis ejes de la marca Staübli, modelo TX-40.

### 3.3. Sistema de Detección

El sistema de detección está constituido por un espectrorradiómetro (modelo CS-2000 A, de la marca Konica-Minolta) basado en un detector CCD cuyas características más destacadas se muestran en la Tabla II. Con este instrumento se mide la radiancia de la muestra en todas las direcciones de un plano, al ir montado en una plataforma que se desplaza sobre un anillo dentado en cuyo centro se sitúa el centro de la muestra a medir. El movimiento se logra con un motor de pasos (modelo MDrive23Plus MICROSTEPPING de la marca IMS) con codificador de ángulos incorporado, para controlar la posición (modelo MForceMicroDrive-MICROSTEPPING, de la marca IMS).

Intervalo	380 nm a 780 nm		
Resolución	0,9 nm/píxel		
Ancho de Banda	1 nm		
Campo de visión	$1^\circ$	$0,2^\circ$	$0,1^\circ$
Distancia Mínima de Medida	55 mm	objetivo macro	
	350 mm	objetivo estándar	
Precisión espectral	$\pm 0,3$ nm		
Tiempo de integración	Rápido	0,005 s a 16 s	
	Normal	0,005 s a 120 s	

Tabla II. Características más relevantes del espectrorradiómetro CS-2000 A

El campo de visión constante del espectrorradiómetro hace que el área observada de la muestra varíe conforme cambia la posición del mismo, por lo que la zona iluminada de la muestra determinará en cada caso el ángulo máximo de observación. Teniendo en cuenta que el ángulo de visión máximo de este espectrorradiómetro es  $1^\circ$  y que la distancia aproximada entre el instrumento y la muestra es 45 cm, se obtiene que para poder

observar con un ángulo de  $80^\circ$  respecto a la normal de la muestra, el área iluminada de la misma debe tener un semieje mayor de 4,6 cm, como mínimo.

En una segunda fase se introducirá una cámara con capacidad de análisis espacial en el sistema de detección de manera que se pueda estudiar también la distribución de la *BSDF* sobre la superficie del objeto en cuestión.

### 4. Procedimiento de Medida

Para determinar la *BSDF* se ha de medir la irradiancia sobre la muestra y la radiancia re-emitida en cada dirección de interés del espacio.

Por otra parte, es interesante para un instrumento como el que se está construyendo ser capaz de medir la radiancia de la muestra en el ángulo de iluminación. En las muestras tradicionales, en las que la estructura de la superficie es sencilla, este valor se extrapola de medidas a ángulos muy próximos a la dirección de iluminación. Sin embargo, en muestras con superficies estructuradas complejas esta aproximación puede no ser válida y es muy conveniente ser capaz de medir la radiancia en esta dirección.

Determinar la *BSDF* como una función de las coordenadas esféricas de iluminación y detección, respecto a la normal a la muestra es muy importante, pues el sistema experimental tiene cuatro grados de libertad:  $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z, \mathbf{f}_A$  (giros entorno al sistema de referencia de la muestra y el desplazamiento angular del detector con respecto a la iluminación), que no coinciden con las coordenadas deseadas ( $\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_s, \mathbf{f}_s$ ). La Fig. 2 ilustra la problemática creada en relación a la transformación de coordenadas. Esta conversión se está realizando según el trabajo publicado por Germer<sup>6</sup>. Una dificultad añadida al sistema son las limitaciones de movimiento que tiene el robot cuando realiza giros hacia direcciones que apuntan a su base; en estos casos, se rota la muestra  $180^\circ$  y se utiliza la mitad superior de la semiesfera.

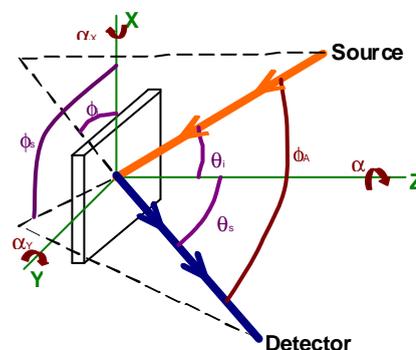


Figura 2. Representación de las coordenadas esféricas de la *BSDF* y los grados de libertad del robot

La adquisición de datos sigue un protocolo de medida controlado por un ordenador con una aplicación en Visual Basic. En esencia, robot y espectrorradiómetro se sitúan en una configuración relativa específica, el espectrorradiómetro realiza una medición y pasan a la configuración siguiente, así hasta que toda la semiesfera queda cubierta.

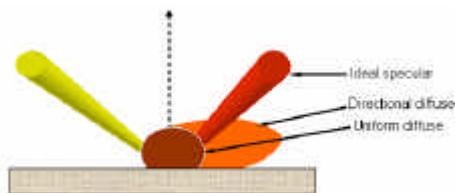


Figura 3. Esquema del modelo HTGS

## 5. Ajuste a un Modelo

Para caracterizar las muestras, es conveniente ajustar los datos experimentales a un modelo; lo que permitirá realizar interpolaciones y determinar los parámetros físicos. En la bibliografía se encuentran una serie de modelos interesantes para el estudio, pero se ha optado por uno sencillo de implementar, el HTGS<sup>7</sup>. Este modelo describe únicamente la reflexión, por lo que, será necesaria la búsqueda de modelos similares para el tratamiento de la transmisión.

Generalmente, todo modelo considera la BRDF (*BSDF* cuando sólo se considera la luz reflejada) como la suma de tres componentes, una parte especular, que es la contenida en el cono especular y sigue la ley de la reflexión, otra direccional difusa, incluye la luz difundida en una dirección predominante y deriva de la rugosidad de la superficie, y otra uniforme difusa, la parte lambertiana, que se debe a que en la superficie rugosa se producen múltiples reflexiones (véase Figura 3).

## 6. Trabajo Futuro

En los próximos meses se realizará el estudio de la configuración óptima para caracterizar adecuadamente la *BSDF*, en particular la BRDF, lo que significa, determinar el número de medidas y las posiciones de iluminación y detección respecto al objeto en cada medida. Paralelamente, se determinarán los parámetros de la muestra mediante el ajuste a un modelo.

Por último, en un futuro, esperamos entender mejor la relación entre la apariencia de los objetos y la *BSDF*, pues ésta nos permite determinar la radiancia de un objeto en cualquier dirección del espacio del observador.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Plan Nacional de Física el apoyo para la realización de este trabajo (FIS2007-66671-C02-01), al Dr. Armada del IAI (CSIC) por las discusiones mantenidas sobre el diseño mecánico y el sistema de sujeción, y al Programa JAE del CSIC por la concesión de la ayuda de Investigador en Formación.

## Referencias

1. J. C. Stover. "Optical Scattering: Measurement and Analysis". SPIE. Bellingham, WA (1995).
2. F. B. Leloup, S. Forment, P. Dutré, M. R. Pointer, P. Hanselaer. "Design of an instrument for measuring the spectral bidirectional scatter distribution function". *Applied Optics*, **40**, 29 (2008).
3. G. Obein, R. Bousquet, M. E. Nadal. "New NIST reference goniospectrometer". *Proc. SPIE* 5880, 241-250 (2005).
4. M. R. Pointer, N. J. Barnes, P. J. Clarke, M. J. Shaw. "A new goniospectrophotometer for measuring gonio-apparent materials". *Color Technol.*, **121**, 96-103 (2005).
5. American Society for Testing and Materials Standard E1392, "Standard practice for angle resolved optical scatter measurements on specular or diffuse surfaces" (ASTM, 1996).
6. T. A. Germer, C. C. Asmail. "Goniometric optical scatter instrument for out-of-plane ellipsometry measurements". *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 3688-3695 (1999).
7. X. D. He, K. E. Torrance, F. X. Sillion, D. P. Greenberg. "A Comprehensive Physical Model for Light Reflection". *Computer Graphics*, **25**, 4, 175-186 (1991).