

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio

José Simón Grau, jsimon@chm.es  
CHM Obras e Infraestructuras, S.A.

Julio López Ayerra, jlayerra@ctcon-rm.com  
Centro Tecnológico de la Construcción R. Murcia

El cambio de vida de la población de pasar de habitar en zonas rurales a zonas urbanas ha provocado una proliferación de grandes urbes, en las cuales se presenta un fenómeno conocido como "Isla de Calor Urbana-ICU". Dicho fenómeno se produce cuando el área urbana es significativamente más caliente que las áreas circundantes. Las islas de calor urbanas aparecen porque se han sustituido superficies rurales generalmente verdes por otras superficies que están hechas de materiales de alta capacidad térmica y baja reflectancia solar o albedo, como son el asfalto, hormigón, tejas, ladrillo, etc., capaces de absorber y almacenar energía en forma de calor. Una alternativa para mitigar el efecto isla de calor urbano sería pavimentar las calles con firmes que reflejen la energía solar, llamados "pavimentos de alta reflectancia", lo cual mantendrá la temperatura más baja que con los firmes convencionales, repercutiendo en una reducción de la temperatura ambiente.

**Palabras clave:** pavimento asfáltico urbano, pavimento frío, reflectancia solar, cambio climático, isla de calor urbana, albedo

The change in population's life from moving from rural to urban areas has provoked a proliferation of large cities. This fact has created a phenomenon known as the "Urban Heat Islands-UHI". This phenomenon occurs when the urban area is significantly warmer than the surrounding areas. The Urban Heat Islands appear because rural green areas have been replaced by other surfaces that are made of other materials. These materials, such as asphalt, concrete, tiles, or bricks, present high thermal capacity and low solar or albedo reflectance and they are able to absorb and store energy in the form of heat. An alternative to mitigate the Urban Heat Island Effect would be to pave the streets with firmes which reflect the solar energy, called "High-reflectance Pavements". Its function will be to keep the a lower temperature than the conventional one, resulting in a reduction of the ambient temperature.

**Keywords:** urban asphalt pavement, cool pavement, solar reflectance, climate change, urban heat islands, albedo

### 1. Introducción

Este artículo tiene como finalidad presentar los resultados preliminares del proyecto de I+D denominado REPARA 2.0 apoyado por CDTI y Fondos Europeos FEDER, donde participa CHM Obras e Infraestructuras, S.A., siendo uno de sus objetivos el desarrollo de pavimentos de alta reflectancia solar-

SR, capaces de reducir el calentamiento de las superficies de las ciudades y en consecuencia la temperatura ambiente principalmente en verano. Su fundamento se basa en el uso de superficies que presenten una alta reflectancia de la radiación solar.

En la actualidad, el mundo está inmerso en un proceso de calentamiento global debido al cambio climático y con el trans-

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio

curso del tiempo hay un mayor número de personas que viven en las ciudades. Aunque pueda parecer que entre estos dos factores no existe ninguna relación, tienen una importante conexión debido a un fenómeno conocido como la “Isla de Calor Urbana-ICU”. Dicho fenómeno se produce cuando un área, creada por el hombre, es significativamente más caliente que las áreas circundantes, y esta diferencia de temperatura se acentúa especialmente por la tarde-noche. Esta diferencia de temperatura puede rondar los 4 °C (ver Figura 1).

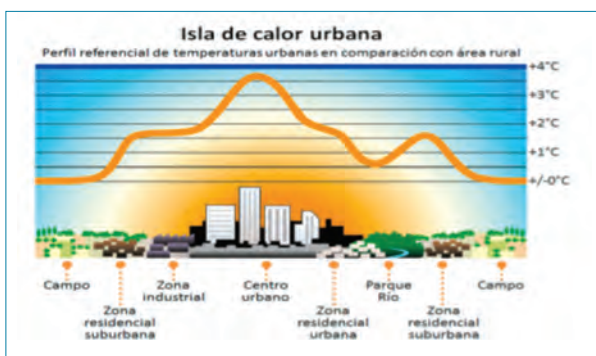


Figura 1.- Representación gráfica del efecto de isla de calor.

Las islas de calor urbanas aparecen porque se han sustituido superficies rurales, generalmente verdes y húmedas, por otras superficies que están hechas de materiales de alta capacidad térmica y baja reflectancia solar como son el asfalto, hormigón, tejas, membranas impermeabilizantes oscuras, ladrillo, etc., capaces de absorber y almacenar energía en forma de calor (ver figura 2), haciendo que se caliente el aire colindante aumentando la temperatura ambiente. Este hecho, unido a otros factores crean un efecto de sobrecalentamiento del área urbana.

Las islas de calor urbanas pueden afectar negativamente a la comunidad, siendo estos efectos perniciosos para la calidad del aire, la salud de las personas y para el consumo ener-



Figura 1.- Representación gráfica del efecto de isla de calor.

gético. Por lo tanto, las ventajas que vamos a tener mitigando el efecto de isla de calor urbana con la implantación de pavimentos de alta reflectancia solar - SR serán las siguientes:

- **Ahorro de energía en aire acondicionado.** Al disminuir la temperatura ambiente, se reducirá el consumo de aire acondicionado en los edificios colindantes a las zonas con pavimentos de alta reflectancia.
- **Ahorro de energía en el consumo de alumbrado público.** Los firmes de alta reflectancia son de tonalidades claras y son superficies de alta luminancia por lo tanto provocan una buena reflexión de la luz incidente, esta propiedad hace que sea necesaria menos intensidad de luz artificial nocturna para obtener buena percepción visual, por lo tanto pueden contribuir a un ahorro en el consumo de energía eléctrica en el alumbrado público.
- **Mejora de la calidad del aire.** El aire más cálido acelera la formación de smog- ozono troposférico a partir de los contaminantes atmosféricos como son los óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV,s). Al disminuirse la temperatura ambiental por acción de los pavimentos reflectantes, estas reacciones fotoquímicas tienden a ralentizarse.
- **Mejora de la comodidad y de la salud de los peatones.** Menores temperaturas ambientes rebaja el estrés térmico, unido a la mejora de la calidad del aire puede ayudar a mejorar enfermedades directamente relacionadas con el calor (deshidratación, calambres, golpe de calor, síncope por calor...) y con las vías respiratorias (como asma o EPOC), arritmias, etc.

Los pavimentos tradicionales en las ciudades, que representan alrededor de un tercio de las superficies urbanas, se calientan con el sol (ver Figura 3) y absorben entre el 80 y el 95% de la energía solar incidente. En pleno verano un firme con mezcla bituminosa puede alcanzar los 70 °C en la superficie. Estos pavimentos agravan el efecto de isla de calor urbana calentando el aire a nivel local. El calor absorbido, por convección pasaría a la atmósfera, calentado el aire y por lo tanto aumentaría la temperatura ambiente, siendo mas notorio este incremento en las horas de la tarde-noche.

Una alternativa para mitigar el efecto isla de calor urbano será pavimentar las calles y aceras con firmes que reflejen la energía solar que incide durante el día, manteniendo la temperatura superficial más baja que con los firmes convencionales, pudiendo repercutir en una reducción de la temperatura ambiente.

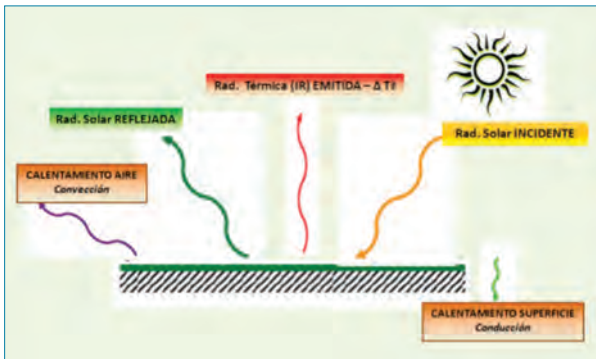


Figura 3.- Flujo de las radiaciones terrestres absorbidas y reflejadas.

En este artículo se exponen los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación donde se señalan las características de diseño para la fabricación de mezclas asfálticas que van a ser utilizadas en la obtención de un pavimento con un valor de reflectancia solar –SR suficiente para que mitigue el efecto isla de calor.

Según el sistema de Certificación LEED v4- ND auspiciada por US Green Building Council para el Desarrollo de Zonas Residenciales, en el capítulo GIB CREDIT: HEAT ISLAND REDUCTION, marca las medidas a adoptar en las superficies horizontales de los pavimentos a fin de minimizar los efectos de dicho desarrollo sobre microclimas, hábitats humanos y la vida silvestre, reduciendo el efecto de islas de calor.

Se considera que un material es reflectante si el valor de reflexión solar (SR) a los tres años de su puesta en obra es de al menos el 28% (0,28) . Para materiales nuevos se utilizaran aquellos con un SR de al menos el 33% (0,33).

### 1.1 Radiación solar

La radiación solar es una radiación térmica que la podemos definir como un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol que se propaga en forma de ondas con longitudes que abarcan desde 150 a 4000 nanómetros (nm). La radiación que alcanza la Tierra oscila entre 300 y 2500 nm, el resto es rechazada por la atmósfera. Este rango de longitudes de onda se divide en tres espectros electromagnéticos.

- Espectro Ultravioleta-UV.- Longitudes de onda entre 300-400 nm
- Espectro Visible-VIS.- Longitudes de onda entre 400-700 nm
- Espectro infrarrojo-IR.- Longitudes de onda entre 700-2500 nm

La magnitud que mide la radiación solar se denomina irradiancia y se expresa por  $W/m^2$ , cada longitud de onda tendrá una irradiancia determinada. La distribución estándar de la irradiancias de todas las longitudes del espectro solar viene definido por la norma ASTM G173-03.- AM 1,5 G, donde nos cuantifica la potencia de la energía que incide en la capa terrestre en cada uno los tres espectros (UV,VIS e IR). Estos valores son medidos al nivel de mar, temperatura de 20°C y con una inclinación determinada del sol (37°) hacia la superficie terrestre. Si sumamos todos los valores de irradiancias a todas las longitudes de onda el valor de la radiación total máxima que llega a la Tierra es de  $963,8 W/m^2$ . Con los valores estándar de radiacion solar incidente y midiendo la energía reflejada, podemos saber los porcentajes de reflectancia de una superficie.

La distribución de la irradiancias del espectro solar estandar es la siguiente (ver figura 4).

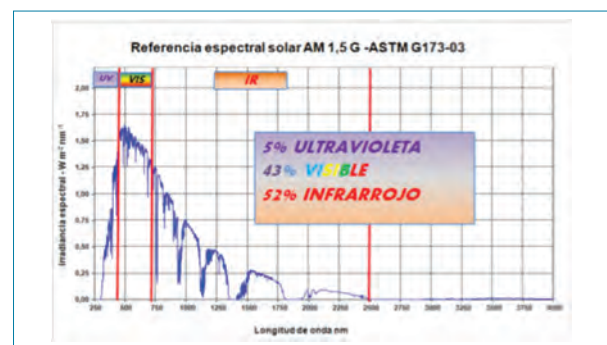


Figura 4.- Representación gráfica del espectro solar AM 1,5 G- ASTM G173-03.

Se aprecia que aproximadamente el 5% de la energía que incide en la superficie terrestre corresponde al espectro ultravioleta (UV), el 43% al espectro visible (VIS) y un 52% al infrarrojo (IR).

### 1.2 Reflectancia solar

La reflectancia solar de una superficie - SR, se define como la fracción o porción de la radiación solar incidente que se refleja en dicha superficie.

$$SR = \text{Energía solar reflejada} / \text{Energía solar incidente}$$

El valor oscila entre 0 para las superficies sin reflectancia, hasta 1 para las superficies de reflectancia total (ver figura 5).

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio

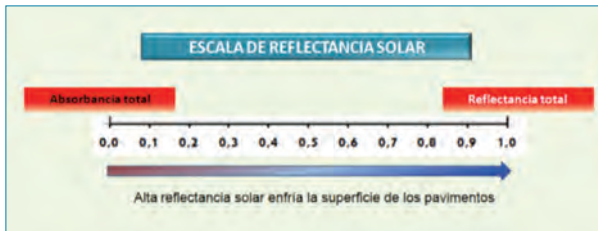


Figura 5.- Representación escala de reflectancia solar.

También se puede dar los valores en tanto por ciento. La absorbancia es un concepto inverso a la reflectancia.

Al estar compuesto el espectro solar por los espectros UV, VIS e IR, se puede determinar dentro de la reflectancia solar total, la parte reflejada en el espectro ultravioleta- UVR, el espectro visible - VISR y el infrarrojo – IRR.

### 1.3 Métodos de medición de reflectancia solar - SR en superficies opacas

En el proceso de diseño de los pavimentos reflectantes se han utilizado dos métodos de ensayo para medir las reflectancias en los materiales y en las mezclas desarrolladas. En uno se utiliza un espectrofotómetro que mide reflectancias en muestras de laboratorio y en el otro se usa un piranómetro para medir las reflectancias solares en superficies de pavimentos ya construidos.

#### Espectrofotómetro

Para medir la reflectancia solar en superficies planas se utiliza un espectrofotómetro UV-VIS-IR (ver Foto 1), con esfera de integración siguiendo la norma ASTM E 903-12. Es el método idóneo para muestras pequeñas de laboratorio, de 5 x 5 cm de tamaño (ver Foto 2). No sirve para medir reflectancias en superficies de campo. El rango de medida está entre 300 y 2500 nm de longitud de onda.



Foto 1.- Espectrofotómetro.

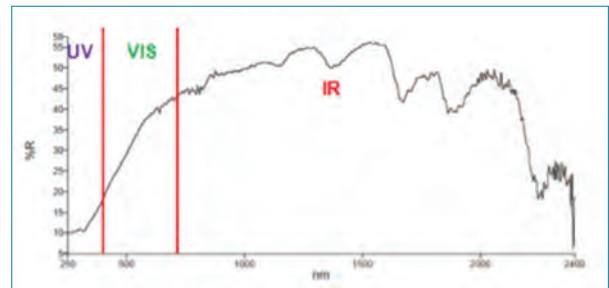


Foto 2.- Muestras utilizadas en el espectrofotómetro

Los dispositivos de medición de reflectancia espectral proporcionan valores para cada longitud de onda en una potencia constante en todo el espectro evaluado. Sin embargo, la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra no es constante a lo largo del espectro. Por lo tanto, para obtener la reflectancia solar de las superficies, los valores de reflectancia espectral deben ser corregidos de acuerdo con la intensidad de la radiación solar para cada longitud de onda de un espectro solar estándar adoptado, y luego integrado en el rango medido.

Se ha establecido un espectro solar estándar contemplado en la norma ASTM G173 AM 1,5 G donde se muestra los valores espectrales de la irradiancia solar en  $W / m^2 \cdot nm$  de cada longitud de onda. Se obtiene el valor de reflectancia solar en %, también se puede expresar en tanto por uno.

Con los valores de reflectancias en cada valor de longitud de onda se puede representar gráficamente y observar las reflectancia en cada uno de los tres espectros, UV – VIS e IR (ver Gráfica 1).



Gráfica 1.- Representación de las reflectancias del espectro de 250-2400 nm

#### Piranómetro

La reflectancia solar se define como el cociente de la radiación solar reflejada por una superficie por la radiación solar que incidente sobre la misma. Por lo tanto, se puede calcular la reflectancia solar a partir de la medición de la intensidad de la radiación solar, incidente y reflejada por una superficie en un momento dado. La norma ASTM E1918 (ASTM 2006) describe un método de ensayo para la medición de la reflectancia solar para superficies en campo usando un piranómetro (ver fotos 3 y 4). Es necesario áreas como círculos con al menos cuatro metros de diámetro o cuadrados con al menos cuatro metros de lado, y de poca pendiente. Mide tanto la energía incidente como la reflejada en  $W/m^2$ .

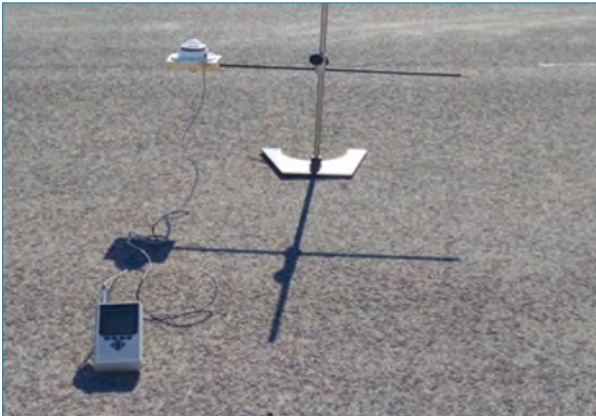


Foto 3.- Piranómetro.



Foto 4.- Medidas con el piranómetro.

## 2. Criterios de diseño

Nuestro objetivo es conseguir pavimentos asfálticos que reflejen la máxima energía posible de todo el espectro solar UV-VIS-IR. La reflexión del espectro visible, que representa el 43%, va a depender de la tonalidad o color, y el resto, UV e IR dependerá de las características físico-químicas de los componentes que forman los pavimentos.

Los criterios de diseño que se han estudiado son parámetros característicos de las mezclas asfálticas que pueden influir en la Reflectancia Solar-SR y a su vez en la temperatura superficial al incidir la radiación solar.

Las características estudiadas son las siguientes:

- Naturaleza mineralógica del árido: Calizo y pórfido.
- Granulometría de la mezcla: Continua y discontinua.
- Porosidad.
- Textura superficial: Tamaño máximo del árido.
- Tipo de ligante: Betún asfáltico negro convencional, y ligante sintético claro.
- Adiciones de pigmentos de óxidos metálicos de Fe, Cr y Ti.

## 2.1 Áridos

En las mezclas asfálticas los áridos (ver Foto 5) representan un 95% del total de la mezcla, por lo tanto, sus características fotocolorimétricas van a ser determinantes para la obtención de una mezcla de alta reflectancia. A priori los áridos de color claro van a ser más idóneos que los áridos de tonalidad oscura (ver Foto 5). Pero con la medida del color sólo vamos a tener información de la reflectancia del espectro visible que es el 43% del espectro solar total. Por lo tanto, es importante obtener información de reflectancia de todo el espectro solar. Para ello, se han realizado ensayos mediante el espectrofotómetro a muestras de áridos en el laboratorio (ver Gráfica 2). Los resultados son los que recoge la Tabla 1).

Tabla 1.- Reflectancia de los áridos.

Método de ensayo	Reflectancia solar -SR		
	Árido calizo	Árido pórfido	Objetivo proyecto
Espectrofotómetro - ASTM E903-12	62	20	33
Piranómetro - ASTM E1918	58	18	



Foto 5.- Detalle de áridos calizo y pórfido.

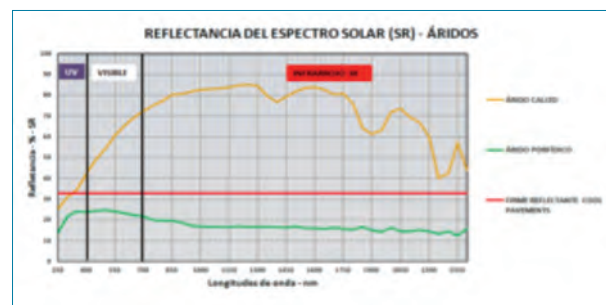


Foto 5.- Detalle de áridos calizo y pórfido.

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio

Tabla 2.- Reflectancia de los betunes.

Método de ensayo	Reflectancia solar -SR		
	Betún 35/50	Ligante sintético	Objetivo proyecto
Espectrofotómetro - ASTM E903-12	8	17	33

Se aprecia que los áridos calizos son más reflectantes que los porfídicos, siendo más idóneos en la consecución de un pavimento reflectante. Los resultados obtenidos por los dos métodos son equivalentes.

### 2.2 Ligantes

Los ligantes estudiados son betún 35/50 y un ligante sintético de color claro (ver Foto 6). Se han obtenido las reflectancias por espectrofotometrias dando como resultados los siguientes (ver Gráfica 3 y Tabla 2).

Con estos resultados, será necesario el uso de un ligante sintético de tonalidad clara para obtener la reflectancia solar objetivo.

### 2.3 Textura y porosidad

La reflexión de las ondas electromagnéticas procedentes del sol que inciden en una superficie puede ser de dos tipos dife-

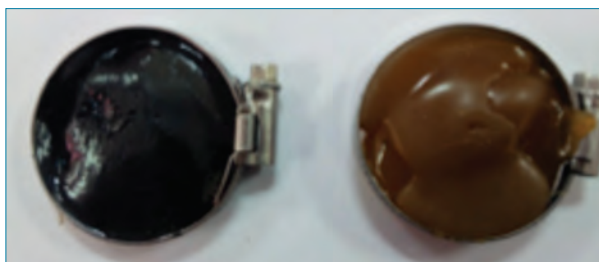
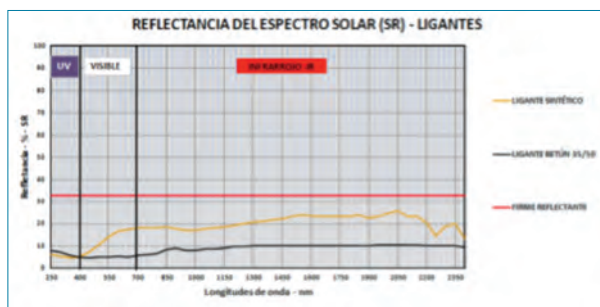


Foto 6.- Detalle de betún 35/50 y ligante sintético.



Gráfica 3.- Reflectancias de betunes.

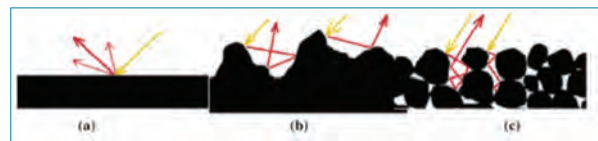


Figura 6.- Mecanismos de la reflexión de radiación solar: (a) su superficie lisa-AC, (b) rugosa – BBTM-11A y (c) porosa- BBTM-11B.

rentes (ver Figura 6).- Reflexión especular, donde la luz se refleja sobre una superficie como un espejo. Estas superficies están normalmente pulimentadas; 2.- Reflexión difusa, donde la luz se refleja sobre una superficie rugosa y los rayos salen rebotados en todas direcciones. La forma y el camino de propagación de la energía solar va a influir en el calentamiento de la superficie; cuanto más reboten las ondas más se va a calentar la superficie, por lo tanto según el tipo de reflexión el calentamiento de las superficies puede ser distinto. Dentro del catálogo de firmes para capa de rodadura existen tipos de mezclas más o menos rugosas, con más o menos huecos, y estos huecos con más o menos tortuosidad. Para comprobar cómo influyen estas características en la temperatura superficial se han expuesto a la acción de la radiación solar muestras de varias mezclas con betunes asfálticos y con reflectancias solares similares (valores de SR entre 7-8 % (0,07-0,08) y distintas granulometrías, huecos y macrotextura (ver Tabla 3).

La exposición (ver Foto 7) se realizó un día despejado con una radiación solar máxima de 890 w/m<sup>2</sup>. Se obtuvieron valores de temperatura cada hora desde las 9 h. hasta 18h. Las medidas de temperatura se realizaron tomando imágenes de toda superficie de cada muestra con cámara termográfica (ver foto 8) que mediante un programa informático calcula la temperatura máxima, mínima, y media de dicha superficie. Es el método que se ha utilizado para medir temperaturas superficiales durante todo el estudio.

Según los valores de temperatura media de cada superficie obtenidos en las muestras expuestas, podemos tener una diferencia de temperatura de 5 °C entre la mezcla más caliente (BBTM-11B) y la más fría (AC16 D), observándose que una superficie de una mezcla bituminosa con los mínimos huecos, granulometría densa, baja macrotextura y tamaño máximo reducido de áridos, ayuda a que se mantenga la temperatura superficial más baja (ver Gráfica 4).

Hemos visto que la porosidad y la macrotextura influye en el calentamiento de una superficie, pero también es importante saber cómo influyen estos parámetros en el proceso

Tabla 3.- Características de las mezclas bituminosas. Reflectancia, porosidad y macrotextura.

Ref.	Tipo de mezcla	Reflectancia solar SR	% huecos	Macrotextura MPT
1	BBTM-11B	8	16	2,4
2	BBTM-11A	8	5,2	1,6
3	AC16-S	7	5,1	0,8
4	AC22-D	8	7,3	0,8
5	AC16-D	7	4,8	0,7



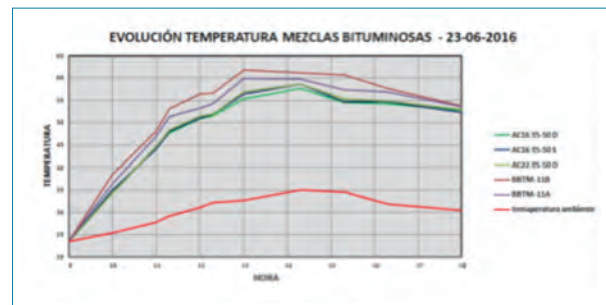
Foto 7.- Exposición de muestras de mezclas bituminosas.



Foto 8.-Detalle de las termografías obtenidas.

de enfriamiento. Nos interesa saber si las diferencias de temperatura entre dos superficies al calentarse, se mantienen cuando se enfrían. Se sometieron muestras de 30x40 cm de mezcla BBTM-11B y AC16 D a la intemperie durante 48 horas (ver Foto 9), así como sondas termográficas de contacto para tomar datos de temperatura cada 15 min y se almacenaron los datos en un registrador Datalogger. A continuación se muestran los datos obtenidos (ver Gráfica 5):

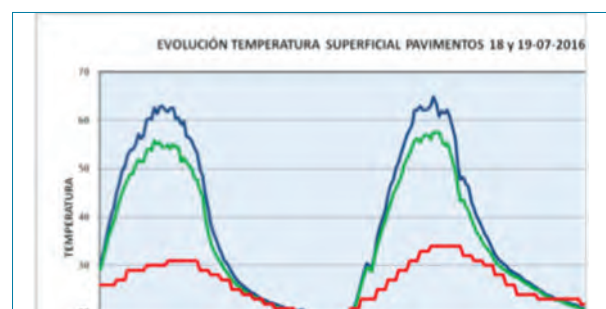
Se aprecia que la velocidad de enfriamiento es similar en las dos mezclas, lo que implica que la macrotextura y porosi-



Gráfica 4.- Evolución de la temperatura superficial a la exposición de la radiación solar.

dad no influye en la velocidad de enfriamiento. También se observa que las mezclas tipo AC16-D se mantiene más fría durante todo el proceso de calentamiento y enfriamiento. Esto quiere decir que las superficies reflectantes están actuando durante todo el ciclo solar rebajando la temperatura superficial.

Teniendo en cuenta los criterios de diseño estudiados, en la Tabla 4, se exponen los conceptos mas favorables y desfavorables para diseñar una mezcla ( los pros y los contra a la hora de diseñar una mezcla) que vaya a tener, a priori, propiedades de alta reflectancia solar, y con ello conseguir una temperatura superficial los más baja posible. Estos criterios son el tipo de ligante, de áridos, tipo de mezcla, granulometría y tamaño máximo de árido.



Gráfica 5.- evolución de la temperatura superficial.

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio

Tabla 4.- Criterio de diseño de firmes reflectantes.

Tendencia	Ligante	Áridos	Tipo mezcla	Granulometría	T. Máximo
Favorable	Ligante sintético	Claros	AC BBTM	D A	< 16 mm < 8 mm
Desfavorable	Betún negro	Pórfido	BBTM; PA	S (AC); B (BBTM)	22 (AC); 11 (BBTM)

### 2.4 Adiciones de pigmentos de óxidos metálicos

Mayoritariamente, la reflectancia solar de una superficie es directamente proporcional a la tonalidad más clara, o sea las superficies claras reflejan más la radiación solar que las superficies oscuras. Pero como se ha expuesto anteriormente, la radiación solar aparte de la radiación del visible (que se observa a partir de las características colorimétricas) está compuesta también por radiaciones de longitud de onda que están en el espectro del infrarrojo, siendo las dos radiaciones parecidas cuantitativamente. Hay materiales que siendo oscuros tienen reflectancia solar alta, ya que, aunque tengan la reflectancia del visible baja, tienen la reflectancia del espectro infrarrojo muy alta y por lo tanto el cómputo final es que tienen alta reflectancia solar.

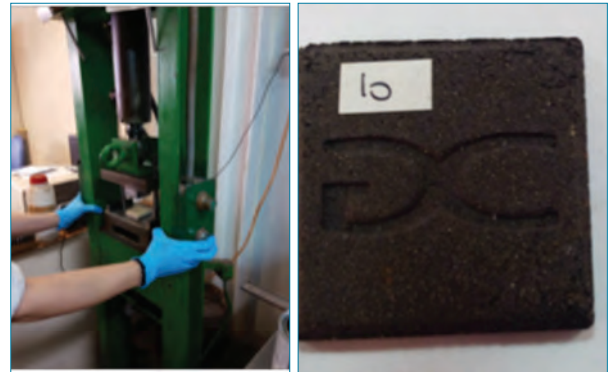
La adición en las mezclas asfálticas de pigmentos de óxidos metálicos nos van a ayudar a conseguir tonalidades claras para obtener buena reflectancia del visible, pero también nos pueden ayudar a aumentar la reflectancia del IR por sus características físico-químicas.

Los pigmentos estudiados son los que se usan comúnmente en la construcción:

- Óxidos de hierro amarillos y rojos.
- Óxido de cromo verde.
- Óxido de titanio blanco.
- Azul de Ultramar. Polisulfuro de silicatos complejos.

Para comprobar cómo actúan los pigmentos sobre la reflectancia solar en una mezcla asfáltica, se han realizado muestras en laboratorio (ver fotos 10 y 11) con árido fino calizo, ligante, y los distintos tipos de pigmentos. A continuación se han obtenido mediante el espectrofotómetro (ASTM E903-12) los valores de reflectancia de los tres espectros UV-VIS-IR.

Primera se ha utilizado como ligante betún asfáltico negro 35/50, realizándose muestras con todos los pigmentos seleccionados. Al obtener previsiblemente la misma reflectancia en el espectro visible (muy oscuros) en todas las



Fotos 10 y 11.- Realización de muestras para medición espectrofotométrica

muestras, la diferencia que se obtenga de la reflectancia de todo el espectro solar será debida a lo que se refleje en el espectro infrarrojo, siendo el tipo y cantidad de pigmento responsable de dicha reflectancia.

Se aprecia que algunos pigmentos de óxidos metálicos pueden aumentar la reflectancia del IR más de un 80%, siendo los óxidos de hierro rojo y óxidos de titanio los que mejor se comportan, en éste último también es representativo el aumento de la reflectancia del visible.

Con la utilización en mezclas asfálticas de ligante bituminoso negro y los pigmentos estudiados no es posible obtener una reflectancia solar- SR mayor o igual al objetivo 33 % (0,3). Ver Tabla 5 y Gráfico 6.

A continuación se han realizado distintas muestras usando ligante sintético claro con el mismo árido calizo (ver Foto 12). Los pigmentos utilizados han sido óxido de hierro rojo y óxido de titanio, ya que a priori son los que mejor comportamiento van a tener para el objetivo marcado. Los porcentajes de pigmento han sido muy inferiores a los utilizados con betún negro.

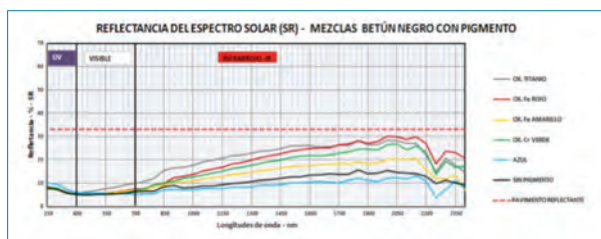
Se han obtenido mediante el espectrofotómetro (ASTM E903-12) los valores de reflectancia de los tres espectros UV-VIS-IR. Ver Tabla 6 y Gráfica 7.

En los resultados se aprecia que las reflectancias del espectro de IR en las muestras con pigmentos son mayores que

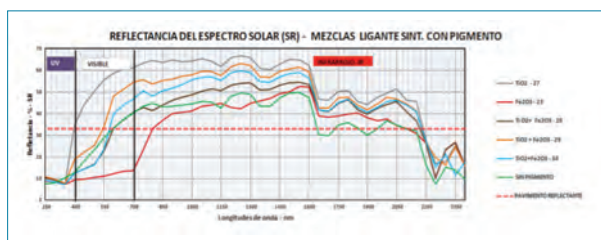


Tabla 5.- Resultados de reflectancia con betún 35/50 y pigmentos.

Material	Betún-ligante	Pigmento %	Reflect. UV	Reflect. VIS	Reflect. IR	Reflect. SR
Placa árido calizo 0,063 / 1 mm	Betún 35/50	Sin pigmento	7	5	11	8
		Ox. Fe amarillo -3%	7	6	15	11
		Ox. Fe rojo -3%	8	6	21	14
		Azul de ultramar -3%	9	6	9	8
		Ox. Cromo -3%	7	6	19	13
		Ox. de titanio -3%	7	8	22	15



Gráfica 6.- Reflectancias con betún 35/50 y pigmentos.



Gráfica 7.- Reflectancia muestras con ligante sintético y pigmentos.

la muestra sin pigmento, aunque esta muestra tenga valores de reflectancia del espectro visible iguales o mayores. Por ejemplo, la muestra sin pigmento (3) y la muestra con pigmentos (34) tienen la misma reflectancia visible, son iguales a la visión humana, por lo tanto si nos basamos solo en la tonalidad tendrían la misma reflectancia solar; sin embargo la

muestra (34) tiene más reflectancia en el IR (que es invisible), dando en el computo final una mayor reflectancia solar con respecto a la muestra sin pigmentar.

A priori, para obtener una mezcla asfáltica de reflectancia solar superior al 33% se debe utilizar un ligante sintético pigmentado con óxido de titanio. Se puede matizar la tonalidad clara obtenida con el pigmento de TiO<sub>2</sub> con un pequeño porcentaje de óxido de hierro rebajando la reflectancia del visible sin menoscabar en gran medida la reflectancia solar.

### 3. Mezclas asfálticas reflectantes. comportamiento térmico frente a radiación solar

Se han fabricado mezclas asfálticas normalizadas en el laboratorio teniendo en cuenta las consideraciones de diseño obtenidas y señaladas en los apartados anteriores. Con el material obtenido se han elaborado probetas/especímenes para comprobar la reflectancias solares que se obtienen, así como su comportamiento térmico frente a la radiación solar.

Tabla 6.- Resultados de reflectancias con ligante sintético y pigmentos.

Referencia	3	27	23	28	29	34
Material	Placa árido calizo 0,063 / 1 mm					
Betún-ligante	Ligante sintético					
Pigmento %	Sin pigmento	Ox. de titanio - x%	Ox. Fe rojo - x%	(Ox. titanio + Ox. de hierro) - x%		
Reflect. UV	9	8	8	9	8	9
Reflect. VIS	28	52	12	25	36	28
Reflect. IR	37	53	38	43	48	46
Reflect. SR	32	51	25	34	41	37

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio



Foto 12.- Muestras con betún sintético y pigmentos.

Tabla 7.- Valores de reflectancias de las mezclas asfálticas.

Tipo de mezcla	Tipo betún-pigmento	Reflectancia VIS	Reflectancia IR	Reflectancia solar -SR
BBTM-11B	45/80-65	5	9	7
AC16 35/50 D	35/50	6	9	8
AC16 35/50 D	Ligante sintético-sin pigmento	18	38	28
AC16 35/50 D	Ligante sintético +TiO <sub>2</sub>	52	52	50
AC16 35/50 D	Ligante sintético + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	42	27
AC16 35/50 D	Ligante sintético +TiO <sub>2</sub> +10% RAP	17	33	25

Para la elaboración de las distintas muestras se han utilizado aridos gruesos y finos calizos, los dos tipos de ligante (betún 35/50 y ligante sintético) y se han realizado mezclas con pigmento y sin pigmento. Todas las mezclas han sido del tipo AC16 SURF -D.

Para poder comprobar el comportamiento de las muestras a la exposición de las radiaciones solares y medir las reflectancias solares, se han fabricado probetas rectangulares con la compactadora de rodillos y circulares con la compactadora de impactos.

A continuación se exponen los valores obtenidos de reflectancias de los espectros solares mediante el espectrofotómetro (ver Tabla 7):

Se aprecia que la única mezcla que cumpliría el objetivo de SR a conseguir  $-SR \geq 33$  (0,3) es la fabricada con ligante sintético de óxido de titanio.

Estas mismas muestras se dejaron a la intemperie (ver foto 13), expuestas a la acción de la radiación solar, midiendo la temperatura superficial cada hora mediante cámara termográfica (ver Foto 14). Los valores expuestos a continuación se obtuvieron a temperatura ambiente máxima de 37 °C y una radiación solar máxima de 885 W/m<sup>2</sup>.



Foto 13.- Mezclas expuestas a los efectos de la radiación solar.

De los resultados obtenidos se observa que entre dos muestras de mezcla AC16-D, una con betún negro 35/50 y la otra con ligante sintético y TiO<sub>2</sub>, hay una diferencia máxima de temperatura superficial de 10 °C, y en el caso que la muestra con betún negro sea del tipo BBTM-11B la diferencia aumenta a 13 °C (ver gráfico 8).

Se han realizado exposiciones con estas muestras rectangulares y en otras circulares en diferentes días con temperaturas ambientes máximas que oscilan desde 18 a 44°C, y se ha observado que la diferencia se mantiene en 10 °C sin depen-

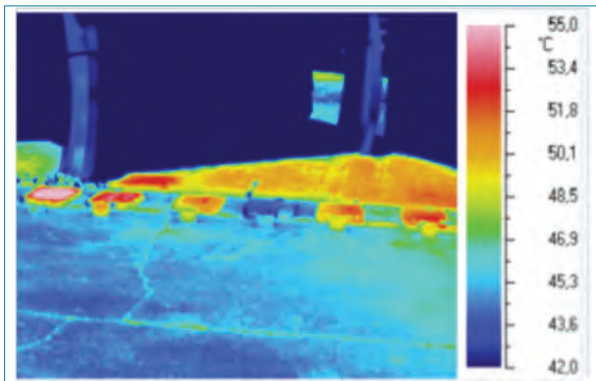
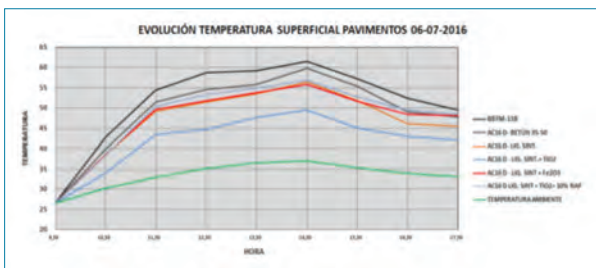


Foto 14.- Termografías infrarrojas.



Gráfica 8.-Evolución temperaturas superficial.

der de la temperatura ambiente, variando solamente la temperatura máxima alcanzada en la superficie. Comprobando otros parametros meteorológicos de esos días, se observó que

los valores de radiación solar en los días que la diferencia máxima oscilaba alrededor de 10 °C eran similares, y solamente cuando bajaba el valor de radiación, disminuía también la diferencia de temperatura. Esto nos lleva a la conclusión favorable de que en periodo invernal la diferencia de temperatura entre el asfalto convencional y el reflectante será mucho menor.

A continuación se exponen los valores más representativos obtenidos en distintas exposiciones a la radiación solar realizadas a muestras de firmes convencionales y reflectantes en Murcia (ver Tabla 8). También se detalla la realización de una exposición a probetas circulares observándose la diferencia de 10 °C entre la mezcla convencional con betún negro y la mezcla reflectante con ligante sintético y óxido de titanio.

Haciendo una proyección del comportamiento de la utilización en el entorno urbano a gran escala de estos pavimentos asfálticos reflectantes, podemos tener en cuenta el siguiente estudio realizado y avalado por el Laboratorio Nacional de Energia Lawrence Berkeley (LBNL), Heat Island Group, perteneciente al Departamento de Energia de Los Estados Unidos y gestionado por la Universidad de California sobre pavimentos frios- "Cool Pavements":

Una superficie con una reflectancia solar SR superior a 40, directamente va a tener unos beneficios cuantificados en los siguientes términos. Directamente los beneficios serían, por un lado una rebaja de la temperatura de la superficie del

Tabla 8.- Datos de temperaturas y radiacion solar en exposiciones al sol.

Exposición de muestras a la radiación solar. Murcia				
Fecha	Temperatura ambiental máxima	Temperatura máxima AC16 35/50	Máxima diferencia firme convencional - firme reflectante	Radiación máxima w/m²
12/01/2017	18,0	39,7	8,4	520
11/11/2016	21,5	45,6	9,4	645
14/10/2016	24,0	44,5	9,4	910
27/10/2016	25,0	48,5	9,5	680
15/09/2016	28,5	54,2	9,7	865
11/10/2016	30,9	49,4	9,3	730
16/09/2016	30,4	55,8	9,5	890
06/07/2016	37,0	61,5	10,3	885
05/09/2016	44,0	69,1	10,3	895
19/10/2016 Alta nubosidad	22,0	30,5	3,0	320

# Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático.

## Parte I: Estudio teórico y de laboratorio

pavimento de 10-12 °C, y por otro se obtendría un ahorro de 30% de la potencia lumínica del alumbrado público para obtener una óptima luminosidad. Indirectamente los beneficios serían los siguientes (ver Figura 7).

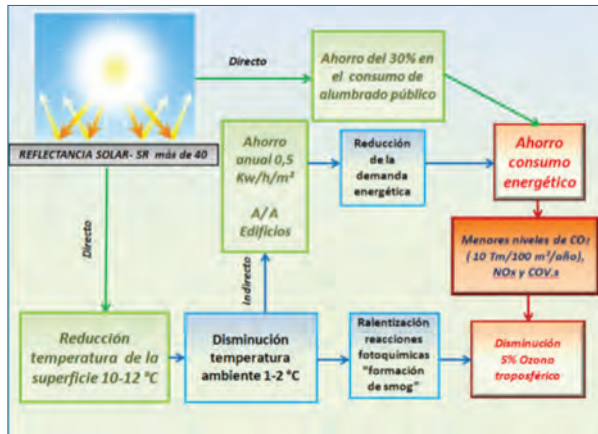


Figura 7.- Cuantificación de los beneficios de firmes de alta reflectancia.

- Rebaja de la temperatura ambiente entre 1-2 °C.
- Ahorro del consumo de A/A en los edificios colindantes de 0,5 kW/h por m<sup>2</sup> y año, al disminuir la temperatura ambiente.
- Disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> de 10 Tm por cada 100 m<sup>2</sup> de pavimento con SR superior a 40, debido a la disminución del consumo energético.
- Reducción del smog fotocatalítico "ozono troposférico" del 5%.

Otro estudio publicado recientemente por el mismo equipo de investigación, expone como ha influido la incorporación de los invernaderos en el microclima de la zona del Poniente de la provincia de Almería (es la zona geográfica a nivel mundial donde la densidad de invernaderos es más alta). Al ser el plástico un material reflectante, esta circunstancia puede servir como experimento a gran escala. Las conclusiones más importantes son las siguientes:

- La reflectancia solar o albedo ha aumentado un 9% en la zona geográfica con la incorporación de los invernaderos.
- La temperatura media en todo el verano ha disminuido 0,49 °C, habiendo días donde la disminución ha sido 1,3 °C.

### 4. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas después de los procesos de investigación realizados hasta la fecha son las siguientes:

- Las mezclas con áridos calizos son más reflectantes que las mezclas con árido porfídico.
- Las mezclas con granulometría continua (AC tipo D y S) son más reflectantes que las mezclas de granulometría discontinua (BBTM tipo A y B). También se ha comprobado que la velocidad de enfriamiento es similar.
- El menor tamaño máximo de los áridos es más favorable para la reflectancia que un tamaño mayor.
- Cuantos menos huecos tenga la mezcla, más reflectante será.
- El uso de ligante sintético claro es necesario para la obtención de pavimentos reflectantes.
- Se aprecia que adicionando algunos pigmentos de óxidos metálicos, la reflectancia del IR aumenta un 80% con respecto a la muestra control, sin cambiar prácticamente la reflectancia del visible.
- Los pigmentos que mejor funcionan son los óxidos de titanio (blanco) y los óxidos de hierro rojo y amarillo. El mayor porcentaje del pigmento utilizado puede influir positivamente.
- Con la utilización de ligante sintético y TiO<sub>2</sub> se consiguen mezclas asfálticas tipo AC ó BBTM con valores de SR alrededor de 50%. Hay que tener en cuenta que la SR para un firme asfáltico con betún negro recién extendido, ronda el valor de 5% (0,05) y según envejece puede llegar a aumentar la SR hasta valores de 10-15% (0,10-0,15).
- La diferencia de temperatura alcanzada entre dos muestras de la misma mezcla expuestas a la radiación solar, una con betún negro y la otra con ligante sintético + TiO<sub>2</sub>, se acerca a los 10°C.
- También se ha comprobado que ésta diferencia de 10°C se mantiene a distintas temperaturas ambientes entre 18 a 44°C si el valor de la energía solar incidente es superior a 600 W/m<sup>2</sup>. Conforme disminuye el valor de la energía incidente de este valor umbral, va disminuyendo la diferencia de temperatura entre las superficies convencionales y reflectantes.

Como conclusión final, podemos decir que los pavimentos asfálticos reflectantes pueden contribuir de una manera preventiva frente al cambio climático mediante su aportación a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, por su impacto en la reducción de consumos energéticos para climatización e iluminación urbana, y también pueden contribuir desde un punto de vista correctivo a mitigar los efectos del exceso de calor en verano en zonas urbanas.

## 5. Agradecimientos

Para la realización de los trabajos expuestos en este artículo, hemos contado con la inestimable ayuda de la empresa G&C Colors, S.A., especializada en la fabricación de pigmentos inorgánicos, de REPSOL que ha aportado el desarrollo del ligante sintético utilizado, y del Centro Tecnológico del Plástico y del Calzado de la Región de Murcia-CETEC.

## 6. Bibliografía

- Alchapar, N. L., & Correa, E. N. (2016). The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid "OASIS" city. *Sustainable Cities and Society*, 27, 1-14.
- Helen Rose Wilson, Johannes Honek y Tilman E. Kuhn (2015), Instituto Fraunhofer Freiburg i. Br. "Índice de reflectancia solar (SRI) del hormigón". *CPI*, Oct. 80-86
- Yang, J., Wang, Z. H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830-843.
- Tam, B. Y., Gough, W. A., & Mohsin, T. (2015). The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Climate*, 12, 1-10.
- Qin, Y. (2015). Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. *Energy and Buildings*, 96, 86-94.
- Zheng, M., Han, L., Wang, F., Mi, H., Li, Y., & He, L. (2015). Comparison and analysis on heat reflective coating for asphalt pavement based on cooling effect and anti-skid performance. *Construction and Building Materials*, 93, 1197-1205.
- Stone Jr, B., Vargo, J., Liu, P., Habeeb, D., DeLucia, A., Trail, M., ... & Russell, A. (2014). Avoided heat-related mortality through climate adaptation strategies in three US cities. *PLoS One*, 9(6), e100852.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.
- Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., & Kardomateas, T. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas—design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53, 128-136.
- Guía práctica sobre pavimentos fríos. <https://www.cool-rooftoolkit.org/>. (último acceso: marzo 2017)
- Catálogo LEED v4. <http://www.usgbc.org/resources/leed-v4-building-design-and-construction-current-version> (último acceso: julio 2017)
- Mapa de albedo de tejados Los Angeles, Berkeley LAB. <http://albedomap.lbl.gov/#0> (último acceso: julio 2017)
- Estrategias para mitigar el efecto ICU, Agencia Protección del Medio Ambiente de EEUU. <https://www.epa.gov/heat-islands>. (último acceso: junio 2017)
- Página del grupo de Isala de Calor de la Universidad de California. Laboratorio de Energía Berkeley <https://heat-island.lbl.gov/projects/projects-cool-communities>- (último acceso: julio 2017).
- Resumen artículo del revista de la Comisión Europea Science for Environment Policy "Cool pavements to reduce urban heat islands: the state of the technology". [http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/cool\\_pavements\\_reduce\\_urban\\_heat\\_islands\\_state\\_of\\_technology\\_450na3\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/cool_pavements_reduce_urban_heat_islands_state_of_technology_450na3_en.pdf). (último acceso: marzo 2016).