

## DESARROLLO DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE REFLECTANCIA VISIBLE

**A. Villalba, N. Alchapar, R. Mercado, A. Pattini y E. Correa**

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)  
Centro Científico y Tecnológico Mendoza, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)

Av. A. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Ciudad de Mendoza, Mendoza CP 5501  
<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/inahe/> (54) (261) 5244310  
E mail [avillalba@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:avillalba@mendoza-conicet.gob.ar)

*Recibido: 20/082021; Aceptado: 20/10/2021; Publicado online: 3-02-2022.*

**RESUMEN.-** El presente trabajo tiene como objetivo avanzar en la adaptación y desarrollo de metodologías para la caracterización de la reflectancia visible de materiales con distintos grados de permeabilidad a la luz –cortinas roller screen con instrumental de mediano y bajo costo, y evaluar su grado de ajuste respecto a la metodología propuesta por estándares a nivel internacional. El trabajo se estructura en cuatro etapas: 1) determinación de la reflectancia espectral en espectrorradiómetro y cálculo de la reflectancia visible para cada uno de los tejidos -considerados valores de referencia-; 2) determinación y cálculo de la reflectancia difusa hemisférica de los tejidos mediante el método adaptado de Akbari; 3) determinación y cálculo de la reflectancia difusa hemisférica de los tejidos mediante el método de reflectancia hemisférica; 4) análisis estadístico de los resultados. Se analizan once tejidos screen de diferentes colores y factores de apertura. Se concluye que las técnicas evaluadas resultan adecuadas para cuantificar de forma confiable, económica y simple, la reflectancia visible difusa de las cortinas roller screen con un error cuadrático medio inferior al 0,15, respecto a los valores obtenidos con la técnica de referencia.

**Palabras claves:** Reflectancia. Cortinas roller screen. Iluminación. Métodos de caracterización.

## DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED METHOD FOR THE QUANTIFICATION OF VISIBLE REFLECTANCE

**ABSTRACT.-** The main objective of this work is to advance in the adaptation and development of methods for the characterization of visible reflectance of materials with different degrees of permeability to light - roller screen curtains - with medium and low cost instruments, and to determine their degree of adjustment with respect to the methodology proposed by international standards. The work is divided into four sections: 1) determination of spectral reflectance in spectroradiometer and calculation of visible reflectance for each of the fabrics -considered as reference values-; 2) determination and calculation of hemispherical diffuse reflectance of the fabrics using the adapted Akbari method; 3) determination and calculation of hemispherical diffuse reflectance of the fabrics using the hemispherical reflectance method; 4) statistical analysis of the results. Eleven screen fabrics of different colors and openness factors are analyzed. It is concluded that the tested techniques are adequate to quantify in a reliable, economic and simple way, the diffuse visible reflectance of roller screen curtains with a mean square error lower than 0.15, with respect to the values obtained with the reference technique.

**Keywords:** Reflectance. Roller screen curtains. Illumination. Characterization methods.

### 1.- INTRODUCCIÓN

Las cortinas roller screen son sistemas dinámicos de sombreado ampliamente utilizados a nivel global, debido a que combinan la protección solar y visual con una presencia estéticamente atractiva a un precio relativamente reducido (Villalba et al., 2012; Tzempelikos y Chan, 2016; Chan et al., 2015). En este sentido sus características –factor de apertura, color, etc.- determinan su comportamiento opto-térmico e impactan condicionando o afectando tanto el confort visual como el consumo de energía (Konstantzos y Tzempelikos, 2017).

El análisis del comportamiento lumínico-energético de los sistemas de aventanamiento complejo -cortinas roller screen interiores- requiere conocer su comportamiento óptico – transmitancia y reflectancia visible y solar hemisférica global, transmitancia y reflectancia espectral-. Los datos que caracterizan el comportamiento fotométrico de los sistemas de control solar se pueden medir con espectrofotómetros y espectrorradiómetros (Jonsson et al., 2008; Deroisy et al., 2013; Andersen, 2004). Sin embargo, estos métodos de caracterización no son de disponibilidad masiva entre desarrolladores y usuarios debido a la dificultad para adquirir estos equipos, dado su elevado costo y la necesidad de contar

con personal altamente capacitado para su operación. Es por esto que el desarrollo de metodologías simplificadas, con un grado aceptable de confiabilidad, y de bajo costo para la caracterización de las propiedades ópticas integrales -transmitancia y reflectancia visible y solar- de los materiales que conforman los sistemas de sombreado es una necesidad inminente, Alchapar et al., 2018; Villalba et al., 2018; Villalba et al., 2019). Los indicadores de comportamiento lumínico-energético que se determinan mediante estas metodologías, serían asequibles a una mayor cantidad de usuarios y factibles de ser aplicados por fabricantes, comerciantes de estos productos y proyectistas en el diseño de espacios interiores. Asimismo, son fundamentales para desarrollar estudios precisos del comportamiento de la luz natural mediante simulación dinámica de iluminación natural.

La reflectancia visible ( $\rho_v$ ) es una de las propiedades ópticas frecuentemente utilizada para caracterizar los tejidos screen. La misma refiere a la fracción de la luz incidente -parte del espectro de la energía solar que sirve para iluminar (380 nm / 780 nm)- que es reflejada por un material. Caracterizar este parámetro para las cortinas roller screen es importante por dos motivos fundamentales. En primer lugar, las fachadas vidriadas de los edificios son cada vez de mayores dimensiones, resultando excesivas desde la perspectiva del confort visual (Aste et al., 2015; Kong et al., 2015; Fontoynt, 1999), lo que demanda la implementación de elementos de sombreado que regulen el ingreso de la radiación solar. En este marco, las cortinas roller screen son uno de los dispositivos de sombreado de uso más frecuente, esto significa grandes superficies interiores recubiertas con este tipo de material que van a influir en las condiciones de iluminación interior tanto diurnas como nocturnas. En condiciones de luz diurna, las múltiples reflexiones entre los hilos que conforman el tejido y la posible transmisión a través de ellos determinan la transmitancia difusa del mismo (Kotey et al., 2009). La transmitancia difusa es una de las propiedades, que la norma EN 14501 (CEN, 2006) solicita para determinar qué clasificación respecto del control del deslumbramiento corresponde a este tipo de dispositivo de protección solar. En condiciones nocturnas, la reflectancia del tejido puede influir en las demandas de iluminación artificial (Mermet, 2019), especialmente cuando cubren superficies que en algunos casos -muros vidriados- representan una pared completa. Diversos estudios demuestran que los valores de reflectancia visible de las superficies interiores influyen en el consumo de energía de la iluminación artificial (Singh y Rawal, 2019; Makaremi et al., 2019). Singh y Rawal (2019) sostienen que hasta un tercio del consumo energético de un sistema de iluminación depende de las características interiores del entorno, como la altura del techo, el color y la reflectancia de las superficies de la habitación. Es importante diferenciar que en algunos casos es necesario conocer la reflectancia de la fibra que conforma el tejido y en otros es la reflectancia del tejido completo. En segundo lugar, la reflectancia visible es un dato requerido para modelar el efecto de los tejidos screen en contextos virtuales de simulación de iluminación natural, cuando se busca efectuar análisis de confort visual y consumo energético. El modelo empírico angular de dos capas (Wienold et al., 2017) requiere la reflectancia difusa del tejido. Asimismo, el modelo empírico angular (Kotey et al., 2009) y el modelo geométrico de radiosidad "Woven Shade" (LBNL, 2015; Carli Inc., 2006) solicitan la carga de los valores de reflectancia difusa frontal y posterior del tejido y de las fibras respectivamente.

De acuerdo a lo discutido previamente, se desprende la

necesidad de contar con datos de reflectancia visible de las superficies del entorno construido, para avanzar sobre el análisis de las condiciones de iluminación del ambiente construido. Al mismo tiempo, la complejidad económica y técnica que implica su cuantificación a partir de sistemas complejos conformados por un detector (fotómetros, radiómetros, espectrorradiómetros o espectrofotómetros), una esfera integradora y una fuente (CEN, 2008) promueven el desarrollo de diversas metodologías simplificadas de caracterización de esta propiedad (Alchapar et al. 2018; Villalba et al., 2018). A continuación se describen brevemente, dos métodos simplificados para la cuantificación de la reflectancia difusa visible. Fontoynt (1999) propuso un método para la cuantificación de la reflectancia de materiales bajo condiciones de luz difusa. El instrumental empleado para la caracterización es un luminómetro y dos cartillas de referencia -una blanca y una gris, de reflectancia conocida-. Mediante una relación entre las luminancias, tomadas in-situ, de las cartillas y del material bajo estudio se calcula la reflectancia del mismo. La metodología propuesta por Mardaljevic et al. (2015) permite determinar la reflectancia de superficies difusas bajo condiciones de iluminación reales. La técnica se basa en imágenes de alto rango dinámico (HDR del inglés High Dynamic Range) (Inanici, 2006), calibradas mediante una medición puntual con luminómetro. Esta metodología presenta una divergencia en el cálculo de la reflectancia visible media de una superficie de entre un 0,8 y un 6,1%.

En este marco, la presente investigación tiene como objetivo general avanzar en la adaptación y desarrollo de metodologías de caracterización lumínica -reflectancia visible- de materiales con distintos grados de permeabilidad a la luz -cortinas roller screen- con instrumental de mediano y bajo costo, y evaluar su grado de ajuste respecto a la metodología propuesta por estándares a nivel internacional. De modo específico, se propone adaptar el método variante de la norma ASTM E-1918 (ASTM, 2016) desarrollado por Akbari et al. (2008), que cubre la medición de la reflectancia solar hemisférica global (285 a 2800 nm) de diversas superficies y materiales opacos horizontales y de poca pendiente en el campo. Es fundamental aclarar que, estudios anteriores (Jonsson et al., 2008; Kotey et al., 2009) demuestran que los tejidos suelen tener una componente de reflectancia especular despreciable. La reflectancia del tejido se comporta casi como un material completamente lambertiano (Jonsson et al., 2008). Por lo tanto, la reflectancia directa es igual a cero y la reflectancia global es igual a la reflectancia difusa (Kotey et al., 2009), lo que valida la adaptación de la metodología de Akbari (2008), destinada a la caracterización de la reflectancia solar hemisférica global, para la determinación de la reflectancia visible difusa de las cortinas roller screen.

El método variante (Akbari et al., 2008), establece el procedimiento para medir la reflectancia solar de un material sobre un área de 1 m<sup>2</sup> mediante el uso de dos piranómetros o un albedómetro y un par de máscaras de color blanco y negro. Este trabajo propone analizar la posibilidad de adecuar esta metodología a la medición de reflectancia visible (380 a 780 nm) mediante la adaptación de la misma a sensores de luz -fotómetros-. Para la validación del método simplificado, los resultados obtenidos se contrastarán con mediciones de reflectancia espectral obtenidos en un espectrorradiómetro OPTRONIC OL 750 de doble monocromador. Este trabajo focalizará en la determinación de la reflectancia del tejido en su totalidad.

Avanzar sobre el desarrollo de esta metodología alternativa para la determinación de la reflectancia de materiales se fundamenta en los siguientes puntos. En primer lugar, el método propuesto es de reducida complejidad, especialmente si lo comparamos con la propuesta de Mardaljevic et al. (2015). El empleo de HDRs para la generación de mapeos de luminancia es complejo y requiere de mucha experiencia para poder desarrollarse correctamente (Pierson et al., 2021). En segundo lugar, tanto el método propuesto por Mardaljevic et al. (2015) como el de Fontoynt (1999) requiere el uso de luminancímetros, este equipo duplica el valor del instrumental requerido para la metodología propuesta en este trabajo. Si además sumamos la necesidad de disponer de una cámara fotográfica (Mardaljevic et al., 2015) el método propuesto presenta una reducción en los costos de equipamientos que alcanza un 60%.

Finalmente, es importante destacar que ninguna de las metodologías mencionadas han sido validadas para caracterizar la reflectancia de cortinas roller screen. Este tipo de componente edilicio tiene la particularidad de no ser completamente homogéneo ni completamente opaco.

## 2. CASO DE ESTUDIO

Se han analizado once tejidos diferentes, de uso frecuente en cortinas tipo roller screen, que reportaron el mayor volumen de ventas durante el último año en el mercado local. El criterio de selección de los tejidos se basa en el color y el factor de apertura (FA) de los mismos, dado que el color del tejido es una propiedad fuertemente correlacionada con la reflectancia visible difusa (Choudhury, 2014), que como se expuso previamente, en este tipo de material es equivalente a la reflectancia total; y el porcentaje de apertura del tejido determina la radiación que lo atraviesa sin interacción y por lo tanto no se refleja. Se seleccionaron tejidos con fibras blancas, grises y negras y sus combinaciones. Además, se eligieron tejidos con un rango de FA entre 3 y 14.

Los tejidos seleccionados presentan diferentes propiedades físicas (material, color, factor de apertura, tipo de tejido) que se presentan en la Tabla 1. Los tejidos están fabricados con fibra de vidrio, poliéster o fibra de vidrio/poliéster en su núcleo y recubiertos con vinilo.

Tabla 1: Propiedades de los tejidos seleccionados: color de la fibra, factor de apertura, material.

Código	Imagen	Color de la fibra	FA%	Material
9801		blanco-blanco	5	Fibra de vidrio recubierta de PVC
4301		blanco-blanco	3	Poliéster recubierto de PVC
4001		blanco-blanco	5	Poliéster recubierto de PVC
3006		blanco-blanco	14	Fibra de vidrio y poliéster recubiertos de PVC
4008		gris-blanco	5	Poliéster recubierto de PVC
4308		gris-blanco	3	Poliéster recubierto de PVC
3008		gris-blanco	14	Fibra de vidrio y poliéster recubiertos de PVC
2007		gris-blanco	5	Fibra de vidrio recubierta de PVC
9808		gris-gris	5	Fibra de vidrio recubierta de PVC
3009		negro-gris	14	Fibra de vidrio y poliéster recubiertos de PVC
2004		negro-negro	5	Fibra de vidrio recubierta de PVC

En los tejidos analizados observamos dos tipos de tramas: la trama de cesta (9808, 9801, 4001, 4008, 4301, 4308, 2007 y 2004) (Fig. 1) y la trama de fantasía (3006, 3008 y 3009) (Fig. 2) (Mermet, 2019).

## 3. METODOLOGÍA

La metodología del trabajo se ha estructurado en cuatro etapas: 1) determinación de la reflectancia espectral en

espectrorradiómetro y cálculo de la reflectancia visible para cada uno de los tejidos -considerados valores de referencia-; 2) determinación y cálculo de la reflectancia difusa hemisférica de los tejidos mediante el método adaptado de Akbari; 3) determinación y cálculo de la reflectancia difusa hemisférica de los tejidos mediante el método de reflectancia hemisférica; 4) análisis estadístico de los resultados.

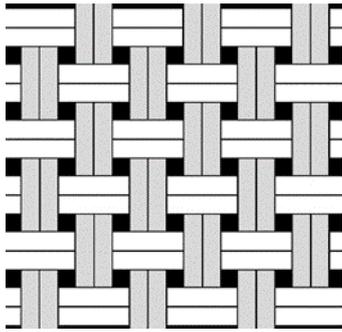


Fig. 1: Trama de cesta

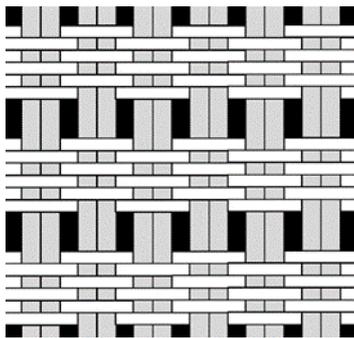


Fig. 2: Trama de fantasía

### 3.2. Medición con espectrorradiómetro.

Las mediciones de reflectancia espectral para cada uno de los tejidos analizados se realizaron con un espectrorradiómetro OPTRONIC OL 750 de doble monocromador (OPTRONIC, 2020a), con accesorio OL 740-70 (esfera integradora) (OPTRONIC, 2020b) y accesorio OL 740-20 (fuente de alta intensidad) (OPTRONIC, 2020c). Las especificaciones del espectrorradiómetro OL 750 se muestran en la Tabla 2. Estas mediciones fueron realizadas por el Laboratorio de Radiometría del Departamento de Iluminación, Luz y Visión (DLLV, UNT) y el Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV, CONICET). Las mediciones se realizaron por el método de comparación, que requiere completar dos escaneos en 4 pasos: dos para la calibración del sistema y dos para la medición de la muestra. Se utilizaron referencias de reflectancia de PTFE calibradas.

Los valores de reflectancia visible  $\rho_v$  están dados por la Ec. 1 según la norma EN 410:2011 (CEN, 2011):

$$\rho_v = \frac{\sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_{65}(\lambda) V(\lambda) \rho(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_{65}(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (1)$$

Donde:

$\rho(\lambda)$  es la reflectancia espectral del tejido

$D_{65}(\lambda)$  es la distribución espectral relativa del iluminante

$D_{65}$

$V(\lambda)$  es la eficiencia luminosa espectral para la visión fótópica que define el observador estándar para la fotometría

$\Delta\lambda$  es el intervalo de longitudes de onda (10 nm)

Tabla 2: Especificaciones del espectrorradiómetro OL 750.

Especificaciones	
Rango de longitudes de onda	0,20 – 30 $\mu\text{m}$
Exactitud de la longitud de onda	$\pm 0,05\%$
Precisión de la longitud de onda	$\pm 0,01\%$
Dispersión	2 nm/mm
Ancho de banda	0,25 a 10 nm

### 3.1. Método adaptado de Akbari ( $\rho_{vA}$ )

Tomando como base el método variante de la norma ASTM E-1918 (ASTM, 2016) desarrollado por Akbari et al. (2008) para la cuantificación de la reflectancia solar de materiales opacos, se reemplazan los piranómetros por un par de sensores fotométricos Licor LI-210R y un medidor de luz Licor LI-250A. Al igual que en la norma ASTM E-1918 se utiliza un brazo de 1.5 m que sostiene el sensor fotométrico a una altura de 0.5 m sobre el centro del área objeto (Fig. 3). El fotómetro orientado hacia arriba registra la radiación visible horizontal; y el fotómetro orientado hacia abajo mide la radiación visible reflejada en cada una de las tres configuraciones que se detallan a continuación. Esta adaptación del método (en adelante Método adaptado de Akbari  $\rho_{vA}$ ) permite la medición de la reflectancia visible de una pequeña área de interés "objetivo", mediante el uso de un par de sensores fotométricos. La iluminancia ( $E$ ) incidente en el sensor fotométrico orientado hacia abajo, es el promedio ponderado de la radiación visible reflejada por el área objetivo y la reflejada por su entorno. En la metodología propuesta - método adaptado de Akbari  $\rho_{vA}$ -, y en concordancia con lo propuesto por Akbari et al. (2008), la

reflectancia de un área objetivo (tejido) se determina a partir de tres mediciones consecutivas de radiación visible reflejada. En la primera configuración, indicada por el subíndice 1 ( $E_1$ ), el área objetivo está cubierta exactamente por una superficie blanca opaca ("máscara blanca"). En la segunda configuración, indicada por el subíndice 2 ( $E_2$ ), el área objetivo está exactamente cubierta por una superficie negra opaca ("máscara negra"). En la tercera configuración, indicada por el subíndice 3 ( $E_3$ ), el área objetivo está descubierta. La reflectancia visible del área objetivo se determina a partir de la siguiente ecuación (Ec. 2):

$$\rho_{vA} = \rho_b + \frac{E_3 - E_2}{E_1 - E_2} (\rho_w - \rho_b) \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{vA}$ : reflectancia visible de la superficie objetivo

$\rho_w$ : reflectancia visible de la máscara blanca

$\rho_b$ : reflectancia visible de la máscara negra

$E_1, E_2, E_3$ : son las iluminancias incidentes sobre el sensor fotométrico en las configuraciones 1, 2 y 3.

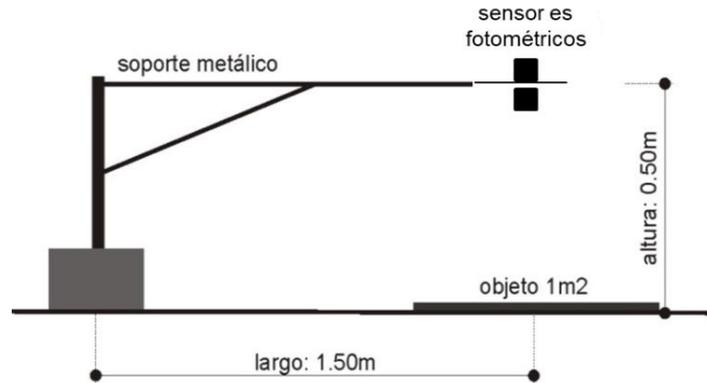


Fig. 3: Esquema de medición de reflectancia visible de materiales.

Se repite la medición 3 veces para obtener un total de tres valores de  $\rho_t$  de cada muestra analizada. Se repite el ensayo si el rango de los tres valores de  $\rho_t$  excede 0,02 (es decir,  $\max(\rho_t) - \min(\rho_t) > 0,02$ ). La reflectancia de las máscaras –blanca y negra- fue determinada con la metodología de Fontoynt (1999). Los valores de reflectancia de las mismas son los siguientes: máscara blanca  $\rho_w$  0,79; máscara negra  $\rho_b$  0,05. Es importante aclarar que las muestras de los tejidos se colocaron sobre la máscara negra para efectuar los registros. Esta hipótesis se asume bajo la suposición de que de ese modo se minimiza el efecto del fondo sobre los valores de reflectancia obtenidos.

### 3.3. Método de reflectancia hemisférica ( $\rho_{vH}$ )

De acuerdo a esta metodología la reflectancia está definida por la proporción de iluminancia incidente sobre el sensor fotométrico orientado hacia arriba (bóveda) ( $E_b$ ) y la reflejada sobre el sensor fotométrico dirigido hacia el tejido ( $E_t$ ) (Ec. 3). En esta metodología no se utilizan las máscaras blanca y negra para calibrar la medición del equipamiento en el cálculo de la reflectancia visible.

$$\rho_{vH} = \frac{E_t}{E_b} \quad (3)$$

Donde:

$E_t$  iluminancia incidente sobre el sensor fotométrico orientado hacia arriba

$E_b$  iluminancia incidente sobre el sensor fotométrico dirigido hacia la tejido

Las mediciones se realizaron un día claro y soleado (18 de febrero, altitud solar 66,25° mediodía solar), en un rango de media hora previa y media hora posterior al mediodía solar. De acuerdo a la norma ASTM E-1918 (ASTM, 2016) el método de ensayo está destinado a utilizarse cuando el ángulo del sol con respecto a la normal de una superficie es inferior a 45°.

Además, con el objeto de evaluar el efecto de la distancia del sensor a la muestra sobre los valores de reflectancia medidos se realizaron mediciones a: 15 cm, 30 cm y 50 cm.

### 3.4. Análisis estadístico de los resultados.

El estadístico empleado para desarrollar la comparación de los datos medidos a partir de la aplicación de las metodologías de análisis consideradas, es la raíz del error cuadrático medio (siglas en inglés RMSE) (Ec. 4). El mismo se emplea para analizar las diferencias entre los valores de reflectancia medidos en espectrorradiómetro -valor de referencia- ( $\rho_{\text{espectrorradiómetro}}$ ) y las metodologías adaptadas ( $\rho_{\text{adaptado}}$ ).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\rho_{\text{adaptado}} - \rho_{\text{espectrorradiómetro}})^2} \quad (4)$$

Donde:

$\rho_{\text{espectrorradiómetro}}$  valores de reflectancia medidos en espectrorradiómetro

$\rho_{\text{adaptado}}$  valores de reflectancia medidos con las metodologías adaptadas

## 4. RESULTADOS

En la Tabla 3 se presentan los valores de  $\rho_v$  calculados a partir de los datos de reflectancia espectral medidos en espectrorradiómetro de acuerdo a la ecuación 1. Observamos que los tejidos con fibras blanco-blanco presentan los valores más altos (0,69 a 0,73) y que dentro de este grupo el textil con mayor factor de apertura (3006) presenta el valor más bajo de  $\rho_v$ . Los textiles gris-blanco y gris-gris presentan valores de  $\rho_v$  entre 0,37 y 0,54. En este conjunto resulta interesante destacar que el textil 9808, único gris-gris, no presenta una  $\rho_v$  inferior a los tejidos con fibras gris-blanco. Finalmente, los textiles con fibras gris-negro y negro-negro muestran valores de  $\rho_v$  inferiores al 10%.

Tabla 3: Reflectancia visible de cada tejido medidas en espectrorradiómetro.

Código	9801	4301	4001	3006	4008	9808	4308	3008	2007	3009	2004
Imagen											
$\rho_v$	0,73	0,73	0,72	0,69	0,54	0,53	0,50	0,44	0,37	0,08	0,05

En la figura 4 observamos una gráfica de línea donde se exponen los valores de reflectancia para cada uno de los tejidos screen cuantificados con las distintas metodologías y a distintas distancias muestra-sensor (50 cm, 30 cm y 15 cm). En la tabla 4 se exponen los valores de reflectancia visible cuantificados con las metodologías simplificadas ( $\rho_{vA}$  y  $\rho_{vH}$ ) a distintas distancias (50 cm, 30 cm y 15 cm) y los medidos

en espectrorradiómetro ( $\rho_v$ ). Además, se muestran el error absoluto de valores registrados con las técnicas adaptadas a distintas distancias para cada tejido ( $E_a$ ) y el error absoluto promedio por técnica y distancia ( $E_a$  promedio). Asimismo, se expresa el error cuadrático medio por metodología adaptada y distancia muestra-sensor respecto a los valores de  $\rho_v$  medidos en espectrorradiómetro.

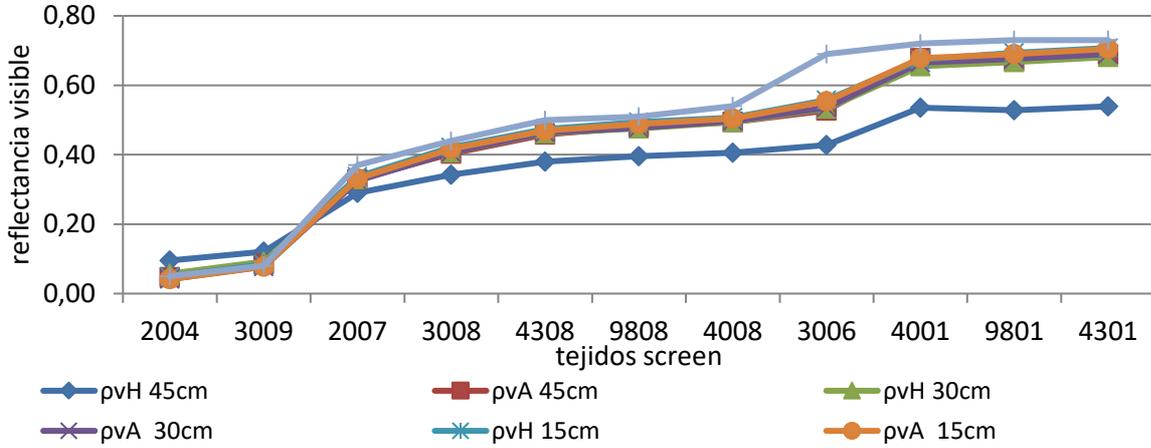


Fig. 4: Valores de reflectancia cuantificados con las distintas metodologías y a distintas alturas muestra-sensor para cada uno de los tejidos screen analizados.

Tabla 4: Comparación de metodologías ( $\rho_{vH}$ ,  $\rho_{vA}$ ) y distancias (50 cm, 30 cm, 15 cm): valores de reflectancia visible; error absoluto de valores registrados ( $E_a$ ); error absoluto promedio por técnica y distancia ( $E_a$  promedio); error cuadrático medio ( $RMSE$ ); reflectancia visible medida en espectrorradiómetro ( $\rho_v$ ).

textil	$\rho_{vH}$ 50 cm	$E_a$	$\rho_{vA}$ 50 cm	$E_a$	$\rho_{vH}$ 30 cm	$E_a$	$\rho_{vA}$ 30 cm	$E_a$	$\rho_{vH}$ 15 cm	$E_a$	$\rho_{vA}$ 15 cm	$E_a$	$\rho_v$
2004	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,05</b>	0,00	<b>0,06</b>	0,01	<b>0,04</b>	0,01	<b>0,05</b>	0,00	<b>0,04</b>	0,01	<b>0,05</b>
3009	<b>0,12</b>	0,04	<b>0,08</b>	0,00	<b>0,09</b>	0,01	<b>0,08</b>	0,00	<b>0,08</b>	0,00	<b>0,08</b>	0,00	<b>0,08</b>
2007	<b>0,29</b>	0,08	<b>0,33</b>	0,04	<b>0,33</b>	0,04	<b>0,33</b>	0,04	<b>0,34</b>	0,03	<b>0,33</b>	0,04	<b>0,37</b>
3008	<b>0,34</b>	0,10	<b>0,40</b>	0,04	<b>0,41</b>	0,03	<b>0,41</b>	0,03	<b>0,42</b>	0,02	<b>0,42</b>	0,02	<b>0,44</b>
4308	<b>0,38</b>	0,12	<b>0,46</b>	0,04	<b>0,46</b>	0,04	<b>0,46</b>	0,04	<b>0,47</b>	0,03	<b>0,47</b>	0,03	<b>0,50</b>
9808	<b>0,40</b>	0,11	<b>0,48</b>	0,03	<b>0,48</b>	0,03	<b>0,48</b>	0,03	<b>0,49</b>	0,02	<b>0,49</b>	0,02	<b>0,51</b>
4008	<b>0,41</b>	0,13	<b>0,49</b>	0,05	<b>0,49</b>	0,05	<b>0,50</b>	0,04	<b>0,51</b>	0,03	<b>0,50</b>	0,04	<b>0,54</b>
3006	<b>0,43</b>	0,26	<b>0,53</b>	0,16	<b>0,53</b>	0,16	<b>0,54</b>	0,15	<b>0,56</b>	0,13	<b>0,55</b>	0,14	<b>0,69</b>
4001	<b>0,54</b>	0,18	<b>0,68</b>	0,04	<b>0,65</b>	0,07	<b>0,66</b>	0,06	<b>0,67</b>	0,05	<b>0,68</b>	0,04	<b>0,72</b>
9801	<b>0,53</b>	0,20	<b>0,67</b>	0,06	<b>0,67</b>	0,06	<b>0,68</b>	0,05	<b>0,69</b>	0,04	<b>0,69</b>	0,04	<b>0,73</b>
4301	<b>0,54</b>	0,19	<b>0,69</b>	0,04	<b>0,68</b>	0,05	<b>0,69</b>	0,04	<b>0,71</b>	0,02	<b>0,70</b>	0,03	<b>0,73</b>
<i>Ea promedio</i>	0,12		0,05		0,05		0,05		0,03		0,04		
<i>RMSE</i>	0,39		0,15		0,15		0,15		0,11		0,12		

El comportamiento de las curvas en la Fig. 4, muestra claramente, el impacto del entorno ( $\rho_v$  del suelo: 0,2) en la técnica -  $\rho_{vH}$  / 50 cm - en la cual la reflectancia medida no se calibra respecto a un par patrón. Se observa que esta metodología, a una distancia muestra-sensor de 50 cm, sobreestima la  $\rho_v$  de los tejidos oscuros (gris-negro y negro-negro) con valores inferiores al 10% y subestima la reflectancia en los tejidos claros e intermedios (blanco-blanco, blanco-gris, gris-gris) con valores de  $\rho_v$  superiores al 30%. Este efecto se acentúa a medida que los valores de  $\rho_v$  son superiores –tejidos claros-. En relación al error de la

técnica, se refleja en los valores de  $E_a$  por tejido (entre 0,04 y 0,26), el  $E_a$  promedio (0,12) y el  $RMSE$  (0,39), que muestran que este método es el que más se aleja de los valores de  $\rho_v$  de referencia -medidos en espectrorradiómetro-. Es interesante advertir como la metodología  $\rho_{vA}$  a 50 cm subsana el impacto de la  $\rho_v$  del entorno, mediante la calibración del equipo con el uso de las máscaras negra y blanca de reflectancia conocida. Reduciendo los indicadores de error en la técnica Akbari adaptada -  $\rho_{vA}$  / 50 cm - a:  $E_a$  por tejido (entre 0,04 y 0,16),  $E_a$  promedio (0,05) y  $RMSE$  (0,15).

En la configuración donde la distancia sensor-muestra es de 30 cm vemos que el desempeño de ambas metodologías simplificadas es similar y se aproxima a la propuesta  $\rho_{vA}$  50 cm (Fig. 4). Presentando ambos métodos un Ea promedio de 0,05 y un RMSE de 0,15. Esto pone en evidencia que, la reducción en la distancia sensor-muestra (focalizando el campo de visión del sensor en la muestra) mejora significativamente la caracterización de los valores de reflectancia visible particularmente en mediante el método  $\rho_{vH}$ , con una variación del error cuadrático medio  $-\Delta RMSE$  de 0,24 (Tabla 4). Asimismo, la Tabla 4 muestra que en las configuraciones donde la distancia sensor-muestra es aún menor (15 cm) los valores de reflectancia visible cuantificados con las metodologías simplificadas se ajustan aún más a los medidos en espectrorradiómetro:  $\rho_{vH}$ : Ea promedio 0,03, RMSE 0,11;  $\rho_{vA}$ : Ea promedio 0,04, RMSE 0,12. Con una distancia de 15 cm detectamos que el uso de las máscaras y la posterior consideración de su reflectancia visible en el cálculo de la reflectancia visible de los tejidos screen no mejora los resultados obtenidos.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

A partir del análisis de los resultados surgen una serie de aspectos importantes a discutir vinculados a la metodología seleccionada y a las características del material:

En la Tabla 4, se observa que el Ea para ambas metodologías y todas las distancias sensor-muestra analizadas aumenta a medida que aumenta la reflectancia de los textiles. Los autores consideran que esto posiblemente es consecuencia a la decisión de colocar los tejidos a evaluar sobre la máscara negra patrón. Si bien el objeto de esta decisión fue minimizar el efecto del fondo sobre las mediciones de reflectancia difusa, es evidente que la reflectancia del soporte está impactando en los mismos, sobre todo en los tejidos claros y de mayor factor de apertura. Los resultados obtenidos muestran que, en los tejidos 2004 (negro-negro) y 3009 (negro-gris) que presenta valores de  $\rho_v$  próximos a los del fondo ( $\rho_v$  0,05) el Ea en la metodología con menor error -  $\rho_{vH}$  / 15 cm - es de 0,00. Este error se incrementa a valores que promedian un 0,03 para los tejidos de colores intermedios (gris-blanco / gris-gris) que presentan valores de reflectancia en promedio de 0,50. Elevándose a 0,06 el Ea promedio para los tejidos claros  $-\rho_v$  promedio de 0,72-. Particularmente significativo resulta el elevado Ea (0,13) que presenta el tejido screen 3006 (blanco-blanco), esto se debe a que este textil tiene un FA de 14% -el más elevado de los analizados- y por lo tanto el efecto del fondo se manifiesta de manera más acentuada. De acuerdo a estos resultados se propone avanzar sobre futuros ensayos, trabajando con soportes o fondos de colores semejantes al tejido cuya reflectancia se desea evaluar. Por ejemplo, emplear tres fondos con valores de reflectancia distintos (blanco 0,7, gris 0,5 y negro 0,05).

Otro aspecto interesante a tener en cuenta es el impacto del ángulo de incidencia de la fuente sobre el valor de la reflectancia medida. Si bien en principio los textiles screen presentan reflectancia exclusivamente difusa y la norma ASTM E1918-16 sostiene que este ensayo puede realizarse cuando el ángulo del sol con respecto a la normal de una superficie es inferior a 45°, las mediciones en espectrorradiómetros se realizan con una fuente de incidencia normal a la muestra. Es por ello que en futuros estudios se realizarán mediciones con incidencia de la fuente (sol) próxima a la normal a la muestra, con el objetivo de descartar

que esto sea una posible fuente de error en la caracterización de la  $\rho_v$ .

Como se discutió previamente los textiles screen no son materiales completamente homogéneos, esto parecía en un primer momento ser un punto crítico al momento de reducir la distancia entre el sensor y la muestra. Sin embargo, los resultados de este estudio demuestran que la heterogeneidad del tejido acepta, sin perjudicar los resultados, la aproximación hasta una distancia de 15 cm del sensor fotométrico testeado, mostrando bajo nivel de error respecto a la medición de referencia.

Finalmente, se concluye que las técnicas evaluadas - Akbari adaptada y reflectancia hemisférica a 15 y 30 cm de distancia sensor-muestra - resultan adecuadas para cuantificar de forma confiable, económica y simple, la reflectancia visible difusa de las cortinas roller screen con un RMSE inferior al 0,15 respecto a los valores obtenidos con la técnica de referencia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Mag. Ing. Sergio R. Gor y a la Esp. Ing. Bárbara Silva del Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión - UNT / Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión - UNT-CONICET por la cuantificación de los valores de reflectancia visible en espectrorradiómetro.

Los autores de este trabajo agradecen a la ANPCYT: PICT 2017-1088; PICT 2016-1487; PICT 2018-03269; PICT-2018-02080; PICT 2019- 04356.

## REFERENCIAS

- Akbari H., Levinson R. y Stern S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy* **82**, 7, 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Andersen M. (2004). Innovative bidirectional videogoniophotometer for advanced fenestration systems. Tesis doctoral. Swiss Federal Institute of Technology, *Solar Energy and Building Physics* Laboratory. Lausanne, Switzerland. Recuperado de: <https://infoscience.epfl.ch/record/33416>.
- Aste N., Tagliabue L. C., Palladino P. y Testa D. (2015). Integration of a luminescent solar concentrator: Effects on daylight, correlated color temperature, illuminance level and color rendering index. *Solar Energy* **114**, 174-82. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.042>
- ASTM. (2016). ASTM E1918-16, Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/E1918.htm>
- Carli Inc. (2006). Implementation of wovenshade method in layeroptics.dll. Recuperado de: <https://windows.lbl.gov/sites/all/files/Downloads/woven-shade-technical-doc.pdf>
- CEN. (2006). Blinds and shutters - Thermal and visual comfort - Performance characteristics and classification. European standard NS-EN 14501: 2006.
- CEN. (2008). Blinds and shutters - Thermal and visual comfort - Test and calculation methods. European

- standard EN 14500: 2008.
- CEN. (2011). Glass in building — Determination of luminous and solar characteristics of glazing. European standard NS-EN 410:2011.
- Chan Y. C., Tzempelikos A. y Konstantzos I. (2015). A systematic method for selecting roller shade properties for glare protection. *Energy and Building* **92**, 81-94. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.057>
- Choudhury A. K. R. (2014). Principles of Colour and Appearance Measurement: Object appearance, colour perception and instrumental measurement, pp. 53–102. Elsevier.
- Deroisy B., Deneyer A., Lethé G. y Flamant G. (2013). Performance analysis of common solar shading devices: experimental assessment and ray-tracing calculations using bi-directional scattering distribution data. Actas de la: CIE Centenary Conference: Towards a New Century of Light. Recuperado de: [http://www.verozo.be/sites/verozo/files/files/Publicaties/LUX%20EUROPA%202013%20-%20Deneyer\\_Full\\_Article\\_20130610.pdf](http://www.verozo.be/sites/verozo/files/files/Publicaties/LUX%20EUROPA%202013%20-%20Deneyer_Full_Article_20130610.pdf)
- Fontoynt M. (1999). Daylight performance of buildings, James and James, London, UK.
- Inanici M. N. (2006). Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. *Lighting Research and Technology* **38**, 2, 123–134. Recuperado de: [https://faculty.washington.edu/inanici/Publications/LRT\\_Published.pdf](https://faculty.washington.edu/inanici/Publications/LRT_Published.pdf)
- Jonsson J. C., Lee E. S. y Rubin M. (2008). Light scattering properties of woven shade-screen material used for daylighting and solar heat-gain control. *SPIE Optics + Photonics* 7065, 70650R-70650R-11. Recuperado de: <https://facades.lbl.gov/publications/light-scattering-properties-woven>
- Kong Z., Utzinger M. y Liu L. (2015). Solving glare problems in architecture through integration of HDR image technique and modeling with DIVA. Actas del: 14th Building Simulation Conference, Hyderabad, India. 7 al 9 de Diciembre, 1213–20. Recuperado de: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2429.pdf>
- Konstantzos I. y Tzempelikos A. (2017). An online interactive tool to assess visual environment in offices with roller shades. *Energy Procedia* **122**, 685-690. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.370>
- Kotey N. A., Wright J. L. y Collins M. R. (2009). Determining off-normal solar optical properties of roller blind materials. *ASHRAE Transaction* **115**, 145-154. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/144150302.pdf>
- LBNL. (2015). WINDOW 7.3 Software. Lawrence Berkeley National Laboratory. Recuperado de: <https://windows.lbl.gov/software/window/window.html>
- Makaremi N., Schiavoni S., Pisello A. L. y Cotana F. (2019). Effects of surface reflectance and lighting design strategies on energy consumption and visual comfort. *Indoor and Built Environment* **28**, 4, 552–563. <https://doi.org/10.1177%2F1420326X18793170>
- Mardaljevic J., Brembilla E. y Drosou N. (2015). Illuminance-proxy high dynamic range imaging: a simple method to measure surface reflectance. Actas 28th Session of the International Commission on Illumination (CIE 2015), 28 de junio al 4 de julio, Manchester. Recuperado de: [https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference\\_contribution/Illuminance-proxy\\_high\\_dynamic\\_range\\_imaging\\_a\\_simple\\_method\\_to\\_measure\\_surface\\_reflectance/9429272/1](https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference_contribution/Illuminance-proxy_high_dynamic_range_imaging_a_simple_method_to_measure_surface_reflectance/9429272/1)
- Mermet. (2019). Mermet Technical Fabric Guide. Recuperado de: [https://www.rollershow.com.ar/wp-content/uploads/2018/02/MERMET\\_Tech\\_Guide.pdf](https://www.rollershow.com.ar/wp-content/uploads/2018/02/MERMET_Tech_Guide.pdf)
- OPTRONICS L. (2020a). OL Series 750 Automated Spectroradiometric Measurement, pp. 1–3. Recuperado de: <https://optroniclabs.com/wp-content/uploads/2014/10/B200-Dec2020-OLI-750.pdf>
- OPTRONICS L. (2020b). OL SERIES 740-70 Integrating Sphere Diffuse Reflectance Attachment, pp. 1. Recuperado de: <https://optroniclabs.com/wp-content/uploads/2014/10/B066-Dec2020-OL-Series-740-70.pdf>
- OPTRONICS L. (2020c). OL SERIES 740-20 High Intensity Source Attachment, pp. 1–2. Recuperado de: <https://optroniclabs.com/wp-content/uploads/2014/10/B065-Dec2020-OL-Series-740-20.pdf>
- Pierson C., Cauwerts C., Bodart M. y J. Wienold. (2021). Tutorial: Luminance Maps for Daylighting Studies from High Dynamic Range Photography. *LEUKOS* **17**, 2, 140-169. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/15502724.2019.1684319>
- Singh R. y Rawal R. (2019). Effect of surface reflectance on lighting efficiency in interiors. Actas de 12th Conference of International Building Performance Simulation, pp. 2301–2308, Sydney. Recuperado de: [http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2011/p\\_1725.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2011/p_1725.pdf)
- Tzempelikos A. y Chan Y. C. (2016). Estimating detailed optical properties of window shades from basic available data and modelling implications on daylighting and visual comfort. *Energy and Building* **126**, 396-407. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.038>
- Villalba A., Alchapar N., Correa E. y Pattini A. (2018). Métodos de evaluación opto-térmica de materiales y componentes de la envolvente edilicia. Situación en Argentina. *Revista Hábitat Sustentable*, **9**, 2, 64-79. Recuperado de: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/3362>.
- Villalba A., Pattini A. y Córlica L. (2012). Diagnóstico morfológico descriptivo de las envolventes según su interacción con el clima luminoso. *Ambiente Construido* **12**, 4, 159-175.
- Villalba A., Pattini A., Mercado R. y Garro J. (2019). Medición de Transmitancia Visible de textiles -screen y traslúcidos- con adaptación de Norma NFRC 202. Actas del XI Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura - CRETA 2019 "Tecnologías para una Arquitectura Regionalmente Sustentable". Mar del Plata, Argentina.
- Wienold J., Kuhn T. E., Christoffersen J. y Andersen, M. (2017). Annual glare evaluation for fabrics. Actas PLEA. Edimburgh. Design to Thrive. Recuperado de: <https://infoscience.epfl.ch/record/231231>.