

REALIZACIÓN DE UNA ESCALA DE REFLECTANCIA BIDIRECCIONAL CON COMPONENTE DE SCATTERING SUB-SUPERFICIAL EN EL RANGO VISIBLE

P. Santafé-Gabarda, A. Ferrero, N. Tejedor y J. Campos

Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IO-CSIC), Grupo de Investigación en Medidas de Radiación Óptica (GIMRO). C/ Serrano 144, 28006 Madrid.

Tel.: 669290867. E-mail: pablo.santafe@csic.es

RESUMEN: En este trabajo se propone una escala de medida para la BSSRDF (*Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function*), una función que describe la variación de la radiancia de las áreas elementales de una superficie respecto al flujo radiante direccionalmente incidente en esa superficie. Medidas de esta función son importantes para caracterizar la translucidez de un objeto y para obtener las propiedades ópticas que afectan al esparcimiento o *scattering* en el volumen de este. En el Instituto de Óptica del CSIC (IO-CSIC) se ha desarrollado un sistema capaz de medir la BSSRDF de muestras translúcidas homogéneas y expresarla en unidades del SI. Debido a la inexistencia de experimentos anteriores acerca de la realización de la escala de la BSSRDF, en el presente trabajo se proponen tanto una serie de muestras que, posteriormente, puedan funcionar como patrones, como una serie de geometrías específicas de medida para esta magnitud.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el estudio y la caracterización de la apariencia ha cobrado gran importancia en distintas áreas de la industria. El color, el brillo, la translucidez y la textura deben cuantificarse objetivamente mediante escalas de medida para proporcionar una descripción completa de la apariencia de un objeto. Estas escalas de medida se definen a partir de la medida del flujo radiante reflejado o transmitido por ese objeto. Sin embargo, la reflectancia y la transmitancia, tal y como las define la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) [1], pueden depender de las condiciones de medida, como por ejemplo el área de iluminación (A_i), el área de colección (A_r) o los ángulos sólidos de iluminación y colección (ω_i y ω_r , respectivamente), entre otras. Esto obliga a realizar las medidas de reflectancia y transmitancia con unas condiciones específicas, lo cual no es válido para proporcionar una descripción general de la reflectancia y la transmitancia de un objeto.

Precisamente con esa idea de proporcionar una descripción general de la reflectancia de una superficie, Nicodemus *et al.* [2] definieron en 1977 una serie de funciones de distribución de reflectancia, entre las cuales se encuentra la BSSRDF (*Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function*). Esta función se define como la radiancia de una superficie por unidad de flujo radiante incidente direccional sobre un elemento diferencial de esa superficie. Debido a su definición, se dice que esta función está íntimamente ligada a la translucidez (uno de los cuatro atributos fundamentales de la apariencia). Matemáticamente se expresa como:

$$f_{SSR}(\mathbf{x}_i, \mathbf{r}_i; \mathbf{x}_r, \mathbf{r}_r) = \frac{dL_{SSR}(\mathbf{x}_i, \mathbf{r}_i; \mathbf{x}_r, \mathbf{r}_r)}{d\Phi_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{r}_i)}, \quad (1)$$

donde f_{SSR} simboliza la BSSRDF, \mathbf{x}_i y \mathbf{x}_r denotan las posiciones de iluminación y observación, respectivamente, \mathbf{r}_i y \mathbf{r}_r denotan las direcciones de iluminación y observación, respectivamente, dL_{SSR} es el elemento diferencial de la radiancia desde la posición \mathbf{x}_r y en la dirección \mathbf{r}_r , y $d\Phi_i$ es el elemento diferencial del flujo radiante incidente de la superficie en la posición \mathbf{x}_i y en la dirección \mathbf{r}_i .

En la Fig. 1 se representa un esquema de las variables geométricas involucradas en la medida de la BSSRDF. Para poder realizar una medida de la BSSRDF, es decir, en cualquier posición de iluminación y observación sobre la superficie de la muestra y a cualquier dirección de iluminación y observación, es necesario un sistema de medida con 8 grados de libertad (2 para cada posición y 2 para cada dirección). En caso de que se midan muestras homogéneas, los grados de libertad se reducen a 6, ya que la posición de observación sobre la superficie de la muestra se transforma en una posición relativa respecto a la posición de iluminación, que funciona como origen de coordenadas.

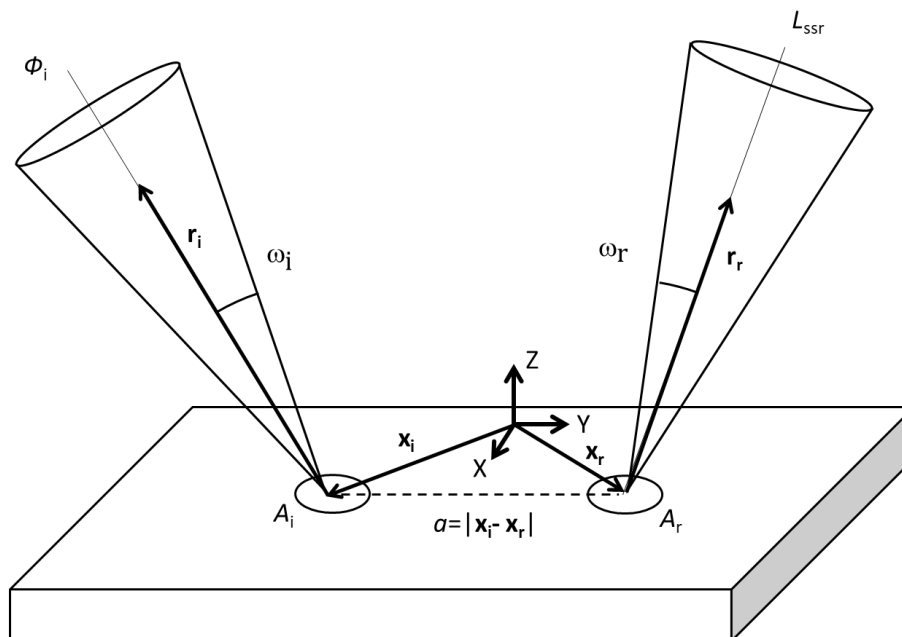


Figura 1: Esquema de las variables geométricas involucradas en la medida de la BSSRDF.

En el pasado se han desarrollado diferentes sistemas para medir la BSSRDF, muchos de ellos en el área de la computación gráfica [3-6], pero ninguno con el fin de proporcionar medidas trazables de esta función. En el Instituto de Óptica del CSIC (IO-CSIC) se ha desarrollado el primer sistema capaz de realizar medidas de la BSSRDF de muestras homogéneas con trazabilidad al sistema SI, con el fin de beneficiar el desarrollo de este tipo de mediciones. Este sistema parte de uno anterior [7,8], diseñado para realizar medidas de la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) [2].

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

2.1 Descripción del sistema de medida

El sistema de medida desarrollado en el IO-CSIC consiste en un gonio-espectrofotómetro compuesto por tres subsistemas: uno de iluminación con dimensión espectral, otro de posicionamiento de muestras con dimensión angular y un tercero de detección con dimensión angular y espacial. Mientras que el primero tiene una dirección fijada respecto al sistema de referencia del laboratorio, los otros dos, tanto el de posicionamiento de muestras como el de detección tienen la capacidad de orientarse en diferentes direcciones, pudiendo reproducir así cualquier geometría de medida (dirección de iluminación y observación). En la Fig. 2 se representa un esquema del gonio-espectrofotómetro.

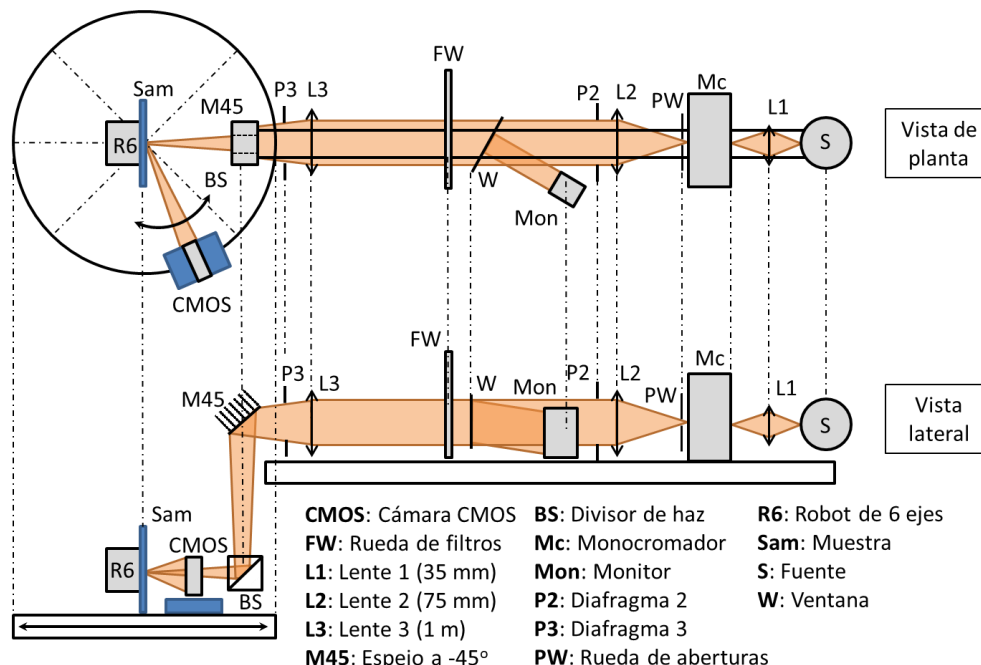


Figura 2: Esquema del sistema de medida.

El subsistema de iluminación está compuesto por una fuente luminosa (S), una lámpara de descarga LDLS (*Laser Driven Light Source*) de alta radiancia y con una buena estabilidad temporal en todo el espectro visible. La luz emitida por esta lámpara se recoge mediante una lente de focal corta (L1) que crea una imagen del elemento emisor de la lámpara justo en la entrada del monocromador (Mc), obteniendo así la misma imagen a la salida. El monocromador es el instrumento que proporciona la dimensión espectral al subsistema de iluminación, ya que permite seleccionar cualquier longitud de onda del espectro visible para iluminar la muestra. Justo a la salida del monocromador, se coloca una rueda de aberturas (PW) de distintos diámetros que van desde 25 μm hasta 2 mm. Este elemento permite determinar el tamaño del área de iluminación sobre la superficie de la muestra, gracias al sistema óptico formador imagen, compuesto por las lentes L2 y L3. En medio de este sistema óptico se encuentra una

ventana de vidrio (W) que refleja aproximadamente el 8 % del flujo radiante que en ella incide hacia un fotodetector (Mon) que funciona como monitor de la señal, y deja pasar el resto, que atraviesa una rueda de filtros (FW) con 5 posiciones distintas: una posición sin filtro ($\tau = 100$ %), otra con un filtro opaco ($\tau = 0$ %), y tres más con tres filtros de densidad neutra de transmitancias nominales $\tau = 10$ %, $\tau = 1$ % y $\tau = 0.01$ %, respectivamente.

El gonio-espectrofotómetro cuenta también con un periscopio compuesto por un espejo (M45) y un divisor de haz (BS) que conducen el haz de iluminación hacia la muestra y, a su vez, permiten realizar medidas de retrorreflexión (dirección de iluminación y observación iguales).

El subsistema de posicionamiento de muestras consiste en un brazo robótico de 6 ejes (R6) que permite orientar la muestra en cuestión (Sam) en cualquier dirección de forma muy rápida y precisa. Para sujetar las muestras, el instrumento se vale de un succionador de vacío, aunque también ofrece la posibilidad de desmontar dicho succionador y atornillar un soporte mecánico.

Finalmente, el subsistema de detección, una cámara CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) de alta sensibilidad (CMOS), permite obtener imágenes con alta resolución espacial de la radiancia de la superficie de la muestra. La cámara está montada sobre una plataforma que puede desplazarse alrededor de la muestra a través de un rail circular, de manera que, junto con el movimiento del brazo robótico, se puede realizar la observación desde cualquier dirección, dentro del hemisferio superior del plano de la muestra, independientemente de la dirección de iluminación.

2.2 Ecuación de medida

Partiendo de la definición de la BSSRDF de la Ec. (1), expresando la radiancia en términos de flujo reflejado, Φ_r , [9] y teniendo en cuenta que en el laboratorio no es posible medir cantidades infinitesimales, se puede expresar la BSSRDF como un cociente de flujos multiplicado por un factor geométrico:

$$f_{SSR}(\mathbf{x}_i, \mathbf{r}_i; \mathbf{x}_r, \mathbf{r}_r) = \frac{1}{A_r \cos \theta_r \omega_r} \frac{\Phi_r(\mathbf{x}_i, \mathbf{r}_i; \mathbf{x}_r, \mathbf{r}_r)}{\Phi_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{r}_i)}, \quad (2)$$

donde A_r es el área elemental de observación, que en el caso de nuestro sistema corresponde con el área que proyecta un píxel del sensor CMOS sobre la superficie de la muestra, θ_r es el ángulo que subtende entre la dirección de observación y la normal a la superficie de la muestra y ω_r es el ángulo sólido de colección que, al igual que el ángulo sólido de iluminación, debe ser lo suficientemente estrecho como para poder considerar despreciable la posible variación angular del flujo radiante contenido en él.

El flujo radiante se puede relacionar con la respuesta de los píxeles del sensor CMOS en cuentas, N , a través de la siguiente expresión:

$$N = \frac{\lambda}{hc} F \tau \eta_e t_{\text{exp}} \Phi, \quad (3)$$

siendo λ la longitud de onda de iluminación, h y c las constantes universales de Planck y de la velocidad de la luz en el vacío, respectivamente, F el factor de conversión entre cuentas y fotoelectrones, τ la transmitancia de la lente del objetivo utilizado para realizar la imagen en el sensor CMOS, η_e la eficiencia cuántica externa de los píxeles del sensor y t_{exp} el tiempo de exposición empleado en la imagen.

Con todo, la ecuación de medida de la BSSRDF con el gonio-espectrofotómetro descrito anteriormente resulta:

$$f_{ssr,k} = \frac{1}{A_r \cos \theta_r \omega_r} \left(\frac{N_{k,r}}{\sum_k N_{k,i}} \right) \left(\frac{t_{exp,k,i}}{t_{exp,k,r}} \right) \frac{1}{C_{rr}} \frac{1}{C_{nl}} \quad (4)$$

En la ecuación anterior, el subíndice “ k ” hace referencia al píxel “ k ” sobre la imagen, es decir, a la posición “ k ” de observación sobre la superficie de la muestra. Así, $N_{k,r}$ representa la respuesta en número de cuentas del píxel “ k ” en la imagen de radiancia sobre la superficie de la muestra. Por otro lado, la medida del flujo radiante incidente se realiza tomando una imagen del perfil del haz de iluminación en el plano de la muestra y sumando la respuesta en cuentas de todos los píxeles que han sido iluminados, $\sum_k N_{k,i}$. Por último, C_{rr} y C_{nl} son factores de corrección cuyo valor es próximo a 1. El primero hace referencia a la relación de responsabilidades de la cámara cuando se mide el flujo incidente y cuando se mide el flujo reflejado, ya que en el primer caso el ángulo sólido de medida viene determinado por el ángulo sólido de iluminación y en el segundo caso este viene determinado por el ángulo sólido de colección de la cámara CMOS, y esta diferencia puede afectar a la responsividad del sensor. El segundo hace referencia a la posible falta de linealidad de la respuesta del sensor al utilizar distintos tiempos de exposición.

2.3 Descripción de las muestras

Este trabajo se enmarca en el proyecto europeo *BxDiff: New quantities for the measurement of appearance*, financiado por el programa EMPIR (*European Metrology Programme for Innovation and Research*). En este contexto, la empresa *Covestro Deutschland AG* ha fabricado una serie de muestras translúcidas con una base de polímeros a la que han añadido partículas difusoras con distintos tamaños y concentraciones controlados, obteniendo así muestras con distintos niveles de translucidez (véase Fig. 3).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un trabajo anterior [10], se midió la BSSRDF de estas muestras con la finalidad de evaluar el sistema. Se trataba de unas medidas preliminares que sirvieron para encontrar los márgenes de mejora que realmente eran relevantes en el resultado final y también para adquirir experiencia en este tipo de mediciones.

En la Fig. 4 se representan los valores obtenidos de la BSSRDF de las posiciones que se encuentran en el plano de incidencia sobre la superficie de cada una de las muestras para una configuración de medida concreta. Se observa cómo las muestras aparentemente más translúcidas (véase Fig. 3) presentan una pendiente más suave, lo cual indica un mayor número de eventos de *scattering* en su volumen.



Figura 3: Fotografía de las muestras fabricadas por *Covestro Deutschland AG* para el estudio de la BSSRDF dentro del proyecto *BxDiff*.

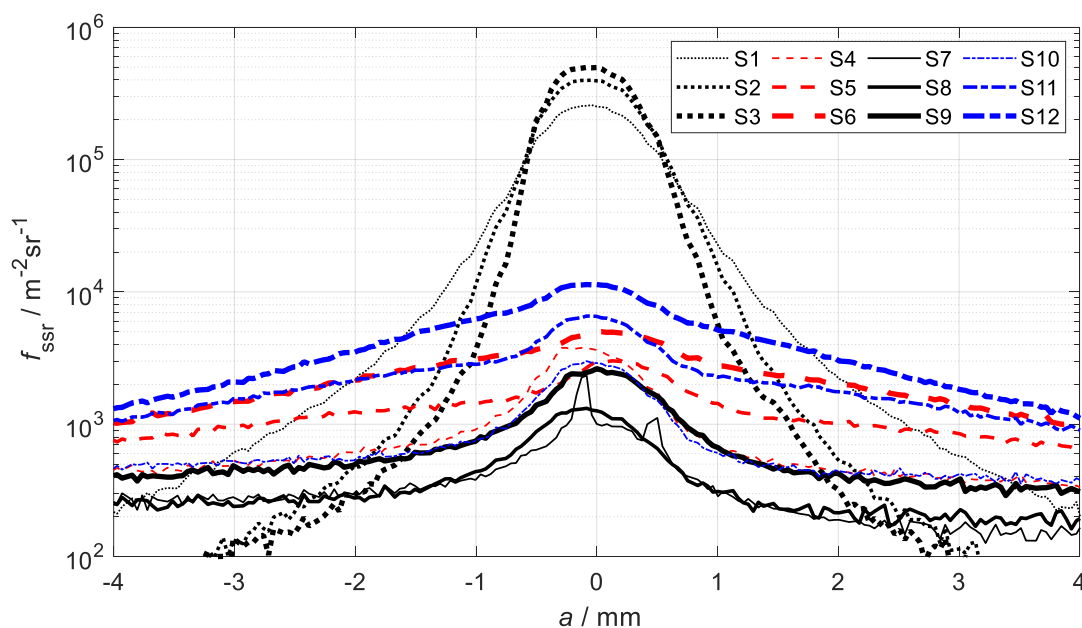


Figura 4: BSSRDF de las doce muestras translúcidas para $\lambda = 550 \text{ nm}$, con un ángulo de iluminación $\theta_i = 15^\circ$ y un ángulo de observación $\theta_r = 30^\circ$ respecto de la normal a la superficie de la muestra en el mismo semiplano.

En general, se observan tres tipos de curvas de BSSRDF: unas con valores muy altos dentro del área iluminada que decaen rápidamente al alejarse de ella (S1, S2 y S3), otras que presentan pendientes muy suaves (S5, S6, S11 y S12) y, por último, unas en las que, al igual que en las primeras, los valores decaen significativamente al alejarse del área iluminada pero dentro de esta no son tan altos como en el primer caso (S4, S7, S8, S9 y S10). Por ello, se

proponen las muestras S2, S5 y S8, una de cada tipo, como candidatas a patrones de BSSRDF, de forma que las próximas medidas, más exhaustivas, se realizarán sobre estas tres muestras.

La actualización del subsistema de iluminación, reemplazando la lámpara incandescente anterior por la actual lámpara de descarga LDLS, ha permitido obtener un área de iluminación sobre la superficie de la muestra mucho más pequeña con suficiente flujo radiante incidente, ya que el tamaño del elemento emisor de esta fuente es mucho más pequeño que el filamento de las lámparas incandescentes.

Asimismo, la actualización del sistema de detección, sustituyendo la anterior cámara CCD por la cámara CMOS de alta sensibilidad y bajo ruido de lectura mencionada anteriormente, permite esperar obtener menor incertidumbre en la respuesta de los píxeles del sensor y mayor resolución espacial en la imagen de radiancia de la superficie de la muestra.

Con todo ello, ahora hay que realizar una nueva caracterización radiométrica exhaustiva del sistema de medida actualizado, así como analizar todas las posibles fuentes de incertidumbre involucradas en la medición de la BSSRDF con dicho sistema.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es crear la primera escala de medida de la BSSRDF y poder transferirla a otros centros de investigación o laboratorios para que puedan realizar medidas de esta función con trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI). Estas medidas son muy importantes para estudiar el esparcimiento o *scattering* en materiales, también para entender mejor y poder reproducir la translucidez de estos. En el IO-CSIC se ha diseñado y montado un sistema para realizar medidas de la BSSRDF con trazabilidad al SI. Este sistema ha sido evaluado y los resultados, aunque preliminares, demuestran la capacidad de nuestro laboratorio para realizar esta escala. Se espera que, tras la caracterización del sistema y la identificación de las fuentes de incertidumbres correspondiente a esta medición, se pueda establecer la primera escala de medida de la BSSRDF y transferir el patrón a otros laboratorios.

5. REFERENCIAS

- [1] CIE S 017/E:2020, International Lighting Vocabulary (CIE Publication, 2020).
- [2] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis, *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance* (U.S. Department of Commerce, 1977).
- [3] M. Goesele, H. P. A. Lensch, J. Lang, C. Fuchs, and H. P. Seidel, *Disco: Acquisition of translucent objects*, in ACM SIGGRAPH 2004 Papers, (Association for Computing Machinery, 2004), SIGGRAPH '04, p. 835–844.
- [4] S. G. Narasimhan, M. Gupta, C. Donner, R. Ramamoorthi, S. K. Nayar, and H. W. Jensen, *Acquiring scattering properties of participating media by dilution*, J. ACM 25, 1003–1012 (2006).

- [5] S. J. Lee, H. M. Kim, K. H. Ko, and K. H. Lee, *Representation of homogeneous translucent materials using the P3 approximation and an image-based bidirectional subsurface scattering reflectance distribution function measurement system*, Opt. Eng. 49(6), 063601 (2010).
- [6] K. Happel, E. Dörsam, and P. Urban, *Measuring isotropic subsurface light transport*, Opt. Express 22(8), 9048–9062 (2014).
- [7] A. M. Rabal, A. Ferrero, J. Campos, J. L. Fontecha, A. Pons, A. Rubiño, and A. Corróns, *Automatic goniospectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in- and out-of-plane and retroreflection geometries*, Metrologia 49(3), 213–223 (2012).
- [8] B. Bernad, A. Ferrero, A. Pons, M. L. Hernanz, and J. Campos, *Upgrade of goniospectrophotometer GEFE for near-field scattering and fluorescence radiance measurements*, in *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance 2015*, vol. 9398 M. V. O. Segovia, P. Urban, and F. H. Imai, eds., International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2015), pp. 105–115.
- [9] J. M. Palmer and B. G. Grant, *The Art of Radiometry*, Chapter 2 (SPIE, 2009).
- [10] P. Santafé-Gabarda, et al., *Primary facility for traceable measurement of the BSSRDF*, Optics Express 29.21 (2021): 34175-34188.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto europeo 18SIB03 BxDiff, financiado por el programa EMPIR, cofinanciado por los estados participantes y por el programa de innovación e investigación de la Unión Europea “Horizonte 2020”, así como en el marco del proyecto PGC2018-096470-B-I00 BISCAT (MCIU/AEI/FEDER,UE).

Asimismo, se agradece el apoyo del programa de actividades S2018/NMT-4326-SINFOTON2-CM de la convocatoria Tecnologías 2018 de la Comunidad de Madrid.

Finalmente, se agradece a *Covestro Deutschland AG* por proporcionar las muestras translúcidas objeto de las medidas.