

(05-029) - Experimental development and proof concept of cool pavements as a nature-based solution

García-Melgar, Paulo ¹; Montero-Gutiérrez, Mpa^z ¹; ROMERO GARCÍA, CRISTIAN ¹;
Ruda Sarria, Francisco ¹; Álvarez Domínguez, Servando ¹

¹ Universidad de Sevilla

Global warming is increasing the frequency and intensity of heatwaves, turning urban areas into inhospitable environments, especially during the summer season by aggravating the urban overheating effect. Outdoor pavements, which occupy 20-40% of the urban surface, play a key role in this phenomenon due to their dark colour and low albedo, which contribute to high surface temperatures and heat accumulation. This study proposes a nature-based solution to mitigate the impact of the overheating by cooling the pavements with water collected during the rainy season. Water acts as a coolant, significantly reducing the pavement's surface temperature by up to 20°C compared to dry samples exposed to the sun. As a result, a design guide is presented, which considers different types of pavements, their thicknesses, albedos, and compositions, highlighting their cooling effectiveness. Experiments show that water-cooled pavements eliminate the risk of overheating compared to the air temperature. This strategy offers an effective and sustainable approach to counteract the negative effects of the overheating in urban environment.

Keywords: Keywords: Comfort in urban environment; Passive cooling; Urban Overheating; Cool pavements; Reflective pavements;

Desarrollo experimental y prueba de concepto de pavimentos fríos como solución basada en la naturaleza

El calentamiento global está generando olas de calor más frecuentes e intensas, convirtiendo las áreas urbanas en entornos inhóspitos, especialmente durante el verano debido al agravamiento del sobrecalentamiento urbano. Los pavimentos exteriores, que ocupan el 20-40% de la superficie urbana, desempeñan un papel clave en este fenómeno debido a su color oscuro y bajo albedo, lo que contribuye a altas temperaturas superficiales y la acumulación de calor. Este estudio propone una solución basada en la naturaleza para mitigar el impacto del sobrecalentamiento, enfriando los pavimentos con agua recogida en la temporada de lluvias. El agua actúa como un refrigerante, reduciendo significativamente la temperatura superficial del pavimento hasta 20°C en comparación con muestras secas expuestas al sol. Como resultado, se presenta una guía de diseño que contempla diferentes tipos de pavimentos, sus espesores, albedos y composiciones, destacando su eficacia de enfriamiento. Los experimentos muestran que los pavimentos enfriados con agua eliminan completamente el riesgo de sobrecalentamiento en comparación con la temperatura del aire. Esta estrategia presenta un enfoque efectivo y sostenible para contrarrestar los efectos negativos del sobrecalentamiento en entornos urbanos.

Palabras clave: Palabras clave: Pavimentos fríos; Confort en entorno urbano; Enfriamiento pasivo; Pavimentos reflectantes; Sobrecalentamiento urbano

Correspondencia: cromero3@us.es

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por los proyectos "CONSTANCY- Metodologías de urbanización resiliente y acondicionamiento natural mediante soluciones basadas en la naturaleza y el patrimonio cultural para recuperar la vida en



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

la calle" (PID2020-118972RB-I00) y el proyecto "NATURBEAM- Iluminando el camino hacia un futuro más verde para restaurar la habitabilidad urbana a través de soluciones basadas en la naturaleza" (TED2021-130416B-I00) por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades.

El segundo autor esta financiado por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades mediante la beca doctoral FPU22/03587.

El cuarto autor está financiado con una subvención pública para el desarrollo del «Programa INVESTIGO» (Actividad: C23.I1.P03.S01.01 ANDALUCÍA), financiada con cargo a los fondos procedentes del «Mecanismo de Recuperación y Resiliencia».

1. Introducción

El problema crucial que enfrentamos en la actualidad, el cambio climático y más concretamente el sobrecalentamiento de zonas urbanas, ha ocasionado una alteración en los patrones meteorológicos, generando implicaciones de gran magnitud para la existencia humana, los ecosistemas y el porvenir próximo. Esta fenomenología ha desencadenado un incremento en las temperaturas promedio de hasta 1,5°C, propiciando la aparición de olas de calor más habituales, intensas y prolongadas (International Energy Agency, 2021). Por ejemplo, el verano de 2023 marcó las temperaturas más altas en España desde el inicio de los registros climáticos (Agencia Estatal de Meteorología, 2023). Estas temperaturas extremadamente elevadas han impactado de forma directa en la habitabilidad de los habitantes y en su bienestar, teniendo como consecuencia un total de 2155 fallecimientos atribuidos al calor excesivo, lo cual posiciona a este fenómeno como el tercer verano más letal registrado por esta razón (Escuela Nacional de Sanidad, 2015; Rodríguez, 2023).

El impacto de las áreas urbanas en la biosfera es significativamente relevante a pesar de ocupar una pequeña porción de la superficie terrestre, esto se debe a la alta densidad de población y a las actividades económicas que allí se desarrollan (Jansson et al., 2013). La concentración de población, bienes y actividades económicas en las ciudades las vuelve particularmente vulnerables, convirtiéndolas en áreas prioritarias para evaluar el impacto del cambio climático (Dawson et al., 2007; Shi et al., 2016). Estudios como el de Riahi et al. evidencian, a través de diversos escenarios climáticos actuales y proyectados, que las ciudades europeas serán más susceptibles a eventos como inundaciones, sequías y olas de calor (Riahi et al., 2011). El objetivo actual para afrontar estos fenómenos se centra en la renaturalización de las zonas urbanas.

Los pavimentos tienen un impacto fundamental en el sobrecalentamiento urbano, ya que suelen ocupar entre el 20 y el 40% del entorno de las ciudades (ADEME, 2021). Su tonalidad oscura y su bajo albedo incrementan significativamente la temperatura superficial, lo que ocasiona la absorción y emisión de una cantidad considerable de energía térmica en el entorno (Seifeddine et al., 2023). Para reducir la absorción de la radiación solar en los pavimentos, los materiales empleados deben tener un albedo y una reflectividad altos (Santamouris, 2013). No obstante, se ha demostrado que los altos niveles de albedo pueden provocar molestias visuales a los ciudadanos (Rosso et al., 2016). Por esta razón, hay un creciente interés en la creación y utilización de pavimentos que absorban la radiación solar, pero mantengan temperaturas superficiales bajas para contrarrestar el efecto del sobrecalentamiento urbano y mejorar el confort térmico exterior.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es contribuir con una prueba de concepto a la refrigeración de pavimentos mediante el uso de agua como refrigerante, evaluando su potencial para mitigar el efecto de sobrecalentamiento urbano sin depender del enfriamiento evaporativo y su consumo de agua asociado. Este enfoque se basa en el uso de materiales de hormigón que pueden reproducirse con materiales convencionales disponibles en el mercado. Tras una consulta de mercado, se ha confirmado que es factible utilizar hormigón con un alto porcentaje de materiales reciclados para promover la sostenibilidad. El experimento busca determinar en qué medida se puede reducir la temperatura superficial de un pavimento permitiendo que el agua fluya a través de su superficie inferior. De esta manera, se aprovecha el calor sensible de esta agua de refrigeración en lugar del calor latente. Al no llegar agua a la superficie superior y, en consecuencia, evaporándose, el consumo de agua es considerablemente menor en comparación con la tecnología de pavimento frío evaporativo.

Para cumplir con los objetivos establecidos, la estructura del presente documento se detalla de la siguiente manera: La Sección 3 proporcionará una exposición detallada del proceso metodológico, que incluirá el diseño conceptual del pavimento, su implementación práctica, el sistema de monitoreo y control de propiedades, el desarrollo experimental y los indicadores específicos utilizados para evaluar el desempeño del pavimento. En la Sección 4 se expondrán los resultados obtenidos durante la experimentación, así como los indicadores derivados de los mismos. Finalmente, el documento concluirá con un análisis de las conclusiones extraídas de la investigación realizada.

3. Metodología

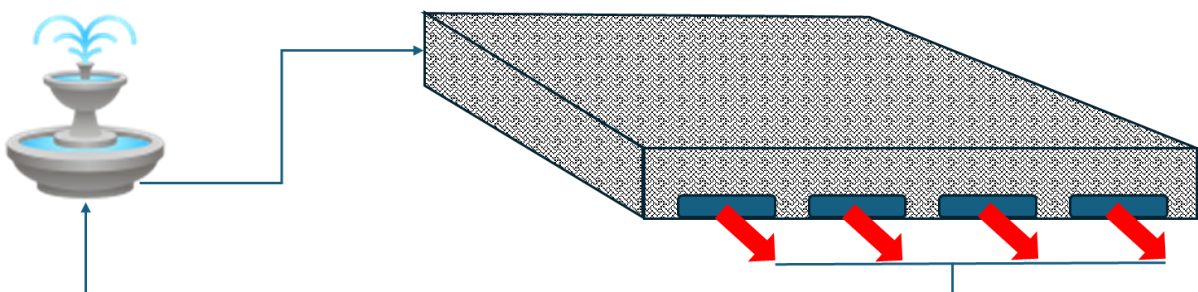
3.1 Concepto

El concepto de pavimento frío que se está investigando consiste en enfriar el pavimento de forma natural, aprovechando el agua recolectada a través de las lluvias y mediante un enfriamiento sensible.

El esquema de concepto mostrado en la Figura 1 representa la tecnología que se está estudiando. El elemento clave de esta tecnología es la idea de enfriar el pavimento mediante el paso de agua fría a través de canales en la superficie inferior de los pavimentos. De esta manera, a través de la conducción, el pavimento transfiere calor a esta agua fría, logrando reducir la temperatura superficial del pavimento. La transferencia de calor es principalmente sensible, ya que el agua solo circula por la parte inferior del pavimento, sin suficiente capilaridad para llegar a la superficie superior y evaporarse. Este fenómeno permite reducir significativamente el consumo de agua al no haber pérdidas por evaporación al ambiente.

Para implementar esta tecnología, es fundamental contar con un suministro de agua que pueda utilizarse como refrigerante para enfriar el pavimento. Para ello, se deben satisfacer dos requisitos distintos: el primero es disponer de una fuente de agua cercana y suficiente, y el segundo es lograr enfriar esa agua para su uso. La primera necesidad se aborda mediante la instalación de aljibes subterráneos donde se recolecte el agua de lluvia durante los períodos de lluvias intensas, para luego utilizarla en temporadas cálidas cuando sea necesario enfriar el pavimento. La segunda necesidad se resuelve mediante el uso de jets que pulverizan el agua en gotas lo suficientemente grandes para enfriarse con el ambiente, pero no tan pequeñas como para evaporarse. Estos jets pueden integrarse en elementos urbanos con suministro de agua, como fuentes en plazas, para lograr una completa integración de esta tecnología en la ciudad.

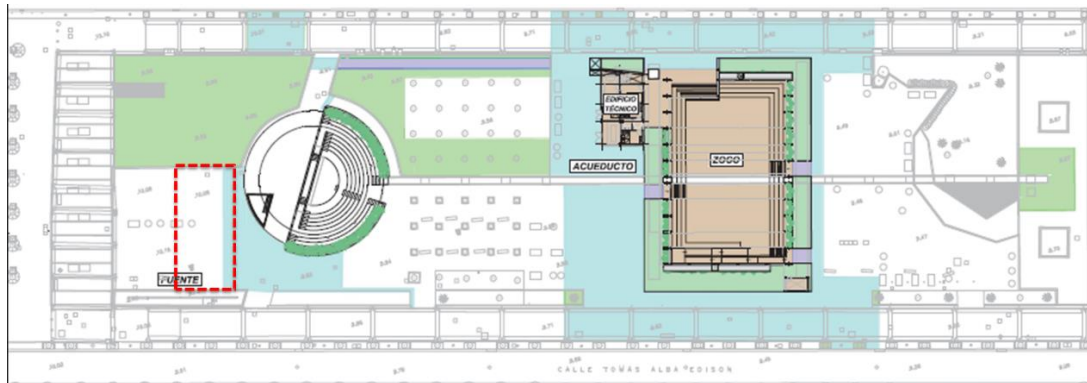
Figura 1. Esquema de concepto de pavimento frío con enfriamiento sensible.



3.2 Instalación experimental

Para llevar a cabo el estudio sobre el concepto de pavimentos fríos, se ha construido un banco de pruebas expuesto al medio ambiente para recoger datos experimentales durante la temporada de verano de 2022. Este banco de ensayos está situado en el laboratorio urbano Cartuja Qanat en la Avenida Tomas Alva Edison de la Isla de la Cartuja (Sevilla) (Amores et al., 2023; Monge Palma et al., 2023). El emplazamiento destaca por estar completamente despejado, lo que le permite recibir radiación solar prácticamente todo el día sin sombras que la obstruyan.

Figura 2. Localización del experimento en Cartuja Qanat.



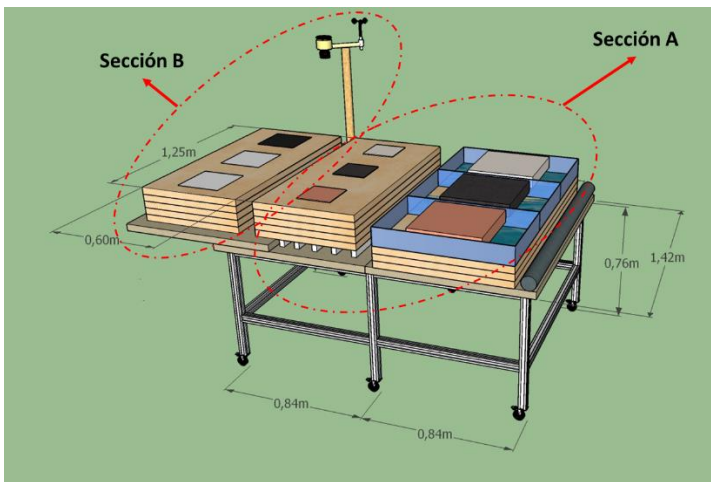
Adicionalmente, hay un estanque de agua en el lugar, que es crucial para llevar a cabo los experimentos. El agua utilizada como refrigerante procederá del estanque adyacente al banco experimental. Esta agua se enfría utilizando pulverizadores que atomizan el agua en gotas de un tamaño suficiente, impidiendo eficazmente que se evapore y permitiendo que vuelva al estanque a una temperatura más baja que la inicial. Esta tecnología se encuentra descrita con mayor detalle en el estudio de Delgado et al. (Guerrero Delgado et al., 2020). Este estanque se emplea como fuente de agua de refrigeración para los pavimentos según una simulación del diseño final, pudiendo replicarse en futuras implementaciones mediante el uso de agua proveniente de fuentes en plazas de ciudades u otros emplazamientos urbanos con suministro hídrico.

Figura 3. Fotografía del estanque de agua localizado en Cartuja Qanat.



Para la realización de este trabajo se diseñó un banco experimental donde se llevaron a cabo los experimentos. Es fundamental que el banco cuente con dos secciones diferenciadas: una para la evaluación de las temperaturas de los pavimentos y otra para la recogida de datos meteorológicos en tiempo real para su posterior análisis. En la Figura 4 (a) se puede observar que la Sección A está enfocada a la caracterización de pavimentos, con una parte dedicada a pavimentos secos y otra a pavimentos húmedos. En la sección B se reúnen diversos instrumentos de medición para caracterizar completamente las variables meteorológicas.

Figura 4. (a) Imagen conceptual de la bancada experimental. (b) Fotografía de la construcción real.



(a)



(b)

La sección A se refiere a la caracterización de las muestras de pavimento. Se divide en dos partes: la primera consiste en estudiar la respuesta térmica de los pavimentos secos en el medio ambiente, mientras que la segunda se dedica a analizar la respuesta térmica cuando los pavimentos están mojados en su superficie inferior. La subdivisión seca consiste en pavimentos aislados con poliestireno extruido (XPS), mientras que la zona húmeda incluye tres cubículos de metacrilato donde se colocan los pavimentos. El espesor es una medida inherente al pavimento y viene determinado por cada fabricante, por lo que cada fabricante proporciona muestras de diferentes espesores. El área del pavimento húmedo se llena de agua y se registran las temperaturas superficiales de los pavimentos cuando están mojados en su superficie inferior. Esto permite comparar la temperatura superficial de los mismos pavimentos en las mismas condiciones ambientales cuando están secos y cuando están mojados.

La sección B está dedicada a la recogida de datos meteorológicos. Durante todo el periodo experimental se han recogido los datos meteorológicos necesarios para conocer las condiciones ambientales en cada proceso experimental.

3.3 Sistema de monitoreo y control

El sistema de monitorización se ha diseñado para recoger datos de las variables a estudiar en cada uno de los tramos especificados: temperatura del pavimento y datos meteorológicos de los días de ensayo.

La Tabla 1 proporciona una lista de los diversos instrumentos de medición y sensores utilizados para controlar la temperatura del pavimento y del agua del estanque, así como las condiciones climáticas del entorno experimental.

Tabla 1. Características de los instrumentos de medida y sensores.

| Magnitud | Instrumento de medida | Rango | Precisión |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Temperatura superficial | Termopar, Tipo T | -200°C-+260°C | ± 0,1 °C |
| Temperatura del agua | Termopar, Tipo J | -40°C-+85°C | ± 0,1 °C |
| Temperatura ambiente | Omega Series OM-92 | -30°C -+80°C | ±0.3°C en rango de 5...60°C ±2°C otros rangos |
| Humedad relativa | Omega Series OM-92 | 0%-100% | ±3% en rango de 20...80% ±5% otros rangos |
| Velocidad de viento | 4.3351.x0.141 anemómetro | 0m/s-75 m/s | ±0.1 m/s |
| Radiación Global Horizontal | CMP21 Kipp & Zonen piranómetro | 0 W/m ² -+4000 W/m ² | ±7 a 14 μV/W/m ² |

3.4 Proceso experimental

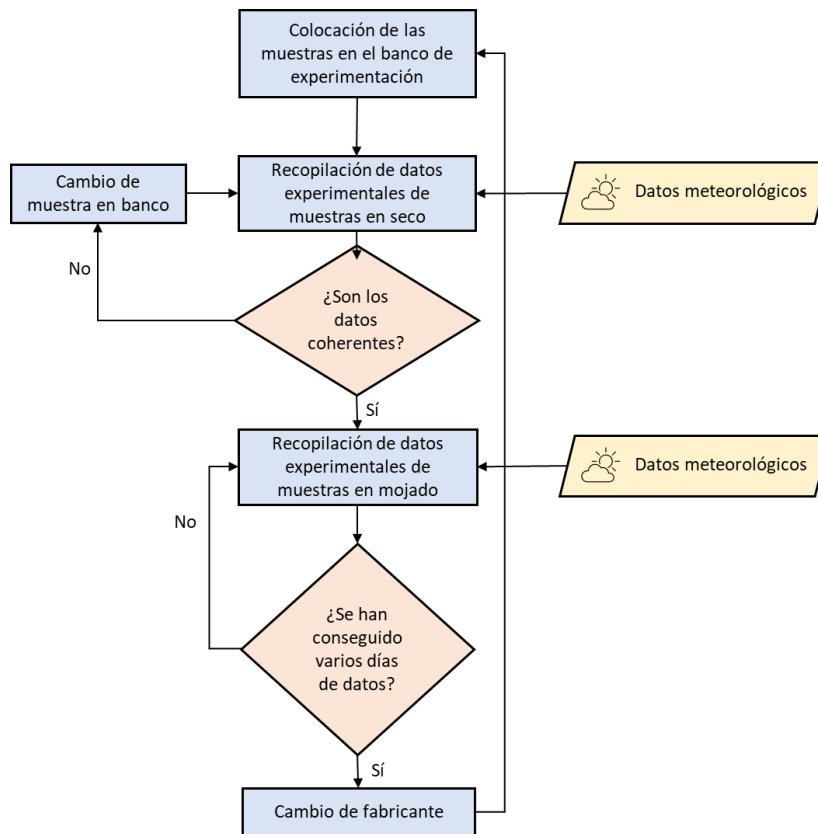
Para llevar a cabo la caracterización experimental fue necesario obtener muestras de diversos pavimentos de hormigón. Por ello, se contactó con diferentes fabricantes a través del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y de la asociación ANDECE para solicitar muestras de sus productos para su estudio. Se informó a los fabricantes del objetivo del experimento y éstos accedieron a enviar piezas de diferentes composiciones, colores y espesores. En la Tabla 2 se presenta una lista de las muestras ensayadas por cada fabricante, junto con un código asignado a cada uno para proteger la privacidad de las empresas involucradas.

Tabla 2. Lista de muestras de pavimentos obtenidas por cada fabricante.

| Fabricante | Código de la pieza | Espesor [m] |
|--------------|--------------------|-------------|
| Fabricante 1 | F1B | 0.07 |
| | F1G | 0.07 |
| | F1S | 0.07 |
| Fabricante 2 | F2AN | 0.025 |
| | F2AR | 0.025 |
| | F2BL | 0.025 |
| Fabricante 3 | F3-00 | 0.04 |
| | F3-88 | 0.04 |
| | F3-108 | 0.04 |
| Fabricante 4 | F4B3 | 0.05 |
| | F4B2 | 0,05 |
| | F4B1 | 0.05 |
| Fabricante 5 | F5BL | 0.05 |
| | F5MF | 0.05 |

Para la recolección de los resultados se ha seguido un proceso experimental garantizándose así la correcta realización de los experimentos. Así, la Figura 5 presenta el diagrama de flujo del proceso experimental llevado a cabo para las muestras de cada fabricante.

Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de experimentación.



El primer paso implica colocar las muestras que se van a ensayar en el banco experimental. En esta configuración inicial, los pavimentos de las secciones seca y húmeda se recubren con aislante XPS para asegurar condiciones de contorno consistentes entre ambos y facilitar una comparación precisa. Después de colocar y aislar los laterales y la superficie inferior, se dejan al aire libre durante un día completo. Esta exposición a las condiciones meteorológicas permite medir la temperatura de la superficie de cada muestra a lo largo del día.

Al día siguiente, se recolectan todos los datos de los sensores y se comparan las mediciones de cada par de pavimentos del mismo color. Si las temperaturas no son similares, se podría considerar que los sensores presentan algún problema, y se regresaría al paso anterior reemplazando las muestras con una de reserva hasta obtener mediciones confiables. Una vez confirmada la precisión de las mediciones de temperatura superficial de los pavimentos por parte de los sensores, el siguiente paso implica llevar a cabo experimentos en condiciones húmedas sobre los pavimentos.

Además, se realiza una doble verificación de los datos controlando las temperaturas de las superficies inferior y superior del pavimento seco. Los sensores ubicados en ambas

superficies de la muestra garantizan que no hay errores en los sensores y que se recopilan datos confiables.

Durante esta etapa del experimento, se procede a retirar el aislante inferior para construir el canal por el cual fluirá el agua del experimento húmedo. Se monitorea la temperatura de los pavimentos durante todo el día, activando el agua solamente de 14:00 a 18:00, en las horas de mayor radiación solar cuando hay una demanda crítica de acondicionamiento ambiental. Luego, a las 19:00, se activa el segundo desagüe para asegurar que el agua restante en el canal se vacíe por completo y garantizar que el pavimento esté seco nuevamente para el día siguiente. Este período post-humectación corresponde a un momento en el que la demanda de acondicionamiento es menos crítica debido a la reducción de la radiación solar, pero hay una alta ocupación de la calle y, por consiguiente, una mayor necesidad de confort térmico.

Después de varios días de experimentación en mojado, los resultados obtenidos deben ser analizados y verificados para asegurar que ofrecen mediciones fiables y coherentes. Es crucial confirmar que los días de experimentación coinciden con condiciones despejadas y soleadas para validar los datos para su uso en análisis numéricos posteriores. Una vez se cuenta con varios conjuntos de datos válidos, el estudio avanza al siguiente paso. Para ello, se regresa al paso 1 de la metodología para continuar con el proceso de investigación.

Esta metodología se repite en bucle durante todo el periodo de experimentación hasta que se hayan estudiado todas las muestras recibidas de los fabricantes.

3.5 Indicadores clave de resultados

Para facilitar el análisis de los datos recogidos, se ha definido un conjunto de parámetros que se han calculado a partir de los resultados para caracterizar las muestras experimentales. Para comparar el impacto de la humectación del pavimento, se definió el potencial de diferencia de temperatura (PDT) expresado en grados hora que se obtiene siguiendo la ecuación 1. Este parámetro se utiliza para cuantificar la diferencia entre las temperaturas de los pavimentos seco y mojado, representando el área entre las curvas diarias de temperatura durante un periodo de tiempo determinado.

$$\text{Potencial de diferencia de temperatura}_{\text{seco-húmedo}} = \int_0^{N_{\text{horas}}} T_{\text{seco}} - \int_0^{N_{\text{horas}}} T_{\text{húmedo}} \text{ [}^\circ\text{Ch]} \quad (1)$$

Para comparar las temperaturas de los pavimentos húmedos y secos en relación con la temperatura ambiente, se utilizarán los grados-hora de forma análoga a la ecuación (1). Sin embargo, el enfoque de estos grados-hora será ligeramente diferente. Es necesario distinguir entre los periodos en los que el pavimento tiene una temperatura superior a la temperatura ambiente y los periodos en los que el pavimento tiene una temperatura inferior a la temperatura ambiente. Los primeros se denominarán "potencial de sobrecalentamiento", mientras que los segundos se llamarán "potencial de enfriamiento". En cualquier caso, el objetivo será minimizar el potencial de sobrecalentamiento y maximizar el potencial de enfriamiento, de modo que los pavimentos puedan servir como solución natural para el confort al aire libre.

$$\text{Potencial de sobrecalentamiento} = \int_0^{N_{\text{horas}}} |T_{\text{pavimento}} - T_{\text{aire}}|^+ \text{ [}^\circ\text{Ch]} \quad (2)$$

$$\text{Potencial de enfriamiento} = \int_0^{N_{\text{horas}}} |T_{\text{aire}} - T_{\text{pavimento}}|^+ \text{ [}^\circ\text{Ch]} \quad (3)$$

Para calcular los indicadores, los datos se dividirán en dos periodos denominados periodo ON (de 14:00 a 18:00) y periodo OFF (de 18:00 a 22:00). El periodo ON corresponde al momento de condiciones meteorológicas más extremas, cuando la radiación solar es máxima y la temperatura del aire exterior es muy elevada. Además, durante este periodo, las personas de

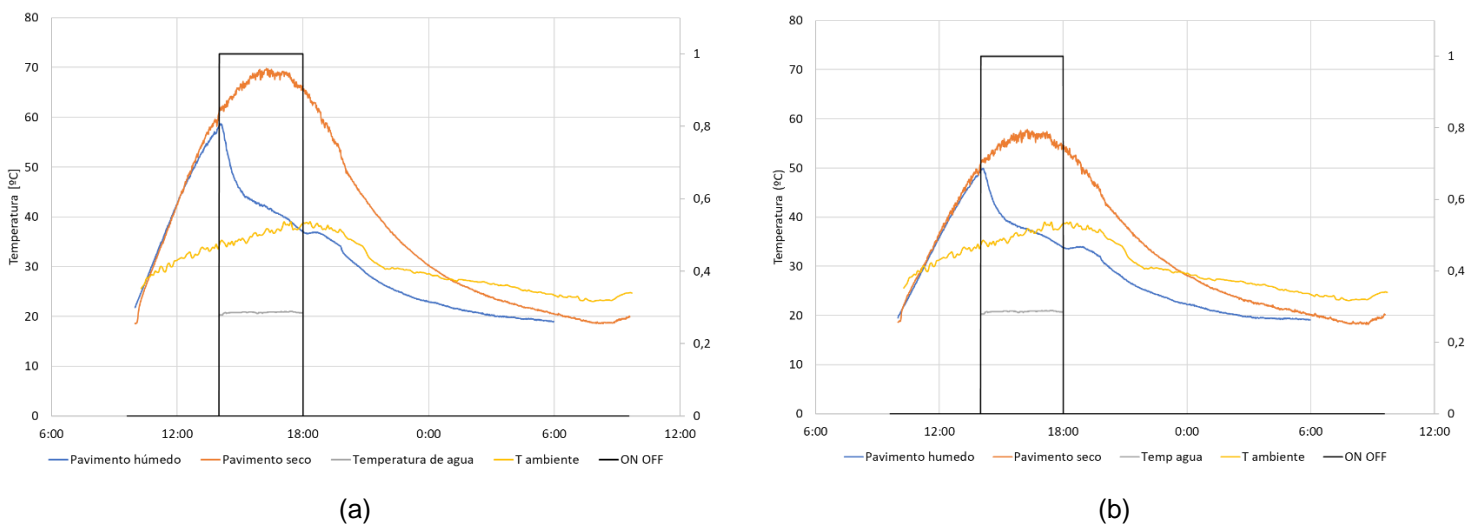
climas cálidos tienden a permanecer en interiores para protegerse de las duras condiciones meteorológicas. En consecuencia, se toma la decisión de iniciar los experimentos húmedos durante este periodo para empezar a enfriar los pavimentos cuando hay menos tráfico peatonal. Por el contrario, el periodo OFF corresponde al momento en que las condiciones meteorológicas empiezan a suavizarse y los ciudadanos comienzan a salir a las calles de la ciudad. Por esta razón, también se estudia este periodo y se comparan las implicaciones de tener pavimentos mojados durante el periodo OFF con los datos recogidos del pavimento seco de referencia.

4. Resultados

En esta sección se presentarán los resultados más relevantes del presente trabajo. En primer lugar, se presentará experimentalmente el efecto del humedecimiento de los pavimentos en su superficie inferior sobre su temperatura. Posteriormente, se cuantificará el efecto de la humectación de los pavimentos con los indicadores anteriormente descritos.

Los resultados experimentales se representan gráficamente para un día aleatorio del verano de 2023, mostrando dos muestras del mismo fabricante (una de tono más oscuro y otra más claro), tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Comportamiento experimental del pavimento: (a) color más oscuro (b) color más claro.



En los gráficos se presentan las curvas que muestran los datos medidos de cada par de pavimentos, tanto el expuesto al experimento húmedo como el seco de referencia, junto con la temperatura del aire exterior y la temperatura del agua que se usa como enfriamiento sensible. Es importante destacar que la curva de la temperatura del agua de refrigeración solo se muestra durante el periodo en el que el agua circula por debajo del pavimento (de 14:00 a 18:00 horas).

Se observa en ambas muestras que la tendencia es consistente: tanto el pavimento seco como el mojado siguen una trayectoria ascendente y muy similar hasta las 14:00 horas, momento en el que comienza la circulación del agua. El pavimento mojado responde rápidamente al efecto refrigerante del agua, lo que conlleva a un descenso significativo de la temperatura de la superficie superior del pavimento en comparación con la referencia seca. Además, una vez que el agua deja de circular bajo el pavimento, los pavimentos húmedos mantienen una temperatura inferior al ambiente, mientras que los pavimentos secos permanecen más calientes que la temperatura del aire exterior hasta la noche.

4.1 Indicadores de datos experimentales

Los indicadores utilizados para evaluar el comportamiento experimental de los pavimentos son el potencial de sobrecalentamiento y el potencial de enfriamiento. Estos indicadores se calcularán tanto para el periodo ON como para el periodo OFF, lo que permitirá realizar un estudio exhaustivo del comportamiento de los pavimentos durante las horas más críticas del día, cuando la demanda de esta solución de climatización urbana es mayor.

La Tabla 3 presenta los indicadores de sobrecalentamiento y enfriamiento del pavimento durante el periodo ON. Se presentan los datos tanto para el pavimento de referencia seco como para el pavimento del experimento húmedo. Los resultados son bastante prometedores, ya que se observa a simple vista que, en el caso seco, el indicador de sobrecalentamiento es muy elevado, mientras que el indicador de subenfriamiento es nulo. Sin embargo, en el caso del experimento de este estudio, el indicador de sobrecalentamiento se reduce significativamente. Además, en todos los casos, en mayor o menor medida, no sólo se reduce el sobrecalentamiento, sino que el indicador de subenfriamiento también se vuelve positivo, dando como resultado un pavimento más fresco que la temperatura ambiente, convirtiéndose así en un pavimento frío.

Además, se ha observado que un parámetro crítico que afecta al rendimiento térmico del pavimento es su espesor. Cuanto más fino es el pavimento, mayor es la importancia del experimento húmedo, lo que provoca efectos más notables en los indicadores de subenfriamiento.

Tabla 3. Resultados de indicadores de las muestras en el período encendido (14:00-18:00)

| Fabricante | Espesor [m] | PDT (seco-húmedo) [°Ch] | Pavimento seco | | Pavimento húmedo | | |
|------------|-------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------|
| | | | Sobrecalentamiento [°Ch] | Enfriamiento [°Ch] | Sobrecalentamiento [°Ch] | Enfriamiento [°Ch] | |
| F1 | F1B | 0.07 | 78.7-106.5 | 101.7-137.6 | 0.0 | 23.1-31.3 | 0.1-0.2 |
| | F1G | 0.07 | 63.7-86.2 | 87.2-118.0 | 0.0 | 23.4-31.7 | 0.0 |
| | F1S | 0.07 | 55.5-75.1 | 62.9-85.2 | 0.0 | 10.0-13.6 | 2.6-3.5 |
| F2 | F2AN | 0.025 | 74.0-100.2 | 73.1-98.9 | 0.0 | 6.5-8.9 | 7.5-10.1 |
| | F2AR | 0.025 | 70.0-04.7 | 48.8-66.1 | 0.0 | 0.0-0.1 | 21.2-28.7 |
| | F2BL | 0.025 | 59.1-80.0 | 34.7-47.0 | 0.0 | 0.5-0.6 | 24.9-33.7 |
| F3 | F3-00 | 0.04 | 70.7-95.6 | 73.0-98.8 | 0.0 | 8.4-11.4 | 6.1-8.3 |
| | F3-88 | 0.04 | 61.2-82.9 | 64.3-87.0 | 0.0 | 5.5-7.5 | 2.5-3.4 |
| | F3-108 | 0.04 | 55.4-74.9 | 58.7-79.5 | 0.0 | 7.7-10.4 | 4.3-5.8 |
| F4 | F4B3 | 0.05 | 79.7-107.8 | 76.2-103.1 | 0.0 | 4.5-6.0 | 7.9-10.8 |
| | F4B2 | 0.05 | 66.5-90.0 | 51.0-69.1 | 0.0 | 2.8-3.80 | 18.2-24.7 |
| | F4B1 | 0.05 | 67.6-91.5 | 46.4-62.8 | 0.0 | 0.-0.9 | 21.9-29.6 |
| F5 | F5BL | 0.05 | 54.4-73.6 | 64.7-87.6 | 0.0 | 12.21-16.5 | 1.8-2.5 |
| | F5MF | 0.05 | 60.4-81.8 | 46.2-62.6 | 0.0 | 0.9-1.2 | 15.1-20.4 |
| | F5WH | 0.05 | 52.1-70.5 | 42.0-56.8 | 0.0 | 1.9-2.6 | 12.0-16.3 |

En este caso, la Tabla 4 presenta los indicadores de sobrecalentamiento y enfriamiento en el período OFF, que corresponde a las horas posteriores al apagado de la circulación de agua del pavimento. Además de los resultados muy prometedores durante el período ON, la inercia térmica del pavimento, al haber estado húmedo desde las 14:00h hasta las 18:00h, transforma el pavimento en un elemento frío durante el resto del período. Por lo tanto, en el caso de referencia, el pavimento seco sigue siendo una fuente de malestar térmico, mientras que, en el caso del pavimento mojado, no sólo deja de contribuir a la incomodidad climática, sino que también puede utilizarse como herramienta para mitigar las condiciones exteriores adversas.

Tabla 4. Resultados de los indicadores de las muestras en el período apagado (18:00-22:00h)

| Fabricante | Espesor [m] | PDT (seco-húmedo) [°Ch] | Pavimento seco | | Pavimento húmedo | | |
|------------|-------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------|
| | | | Sobrecalentamiento [°Ch] | Enfriamiento [°Ch] | Sobrecalentamiento [°Ch] | Enfriamiento [°Ch] | |
| F1 | F1B | 0.07 | 65.8-89.0 | 55.4-75.0 | 0.0 | 0.00 | 10.3-13.9 |
| | F1G | 0.07 | 61.0-82.5 | 46.3-62.7 | 0.0 | 0.00 | 14.6-19.8 |
| | F1S | 0.07 | 47.4-64.1 | 30.1-40.7 | 0.0 | 0.00 | 17.2-23.4 |
| F2 | F2AN | 0.025 | 27.6-37.3 | 9.9-13.4 | 6.1-8.3 | 0.00 | 23.8-32.2 |
| | F2AR | 0.025 | 25.8-34.9 | 3.4-4.7 | 7.9-10.8 | 0.00 | 30.3-41.0 |
| | F2BL | 0.025 | 21.1-28.5 | 2.7-3.6 | 7.5-10.2 | 0.00 | 25.9-35.1 |
| F3 | F3-00 | 0.04 | 35.0-47.4 | 13.2-17.8 | 2.3-3.2 | 0.00 | 24.2-32.7 |
| | F3-88 | 0.04 | 33.7-45.6 | 24.4-33.1 | 0.0 | 0.00 | 9.2-12.5 |
| | F3-108 | 0.04 | 33.5-45.4 | 20.5-27.8 | 0.1-0.2 | 0.00 | 13.1-17.7 |
| F4 | F4B3 | 0.05 | 42.7-57.8 | 23.9-32.4 | 0.0 | 0.00 | 18.7-25.4 |
| | F4B2 | 0,05 | 35.1-47.5 | 12.1-16.4 | 0.7-1.0 | 0.00 | 23.8-32.2 |
| | F4B1 | 0.05 | 35.5-48.1 | 12.3-16.6 | 0.3-0.4 | 0.00 | 23.5-31.8 |
| F5 | F5BL | 0.05 | 42.6-57.6 | 18.9-25.6 | 0.3-0.5 | 0.00 | 24.0-32.4 |
| | F5MF | 0.05 | 37.7-51.0 | 8.4-11.4 | 2.7-3.7 | 0.00 | 32.0-43.3 |
| | F5WH | 0.05 | 35.4-47.9 | 9.3-12.6 | 1.4-2.0 | 0.00 | 27.5-37.2 |

5. Conclusiones

Como conclusión de este estudio, se ha demostrado con éxito la prueba de concepto de una tecnología de pavimentos fríos basada en enfriamiento sensible y no evaporativo. Se estableció una configuración experimental para medir las temperaturas de los pavimentos con circulación de agua, en comparación con un pavimento seco que sirve de referencia. Se obtuvieron muestras de varios fabricantes de hormigón a través de ANDECE y se probaron durante el verano de 2023.

Los datos experimentales recogidos han arrojado resultados muy satisfactorios para la prueba de concepto. En todos los casos, el sobrecalentamiento del pavimento se ha reducido totalmente, resultando el pavimento con temperatura menor que la ambiente. En base a estos resultados, el propio pavimento puede considerarse un elemento de refrigeración pasivo, dejando de contribuir a la incomodidad térmica de los ciudadanos. Además, este efecto de enfriamiento persiste a lo largo del día, incluso después de que la circulación de agua bajo el pavimento haya cesado, reduciendo significativamente la temperatura del pavimento durante

las horas de mayor insolación y mayor estrés térmico en comparación con la temperatura seca de referencia.

6. Referencias

- ADEME. (2021). *Urban cooling solutions Drawing inspiration from worldwide case studies to address variability in current and future climates*. www.carrenoir.com
- Agencia Estatal de Meteorología. (2023). *Informe climático del verano 2023*.
- Amores, T. P., Palma, R. M., Montero-Gutiérrez, M., Delgado, M. G., Ramos, J. S., & Domínguez, S. Á. (2023). Recovery of open spaces through thermal control: A case study in Seville. *Science Talks*, 7, 100248. <https://doi.org/10.1016/J.SCTALK.2023.100248>
- Dawson, J. P., Adams, P. J., & Pandis, S. N. (2007). Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study. *Atmospheric Environment*, 41(7), 1494–1511. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.033>
- Escuela Nacional de Sanidad. (2015). *Temperaturas umbrales de disparo de la mortalidad atribuible al calor en España en el período 2000-2009*. <http://publicaciones.isciii.es>
- Guerrero Delgado, M. C., Sánchez Ramos, J., & Álvarez Domínguez, S. (2020). Using the sky as heat sink: Climatic applicability of night-sky based natural cooling techniques in Europe. *Energy Conversion and Management*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113424>
- International Energy Agency. (2021). *Climate Resilience Electricity Security 2021*. www.iea.org/t&c/
- Jansson, M., Fors, H., Lindgren, T., & Wiström, B. (2013). Perceived personal safety in relation to urban woodland vegetation – A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(2), 127–133. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2013.01.005>
- Monge Palma, R., Amores, T. P., Montero-Gutiérrez, M., Delgado, M. G., Ramos, J. S., & Domínguez, S. Á. (2023). Addressing the control challenge of energy systems in built environment areas. *Science Talks*, 7, 100247. <https://doi.org/10.1016/J.SCTALK.2023.100247>
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Rodríguez, A. (2023, December 15). Una nueva aplicación monitoriza la mortalidad atribuida al calor en España. *CSIC*, 1(6), 416–419. <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00134>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Cotana, F., & Ferrero, M. (2016). On the thermal and visual pedestrians' perception about cool natural stones for urban paving: A field survey in summer conditions. *Building and Environment*, 107, 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.028>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 224–240). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Seifeddine, K., Amziane, S., Toussaint, E., & Ouldoukhitine, S. E. (2023). Review on thermal behavior of cool pavements. In *Urban Climate* (Vol. 51). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101667>

Shi, Z., Xu, T., & Wang, H. (2016). Sensitivity of Asian climate change to radiative forcing during the last millennium in a multi-model analysis. *Global and Planetary Change*, 139, 195–210. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2016.02.007>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

