

## Medidas de reflectancia solar y emisividad de materiales urbanos. Fiabilidad de las medidas in-situ con equipos portátiles.

G. Pérez<sup>(1,2)</sup>, F. Martín-Consuegra<sup>(1)</sup>, A. Martínez<sup>(1,3)</sup>, B. Frutos<sup>(1)</sup>, C. Alonso<sup>(1)</sup>, F. de Frutos<sup>(1)</sup> y A. Guerrero<sup>(1)</sup>

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC  
Serrano Galvache 4, 28033 Madrid

<sup>(1)</sup>Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC  
Serrano Galvache 4, 28033 Madrid

<sup>(2)</sup>+34 911035754, [gperezaq@ietcc.csic.es](mailto:gperezaq@ietcc.csic.es)

<sup>(3)</sup>Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, ETSAM, UPM  
Av. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

**RESUMEN:** La reflectancia en el rango solar de longitudes de onda ( $\rho_s$ ) y la emisividad ( $\epsilon$ ) de los materiales definen el porcentaje de energía solar que absorben y la capacidad de irradiar esta energía a la atmósfera. Por ello, son parámetros fundamentales para la selección de materiales de acabado exterior en fachadas, cubiertas y pavimentos que favorezcan la absorción o la reflexión de la radiación solar en función de las condiciones climáticas. En este trabajo se describe el uso de un espectrómetro de fibra óptica y un emisómetro portátiles para la caracterización in-situ de materiales de acabado exterior característicos de áreas urbanas vulnerables de Madrid. Ambos equipos constituyen una opción adecuada para esta aplicación por su robustez, tamaño reducido y bajo peso y por la obtención de medidas en tiempos cortos, pero constan de sistemas de medida sencillos que pueden comprometer la fiabilidad de los resultados. Se propone definir la metodología de uso que proporciona valores de  $\rho_s$  y  $\epsilon$  más fiables con los equipos portátiles mediante la comparación de los resultados con los obtenidos en laboratorios acreditados.

### 1. INTRODUCCIÓN

La reflectancia en el rango solar de longitudes de onda ( $\rho_s$ ) y la emisividad ( $\epsilon$ ) de los materiales de acabado exterior en edificios y pavimentos definen el porcentaje de energía solar que absorben y su capacidad de irradiar esta energía a la atmósfera. Por tanto, estos parámetros determinan en gran medida la demanda energética anual de los edificios y el sobrecalentamiento urbano en periodos calurosos. La selección de materiales de acabado exterior que optimicen la gestión de la energía solar para las condiciones climáticas locales se postula como una importante estrategia para mejorar la sostenibilidad de las ciudades [1].

La caracterización de los parámetros termo-ópticos,  $\rho_s$  y  $\epsilon$ , de los materiales de acabado exterior en fachadas, cubiertas y pavimentos urbanos [2] permite estimar mediante herramientas de simulación energética el impacto de los materiales existentes sobre el clima urbano y proponer soluciones de mejora mediante materiales con propiedades más adecuadas. Estas soluciones son especialmente necesarias en las áreas urbanas vulnerables que contienen edificios con una baja eficiencia energética y, por tanto, con una falta de confort interior, tanto en periodos fríos como de calor. Igualmente, son necesarias en las zonas más afectadas por el sobrecalentamiento urbano en climas cálidos.

En laboratorios de metrología óptica o de desarrollo de materiales, se emplean espectrofotómetros y emisómetros de altas prestaciones para medir de manera fiable los parámetros  $\rho_s$  y  $\epsilon$  de los materiales. Para ello se deben utilizar muestras de dimensiones y formas adecuadas para el alojamiento disponible en cada equipo. Sin embargo, en el caso de los materiales que están en uso en los edificios y pavimentos de áreas urbanas, resulta

complicado extraer muestras representativas para llevar a cabo su caracterización en estos equipos de altas prestaciones. Para caracterizar estos materiales se deben utilizar equipos portátiles que permitan realizar medidas in-situ sin alterar el material.

Existen distintos tipos de equipos portátiles disponibles a nivel comercial para la medida de la reflectancia solar y la emisividad [3]. En general, se caracterizan por tener tamaño y peso reducidos, para facilitar su transporte, por ser robustos para asegurar su resistencia en el uso en exterior, y por proporcionar medidas en tiempos cortos, que suele ser un requisito importante en trabajos de campo. Para alcanzar estas prestaciones, estos equipos suelen contar con sistemas de medida sencillos, que aportan una fiabilidad menor a las medidas que la obtenida mediante los equipos de laboratorio de altas prestaciones. Resulta por tanto necesario optimizar la metodología de uso de los equipos portátiles para aumentar la fiabilidad de los valores de  $\rho_s$  y  $\epsilon$  obtenidos.

En este trabajo se describe el uso de un espectrómetro de fibra óptica y un emisómetro portátiles para la caracterización de materiales urbanos en el marco del proyecto de investigación mateMad (PID2020-114873RB-C31 “Caracterización multidimensional de materiales urbanos: impacto sobre el ambiente exterior, la demanda energética y el bienestar de los ciudadanos”). Se analiza la capacidad de este equipamiento para obtener de manera fiable las medidas que requiere el proyecto: por un lado, la caracterización in-situ de materiales en uso como acabado exterior en fachadas, cubiertas y pavimentos en áreas urbanas vulnerables de Madrid; por otro lado, la caracterización en el laboratorio de materiales disponibles en el mercado e innovadores para estas aplicaciones.

## 2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PORTÁTILES DISPONIBLES

Para llevar a cabo la caracterización de la respuesta óptica en el rango solar se cuenta con el espectrómetro de fibra óptica que se muestra en la Fig. 1. El equipo está formado por una fuente de radiación halógena y dos espectrómetros (Black Comet para detección en el rango de 190 nm a 1080 nm y Dwarf Star para el rango de 900 nm a 1700 nm). La reflectancia se mide utilizando dos posibles sistemas de medida:

- una esfera integradora de la marca Ocean Optics, modelo SP-50-8-R-GT de 50 mm que permite la medida de la reflectancia total de la muestra (componentes especular y difusa) con un ángulo de incidencia de  $8^\circ$  y con la detección en un puerto situado a  $90^\circ$ .
- una sonda en la que siete fibras ópticas de iluminación se encuentran rodeando en círculo a una fibra central de medida de la radiación reflejada. La sonda se puede alojar en un accesorio que permite definir un ángulo de incidencia de la radiación de  $45^\circ$  con respecto a la superficie de la muestra o bien de  $90^\circ$  (incidencia normal). La distancia entre la punta de la sonda y la superficie a medir se debe optimizar para cada configuración, de manera que se obtenga la máxima señal en el espectrómetro.

Los distintos elementos del equipo se conectan entre sí mediante fibras ópticas únicas o bifurcadas de distintos diámetros, en función de la señal.

Para calibrar el equipo, se define la señal nula tapando la entrada de radiación mediante una máscara que se introduce en la ranura marcada con asterisco en la Fig. 1. De esta manera, no es necesario apagar la fuente de radiación en cada calibración, lo cual implicaría una pérdida de estabilidad de la señal. La calibración se completa mediante un patrón de Spectralon, con un valor de reflectancia (mayoritariamente difusa) mayor de 97% en todo el rango de medida del equipo. Se define el tiempo de integración de cada uno de los dos detectores para tener

alta señal, sin llegar a la saturación, y el número de barridos promediados para cada medida, en función del nivel de señal y del ruido admisible.

Este equipo permite la caracterización de muestras en condiciones controladas en un laboratorio, pero también es adecuado para medidas de campo, ya que cada medida no requiere un tiempo mayor de 30 s. Los distintos elementos necesarios tienen en conjunto un peso aceptable y se pueden recoger en una bolsa de pequeño tamaño, además cuenta con baterías externas para utilizar el sistema durante varias horas de manera autónoma (Fig. 1).



Figura 1 – Equipamiento portátil disponible para la medida in-situ de la reflectancia solar y la emisividad de materiales urbanos.

Para la medida de la emisividad se cuenta con un emisómetro modelo AE de la marca Devices and Services (D&S) que se muestra en la Fig. 1. No es necesario calentar las muestras para la medida, ya que el propio equipo calienta la zona de detección mediante una corriente eléctrica y proporciona la emitancia hemisférica total a una temperatura de 65°C. Cuenta con un voltímetro que indica el valor de la emitancia una vez que se ha calibrado su escala con dos patrones de alta y de baja emisividad proporcionados junto al equipo. Existen distintas metodologías de medida con este equipo, que dependen del material a caracterizar y que se describen en detalle en las notas técnicas que proporciona el fabricante [4] y en la referencia [5]. El emisómetro tiene un peso y un tamaño muy reducidos y las medidas se pueden tomar cada 90 s aproximadamente, por lo que es adecuado para realizar medidas de campo. Como inconvenientes principales para las medidas in-situ, la muestra y los patrones deben estar a la misma temperatura para que la medida sea fiable y el equipo disponible en este caso no dispone de alimentación propia o batería externa, por lo que es necesario conectarlo a la red eléctrica para su utilización.

### 3. CONDICIONES PARA MEDIDAS DE CAMPO DE LA REFLECTANCIA SOLAR

#### 3.1. Selección del sistema de medida

El primer paso para definir las condiciones para la medida de la reflectancia solar in-situ de materiales urbanos, consiste en seleccionar el sistema de medida, entre las tres opciones definidas: con esfera integradora o con sonda de reflectancia, situada a 45° o a 90°.

En el caso de la esfera integradora, se observa que la señal en el puerto de detección de la esfera es baja, especialmente para la mayoría de los materiales urbanos a caracterizar, con acabados rugosos y en muchos casos de tonos relativamente oscuros. Para obtener una relación señal/ruido aceptable en los espectros se pueden aplicar dos estrategias:

- utilizar una fibra óptica de diámetro alto (del orden de 1000  $\mu\text{m}$ ) entre la esfera y los espectrómetros. El inconveniente es que, al aumentar el diámetro de la fibra, aumenta su fragilidad y por ello se reduce considerablemente su vida útil en medidas de campo.
- aumentar el tiempo de integración y/o el número de barridos promediados, lo cual también representa un inconveniente importante para este tipo de medidas.

Por estos motivos, para medir in-situ la reflectancia de materiales urbanos, resulta más adecuado utilizar el sensor de tipo sonda. Esta sonda es suficientemente robusta para esta aplicación y proporciona un nivel de señal alto, que permite obtener medidas con relación señal/ruido adecuada con un solo barrido y tiempos de integración bajos, del orden de 40/300 ms en el rango de baja/alta longitud de onda.

Para seleccionar la geometría de medida más adecuada, se incluyen en la Fig. 2 los espectros de reflectancia de tres muestras, obtenidos con las dos inclinaciones posibles de la sonda. Se trata de muestras de tres materiales aplicables como acabado en fachadas de edificios: M1 y M3 son morteros con un acabado rugoso en dos colores diferentes, mientras que M2 es una baldosa cerámica con color similar a M3, pero con superficie lisa [6]. Se incluyen también los espectros obtenidos con el espectrofotómetro de altas prestaciones Perkin Elmer Lambda 950 del Instituto de Óptica del CSIC (PE L950 en la figura), que se consideran como referencia. Se muestra sólo el rango de longitudes de onda entre 250 y 1000 nm para mayor claridad.

Como primera apreciación, se observa en la Fig. 2 que las medidas que proporciona el equipo de fibra óptica presentan un ruido significativo y creciente al disminuir la longitud de onda ( $\lambda$ ) por debajo del valor de 400 nm, aproximadamente. Este comportamiento se debe a la baja señal del equipo en este rango del espectro y resta fiabilidad a las medidas de campo de menor longitud de onda. Para valores de  $\lambda$  mayores de 400 nm se observa una forma similar para los distintos espectros de cada muestra.

Las curvas rojas discontinuas de la Fig. 2 corresponden a los espectros medidos con la sonda a 45° en distintos puntos de la superficie de cada muestra. La máxima diferencia de reflectancia entre los espectros, en el rango de 400 nm a 1000 nm, es de 12,0%-6,4%-21,5% para las muestras M1-M2-M3. Aunque no se recoge en las gráficas, se ha comprobado que las medidas realizadas con esa misma geometría en un mismo punto de cada muestra presentan diferencias máximas de reflectancia claramente menores: de 2,0%-1,0%-1,2% para las muestras M1-M2-M3. Por tanto, los resultados indican que la dispersión observada en la Fig. 2 no se debe a una falta de reproducibilidad de las medidas con la sonda a 45°, sino que debe relacionarse con diferencias reales de respuesta óptica entre distintas zonas de la muestra. Puesto que el acabado superficial de las muestras M1 y M3 es claramente irregular, es razonable que la dispersión sea mayor que en la muestra M2, cuyo acabado es más liso y uniforme.

Por otro lado, en el caso de la baldosa cerámica (M2) se observa que el espectro de referencia se reproduce cuando se sitúa la sonda de reflectancia a 45°, de manera que la fibra central de detección en la sonda recoge de manera más eficiente la componente difusa de la radiación reflejada que la especular. Cuando se sitúa la sonda perpendicular a la superficie de la muestra, se obtiene una reflectancia significativamente más alta. En el caso de las muestras de mortero (M1 y M3), cuya superficie presenta una alta rugosidad, es de esperar que la componente difusa de la radiación reflejada se recoja de manera más eficiente cuando el haz de radiación incide perpendicularmente a la superficie. De manera coherente, los espectros obtenidos situando la sonda a 90° reproducen adecuadamente los espectros de referencia correspondientes, mientras que los espectros a 45° proporcionan valores mayores de reflectancia

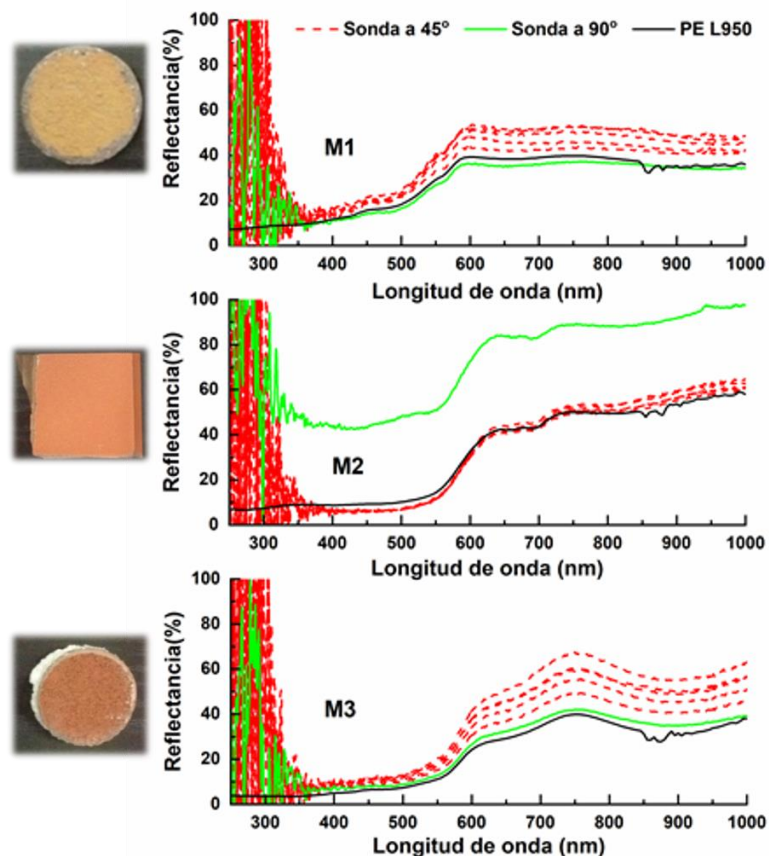


Figura 2 – Reflectancia de tres muestras de materiales de acabado de fachadas, medidas con el espectrómetro de fibra óptica (situando la sonda de reflectancia a 45° y a 90°) y con el equipo de altas prestaciones PerkinElmer Lambda 950.

### 3.2. Medidas de reflectancia en campo

Una vez analizado el comportamiento del equipo de fibra óptica en el laboratorio, se ha llevado a cabo la caracterización de la reflectancia solar de materiales urbanos habituales en la ciudad de Madrid mediante medidas de campo. Considerando la componente predominante en la radiación reflejada en función de la rugosidad de cada material, se ha situado la sonda de reflectancia a 45° o a 90°.

Se han encontrado algunos inconvenientes en estas medidas:

- Cuando se realizan medidas en zonas soleadas, se observa un aumento significativo del ruido en los espectros. Por ello, es necesario evitar el sobrecalentamiento del equipo, asegurando que no incida sobre él la radiación solar mediante elementos de sombra.
- Se debe minimizar la manipulación de las fibras ópticas que conforman la sonda de reflectancia durante las medidas para aumentar su vida útil y para reducir posibles variaciones de la señal. Resulta conveniente realizar la calibración del espectrómetro antes de medir cada material, situando el patrón de reflectancia lo más próximo posible a la superficie para asegurar así la mínima manipulación de las fibras entre la calibración y la medida.
- Si el soporte de la sonda no tiene un apoyo adecuado sobre la superficie del material a medir (por rugosidad excesiva o falta de planitud de la superficie) se produce una diferencia significativa en la reflectancia medida con los dos espectrómetros en el rango de longitud de onda en el que coinciden. Se debe por tanto optimizar la colocación del soporte para minimizar esta diferencia.

La Fig. 3 recoge, como ejemplo, los resultados obtenidos in-situ para un adoquín gris base-cemento representativo de los habituales en las aceras de Madrid, tomando las precauciones indicadas para aumentar la fiabilidad de las medidas. Se presentan los espectros de reflectancia en el rango de longitudes de onda entre 350 nm y 1750 nm y su promedio. De acuerdo con el criterio establecido en el apartado 3.1, la medida de reflectancia se ha realizado situando la sonda a 90° de la superficie, puesto que el acabado de este material es rugoso. Se ha obtenido una coincidencia adecuada de la reflectancia obtenida con los dos espectrómetros en dos de las medidas, pero en la tercera se observa un salto apreciable entre ambos a pesar de las precauciones. Por otro lado, la máxima diferencia de reflectancia entre los espectros en el rango de 400 nm a 1000 nm es de 7,9%. Este valor es del mismo orden o menor que las diferencias observadas en las medidas de la Fig. 2 y puede relacionarse con variaciones en las propiedades del material en distintos puntos de la superficie apreciables a simple vista.

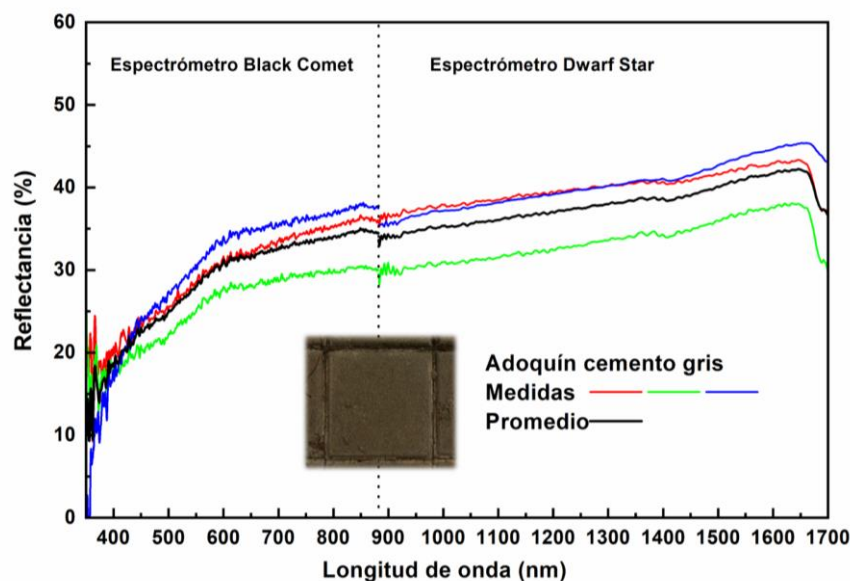


Figura 3. Reflectancia de un adoquín habitual en las aceras de Madrid, medida con el espectrómetro de fibra óptica situando la sonda de reflectancia a 90°

En general, los resultados indican que es posible llevar a cabo la caracterización óptica in-situ de materiales urbanos mediante el espectrómetro de fibra óptica portátil disponible. Sin

embargo, resulta necesario estudiar la fiabilidad de las medidas para establecer una metodología que permita obtener resultados reproducibles en las medidas de campo.

### 3.3. Medidas de emisividad

La medida de emisividad con el equipo portátil AE de D&S en el laboratorio no ha sido posible en el caso de las muestras de mortero M1 y M3 (Fig. 2) por su reducido tamaño y sólo la muestra de baldosa cerámica, M2, tiene una superficie suficiente para permitir un buen apoyo de la cabeza de medida del equipo. Sin embargo, tras realizar la calibración del equipo siguiendo la metodología descrita en la referencia [5], el valor de emitancia de la muestra no se estabiliza en el tiempo previsto (del orden de 90 s). De acuerdo con las notas técnicas del fabricante, este problema se debe a que la muestra tiene un espesor alto y una baja conductividad térmica, por lo que su superficie se calienta durante el tiempo que necesita el detector para alcanzar una lectura estable [4].

La mayor parte de los materiales urbanos de interés en el proyecto mateMad presentarán una problemática similar a la observada para la muestra M2 para su caracterización en laboratorio. Por ello, será necesario emplear la metodología propuesta para este caso por el fabricante [4] que implica la medida previa de una cinta adhesiva sobre el disipador del calor, posteriormente de la misma cinta sobre la muestra a caracterizar y finalmente de la superficie libre de la muestra. En los dos últimos pasos se deben realizar varias medidas, deslizando el medidor a distintos puntos de la superficie que no se hayan calentado, para que el detector se acerque al valor de emitancia correcto.

Como ejemplo se ha medido con esta metodología la emitancia de un adoquín como el mostrado en la Fig. 3, pero que no está implementado en un pavimento y por tanto se puede medir en el laboratorio. Los resultados obtenidos de las distintas medidas ( $\epsilon_i$ ) se recogen en la Tabla 1 e indican una estabilización aceptable de la medida. Sin embargo, el tiempo de medida de cada muestra con esta metodología aumenta considerablemente con respecto al tiempo del orden de 90 s que implica una medida directa.

	$\epsilon_i$
Cinta adhesiva sobre disipador	0,88/0,89/0,89/0,89
Cinta adhesiva sobre adoquín	0,90-0,88-0,88-0,90-0,88-0,88
Adoquín	0,93-0,91-0,92-0,93-0,94-0,94-0,93-0,93-0,93-0,93

**Tabla 1: Valores de emitancia obtenidos para un adoquín similar al mostrado en la Fig. 3, siguiendo la metodología descrita en [4].**

Para la caracterización in-situ de los materiales urbanos, es de esperar que los problemas relacionados con el calentamiento de la superficie a medir se agraven y que sea necesario aplicar la metodología indicada anteriormente para obtener valores de emitancia fiables. Sin embargo, el hecho de que esta metodología implique tiempos de medida altos, unido a la necesidad de conectar el equipo disponible a la red eléctrica, limitan significativamente la capacidad del equipo portátil disponible para la caracterización de la emisividad en medidas de campo.

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permiten avanzar hacia una metodología adecuada para la medida in-situ de la reflectancia solar y de la emisividad de materiales urbanos con los equipos portátiles disponibles para el proyecto de investigación mateMad:

- Para medida de materiales con el espectrómetro de fibra óptica se debe utilizar la configuración que recoja de manera más eficiente la componente de radiación difusa. Esta configuración es con la sonda de reflectancia a 45° en el caso de muestras con superficie predominantemente lisa y a 90° en el caso de que la superficie sea rugosa.
- Para obtener medidas de reflectancia in-situ más fiables, se debe evitar el sobrecalentamiento del equipo mediante elementos de sombra, minimizar la manipulación de las fibras ópticas y asegurar una buena colocación del soporte de la sonda sobre la superficie a caracterizar.
- El emisómetro portátil disponible permite la caracterización de muestras de los materiales en el laboratorio. Sin embargo, presenta inconvenientes importantes para la caracterización in-situ de los materiales urbanos. Se deben por tanto explorar otros equipos disponibles en el mercado que puedan ser más adecuados para esta aplicación.

En todo caso, se hace necesario estudiar en más detalle la fiabilidad de las medidas para establecer una metodología que permita obtener resultados reproducibles en las medidas de campo. En este sentido, resulta de interés el proyecto 21GRD03 PaRaMetriC, “Metrological framework for passive radiative cooling technologies” aprobado en la convocatoria Partnership in Metrology – Metrology for Green Deal (2021), que está coordinado por el INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) de Italia y en el que participan los autores del presente trabajo. Entre otros aspectos, en el marco del proyecto se prevé comparar las medidas precisas y trazables, realizadas en laboratorios acreditados, con las obtenidas in-situ empleando instrumentos portátiles. De esta manera, se identificarán los errores que conlleva el uso de los instrumentos comerciales que están disponibles para estas aplicaciones.

## 5. REFERENCIAS

- [1] S. Croce y D. Vettorato, Sustainable Cities and Society 75 (2021) 103313
- [2] N.L. Alchapar, E.N. Correa y M.A. Cantón, Energy and Buildings 69 (2014) 22–32
- [3] S. Caron et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 238 (2022) 111579
- [4] D&S Technical Note 10-2 en <https://www.devicesandservices.com/TechNotes/TN78-2.pdf>
- [5] V.L. Volantino y E.J. Cornejo Siles, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 14 (2010) 08.31-08.38
- [6] C. Alonso et al., Solar Energy 146 (2017) 470–483

## 6. AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-114873RB-C31 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ .