

Estudio del crecimiento urbano, de la estructura de la vegetación y de la temperatura de la superficie del Gran San Miguel de Tucumán, Argentina

Study of the urban growing, the vegetation structure and the land surface temperature of the Gran San Miguel de Tucumán, Argentina

R. Oltra-Carrió¹, J. A. Sobrino¹, J. Gutiérrez-Angonese², A. Gioia²,
L. Paolini² y A. Malizia²
rosa.oltra@uv.es

¹ *Unidad de Cambio Global. Laboratorio de Procesado de Imágenes. Universitat de València*

² *Instituto de Ecología Regional (IER). Universidad Nacional de Tucumán*

Recibido el 25 de junio de 2010, aceptado el 14 de septiembre de 2010

RESUMEN

Se estima que en la actualidad más del 50% de la población mundial vive en ciudades. Esta urbanización del planeta implica un cambio importante en los usos del suelo y, consecuentemente, de las propiedades térmicas de las superficies terrestres. En este trabajo se analiza el impacto de la urbanización en el Gran San Miguel de Tucumán (Argentina). Se estudia el tipo de vegetación que se recupera en la zona tras el proceso de construcción de la ciudad, la transición de vegetación natural a vegetación de parques y jardines. Además se analiza, a través de imágenes de satélite, la temperatura de las superficies de la zona en estudio, relacionándose los patrones térmicos con las zonas vegetadas de la ciudad. A partir de la temperatura de superficie se calcula la intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial que, para imágenes diurnas, da valores negativos para finales de invierno y primavera, y positivos en verano. El aumento de la zona construida entre los años 1992 y 2008 estimado a través de imágenes satelitales es del 66%.

PALABRAS CLAVE: isla de calor urbana de superficie, vegetación urbana, teledetección, LANDSAT, San Miguel de Tucumán (Argentina).

ABSTRACT

Nowadays more than the 50% of the earth population lives in cities. This urbanization of the planet involves an important change in the soil uses. Therefore, thermal properties of the surfaces have changed. In this work the impact of the urbanization is analyzed in the Gran San Miguel de Tucumán (Argentina). It is studied the change from natural vegetation cover to urban vegetation as squares or gardens. Moreover, satellite images are used to study the surface temperature, and it is observed that the thermal patterns are connected with the vegetated areas in the city. Land surface temperature is used to measure the value of the Surface Urban Heat Island. This phenomenon is estimated using daytime images, negative values are obtained in winter and spring while positive values are obtained for summer time. The growing of the built area is monitored with satellite images observing an increase of the urban area of the 66% between 1992 and 2008.

KEY WORDS: surface urban heat island, urban vegetation, remote sensing, LANDSAT, San Miguel de Tucumán (Argentina).

INTRODUCCIÓN

La artificialización del suelo a través de la urbanización es una de las formas más extremas de alteración del uso de la tierra y una de las modificaciones más persistentes e importantes de los cambios producidos por las personas. El impacto de los procesos urbanizadores sobre los ecosistemas naturales y sobre la calidad del hábitat es un tema de estudio de actualidad, siendo poca aun la literatura que podemos encontrar al respecto. La relación entre la dinámica urbana y la dinámica de las comunidades vegetales implica procesos con características complejas y muchas veces no lineales. A medida que la urbanización avanza, la vegetación natural es eliminada y, en parte, es remplazada por una nueva comunidad, mezcla de especies autóctonas y exóticas principalmente ornamentales. La formación de ésta nueva comunidad vegetal asociada a áreas urbanas puede ser entendida como un proceso de transición urbana, donde la vegetación preexistente es reemplazada por una nueva vegetación con características funcionales y estructurales diferentes. Uno de los efectos más importantes que tiene ésta nueva vegetación es la regulación de la temperatura de las áreas urbanizadas. Este proceso de refrigeración se debe no sólo a la intercepción de la radiación solar por parte de la vegetación (lo cual disminuye la acumulación de calor de las construcciones urbanas) sino también a los procesos de evapotranspiración llevados a cabo por las plantas, lo que ayuda a reducir la temperatura del aire. El grado de presencia y las características estructurales y funcionales de la vegetación urbana pueden modificar tanto las características del ciclo diurno como la intensidad de la Isla de Calor Urbana (ICU). Este fenómeno se caracteriza por el calentamiento de las zonas urbanas en comparación a sus alrededores no urbanizados. Estudiar los patrones y procesos que ocurren en un área urbana revela un mosaico dinámico entre gente y naturaleza. Comprender las relaciones entre la dinámica urbana, la dinámica de la vegetación asociada y la temperatura de superficie nos permitirá mejorar nuestro entendimiento sobre los efectos de las futuras urbanizaciones. En este trabajo se presenta un análisis preliminar de la relación entre la dinámica de la vegetación urbana y sus efectos sobre los patrones

de temperatura de superficie en el Gran San Miguel de Tucumán (Argentina).

LUGAR DE ESTUDIO

La Provincia de Tucumán se encuentra en el Noroeste de Argentina. El estudio se centra en el Gran San Miguel de Tucumán (GSMT) que es el aglomerado urbano formado alrededor de la ciudad de San Miguel de Tucumán. El GSMT se encuentra a los pies de la Sierra de San Javier (SSJ), en su vertiente este, y presenta una dinámica de uso de la tierra caracterizada por la reducción de las áreas agrícola-ganaderas y una expansión de las áreas urbanas, asociado al marcado crecimiento poblacional. Durante las últimas cuatro décadas el GSMT ha triplicado su población, conformando el núcleo urbano más importante del Norte de Argentina, con una población de más de 1,5 millones de habitantes. Esto ha generado cambios importantes en los patrones de uso del suelo, por un lado incrementando la densidad de construcciones en el centro de la ciudad y por otro expandiendo su área urbana hacia la periferia. La mayor expansión se ha localizado en su sector oeste, más cercano a la SSJ, y donde se sitúa el núcleo urbano de Yerba Buena.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El análisis de la relación entre la creciente construcción, la vegetación urbana y los patrones de temperatura requieren de un estudio previo en el que cada factor sea analizado. Estas reflexiones y resultados preliminares son los que se presentan a continuación.

Elaboración de mapas de ocupación del territorio

Se han obtenido mapas de suelo urbanizado para el área metropolitana del GSMT a partir de imágenes del satélite Landsat TM de los años 1992, 2000 y 2008. La clasificación se hizo utilizando el procedimiento Random Forest (Breiman, 2001).

A partir de estos mapas se ha obtenido la superficie urbana en cada fecha y se ha estimado el cambio en la superficie urbanizada mediante

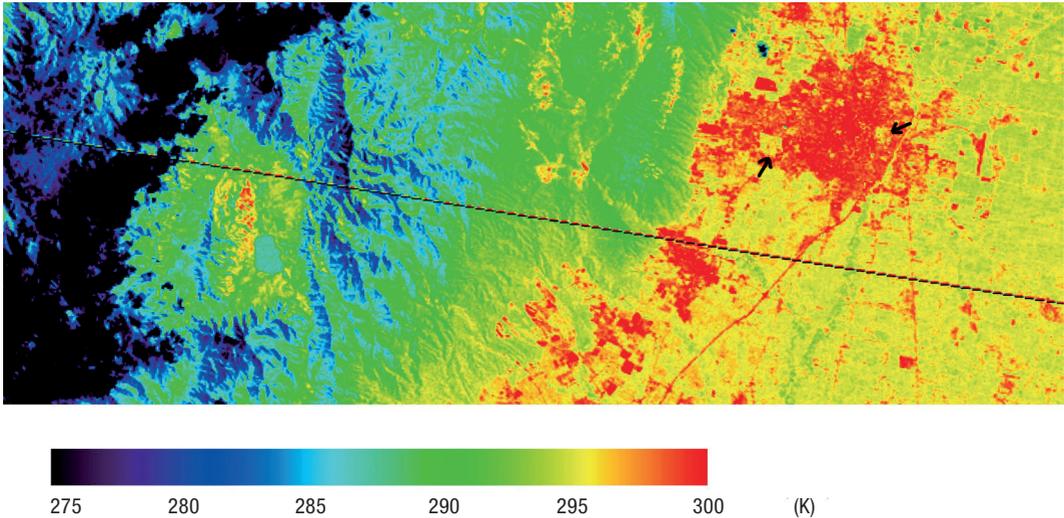


Figura 2. Imagen de TST del día 28 de febrero de 2008 a las 14:00 UTC de la zona del Gran San Miguel de Tucumán. Las zonas señaladas con una flecha corresponden a zonas ajardinadas de la ciudad.

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad \psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau} \quad \psi_3 = L^\downarrow \quad [2]$$

donde τ es la transmisividad de la atmósfera, L^\downarrow la radiancia descendente y L^\uparrow la radiancia ascendente. Estos tres parámetros se han obtenido de productos MODIS de la zona, más concretamente del producto MOD07.

En la Figura 2 se puede observar un ejemplo de las imágenes de temperatura obtenidas. En ella se aprecia perfectamente la diferencia de temperatura superficial entre la zona urbana (temperatura mayor) y la zona no urbana. Además se pueden diferenciar las zonas de parques con vegetación dentro del casco urbano, debido al contraste de temperatura, estas aparecen señaladas con sendas flechas en la figura. La zona de más baja temperatura, a la izquierda de la imagen, corresponde a la SSJ.

A partir de las imágenes de TST, se ha obtenido el valor de la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS), definida según la ecuación 3 como la diferencia entre la temperatura media de la zona urbana y la temperatura media de la zona no urbana. Este efecto sería el análogo al fenómeno atmosférico de la ICU, donde hablamos de temperatura del aire, sólo que en el caso de la ICUS se trata de un efecto superficial y se trabaja por tanto con la TST

$$ICUS = TST_{urbana} - TST_{no-urbana} \quad [3]$$

La zona urbana se ha delimitado siguiendo los límites cartográficos de los núcleos urbanos y la

clasificación obtenida en el subapartado anterior, que distinguía las zonas de suelo urbanizado de las zonas no urbanizadas. La intensidad de la ICUS se ha calculado para un recorte de las imágenes LANDSAT, la porción de imagen elegida se muestra en la Figura 3, donde además, se marca el límite entre lo urbano y lo rural.

El resultado de la ICUS obtenido se puede observar en la Figura 4. Se observa que, para las imágenes de verano (enero, febrero y marzo), se

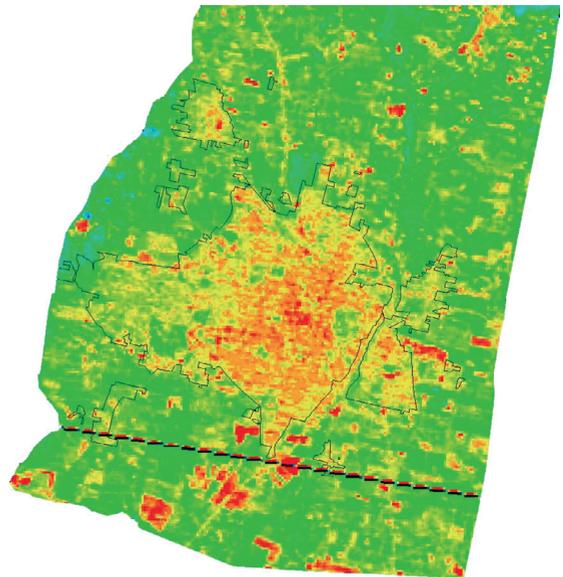


Figura 3. Zona de estudio para determinar la ICUS, las zonas consideradas como urbanas están rodeadas de una fina línea negra.

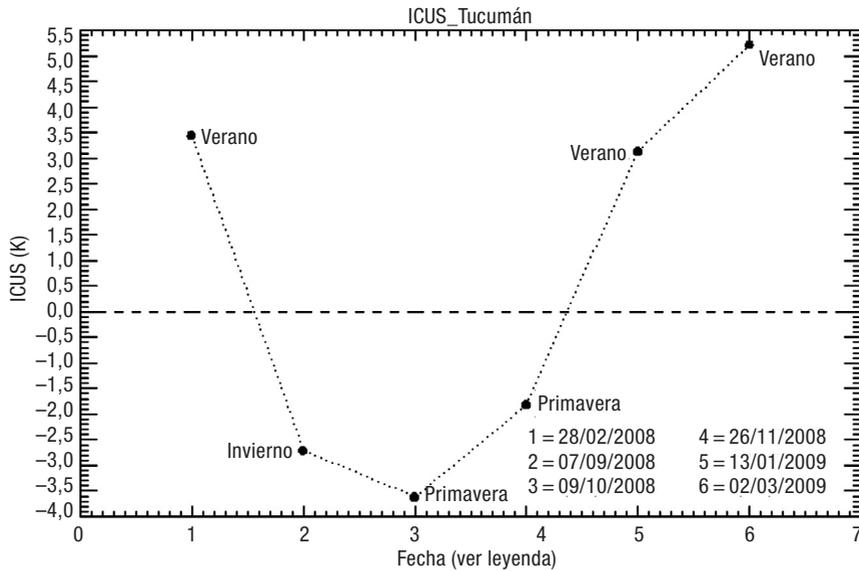


Figura 4. Intensidad del ICUS para los meses de febrero, septiembre, octubre y noviembre de 2008 y enero y marzo de 2009.

obtiene una isla de calor típica positiva, con un máximo de 5,2 K el 2 de marzo. Mientras que para invierno (septiembre y octubre) y primavera (noviembre), la ICUS calculada es fría o negativa, con un mínimo de -3,6 K el día 9 de octubre.

Son diversas las causas que originan este comportamiento de la ICUS. Una de ellas sería la variación de la elevación del sol en las distintas épocas del año. En la Tabla 1 se pueden consultar los distintos ángulos cenitales solares para cada imagen, todos calculados a las 14:00 UTC (hora de adquisición de las imágenes). Vemos que en invierno el ángulo solar cenital es mayor que en verano y, por tanto, en invierno tendremos más sombras debido a los edificios que en verano. Así, la exposición de las superficies urbanas a la radiación solar directa en invierno será menor que en verano, en consecuencia, el calentamiento del cañón urbano también será menor. No obstante, es-

ta no puede ser la única causa del comportamiento anual de la ICUS, ya que, según la Tabla 1, para la fecha de primavera del 26 de noviembre, las sombras serían menores que para las fechas de verano del 28 de febrero y del 2 de marzo. Por tanto, se esperaría mayor calentamiento de la ciudad en esa fecha de primavera. Sin embargo, no hay que olvidar que la SUHI se obtiene de una resta y lo que obtenemos en realidad en la figura 4 es que el entorno rural se presenta más frío que la ciudad en las fechas de verano ($SUHI > 0$) y al revés en la fecha primaveral ($SUHI < 0$). Por lo tanto, cabe pensar que el comportamiento de la Figura 4 es debido a cambios estacionales del entorno urbano.

En otros estudios como el realizado en la ciudad de Atenas (Stathopoulou *et al.*, 2009) y en experiencias de campo en otras ciudades, como por ejemplo Madrid (Sobrino *et al.*, 2009b, Sobrino *et al.*, 2009a), queda demostrado que el fe-

Fecha y hora	Estación del año	θ (°)
13 de enero (14:00 UTC)	Verano	23.5
28 de febrero (14:00 UTC)	Verano	38.4
2 de marzo (14:00 UTC)	Verano	38.9
7 de septiembre (14:00 UTC)	Invierno	47.3
9 de octubre (14:00 UTC)	Primavera	39.3
26 de noviembre (14:00 UTC)	Primavera	32.7

Tabla 1. Ángulo cenital solar para cada imagen analizada.

nómeno de la ICUS se observa mejor de noche, debido al enfriamiento más rápido que sufren las superficies rurales respecto a las urbanas. Mientras que de día se obtiene una ICUS fría, es decir, que la zona no construida presenta temperaturas mayores que las que sí lo están. La intensidad de la ICUS se ve pues fuertemente influenciado por las características de las zonas circundantes a la ciudad, que en el caso de Madrid son más áridas que en el caso de Tucumán. Los cultivos que rodean el GSMT son cítricos y caña de azúcar, así, la fenología del cultivo de caña de azúcar influirá fuertemente en el resultado de la ICUS. Durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, con $ICUS < 0$, la porción de suelo desnudo en cada píxel de plantación de caña de azúcar, es mayor que en los meses de enero, febrero y marzo, donde la temperatura superficial urbana es mayor que la rural, con más presencia de vegetación.

Reconstrucción de la dinámica de la vegetación urbana

Para analizar la relación entre estructura y composición de la vegetación a lo largo del gradiente de urbanización San Miguel de Tucumán-Yerba Buena-SSJ y su relación con los valores de Temperatura de Superficie se ha trabajado en 19 plazas ubicadas a lo largo del gradiente, siendo estos sitios representativos del arbolado público.

Se han medido todos los árboles de más de 10 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) e identificado a nivel de especie. Se han utilizado parámetros estructurales medidos in situ como la cobertura vegetal, el área basal, y la densidad de vegetación. Además se han obtenido datos de superficie de cobertura vegetal y superficie de cemento, utilizando la aplicación *Google Earth Pro.*, además de variables complementarias co-

mo la distancia a la SSJ y la antigüedad de las plazas.

Los parámetros ambientales considerados para el estudio han sido el NDVI calculado a partir de imágenes Landsat TM y para la temperatura de superficie se han utilizado las imágenes de TST obtenidas en el subapartado anterior.

Para describir la estructura del arbolado urbano a lo largo del gradiente se han realizado análisis de correspondencia corregido (DCA) y análisis de componentes principales (PCA) para cuantificar gradientes a lo largo de las 19 plazas, basados en las variables estructurales y ambientales. Para relacionar las variables estructurales del arbolado urbano, las variables ambientales y las variables complementarias se han utilizado correlaciones de Pearson entre dichos parámetros y los scores de las plazas sobre los ejes del PCA.

Lo que muestra el análisis es que el arbolado urbano representado en las plazas posee una composición simplificada, fuertemente dominada por pocas especies, entre ellas *Citrus sp.*, *Tabebuia impetiginosa*, *Jacaranda mimosifolia* y *Fraxinus sp.*; con alta proporción de individuos para estas especies. Estos resultados sugieren que a escala local la urbanización tiende a homogeneizar la comunidad de plantas. Además, como consecuencia de la intervención antrópica en el ajardinamiento de las plazas, se observa en los resultados una proporción casi igual de especies exóticas y nativas.

Las plazas del centro de San Miguel de Tucumán, que en este estudio representa la zona más densamente urbanizada, se encuentran más alejadas de la Sierra de San Javier, son más antiguas, presentan mayor porcentaje de superficie construida y se registra mayor temperatura de superficie, en comparación con aquellas ubicadas en Yerba Buena (Tabla 2). Mientras que las plazas ubicadas en la localidad de Yerba Buena (zona menos densamente urbanizada del estudio) revelan mayor porcentaje de superficie ver-

	TST media (K)
Zona verde en Yerba Buena	304,5 ± 1,2
Zona verde en San Miguel de Tucumán	305,1 ± 1,7
Zona de baja urbanización (Yerba Buena)	308,2 ± 1,5
Zona densamente urbanizada (San Miguel)	311,4 ± 1,9

Tabla 2. Valores de TST para algunas zonas verdes y superficies urbanas calculadas a partir de la imagen Landsat TM del día 2 de marzo de 2009.

de, más cobertura vegetal y área basal (la mayoría) y valores más altos del índice de vegetación NDVI. Por lo tanto, existe una relación positiva entre la cobertura vegetal del arbolado urbano y el NDVI; y por otro lado, esa cobertura se relaciona negativamente con la temperatura de superficie por lo cual se confirma que al haber mayor vegetación existe mayor evapotranspiración y más sombra, lo que contribuye a disminuir el sobrecalentamiento de las estructuras urbanas.

CONCLUSIONES

El análisis de las imágenes de TST nos ha permitido estudiar el cambio térmico de las diferentes superficies que constituyen el GSMT a lo largo del año. Este cambio en los patrones de temperatura debido a la construcción, se ha cuantificado a partir de la ICUS. Los cambios en la intensidad de la ICUS serán debidos a la diferente estación del año y a la fenología de los cultivos que rodean la ciudad, como la caña de azúcar. Se ha obtenido un resultado de ICUS < 0 para finales de invierno y primavera (septiembre, octubre y noviembre) y un ICUS > 0 para los meses de verano (enero, febrero y marzo). Obteniendo una diferencia máxima entre los meses de octubre y marzo de unos 9 K.

De forma complementaria, el análisis de los patrones de vegetación asociados al proceso de expansión urbana a lo largo del gradiente urbano-rural bajo estudio, muestra el papel central que juega la estructura de la vegetación a la hora de mitigar los efectos de la ICUS.

La información obtenida puede servir para alimentar modelos dinámicos espacialmente explícitos que permitirán generar escenarios futuros realistas con los cuales enfrentar el crecimiento urbano durante el próximo siglo y estudiar el cambio climático local y la ecología urbana.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el desarrollo (AECID), bajo el proyecto A/018766/08-Efectos de la dinámica urbana sobre la estructura de la vegetación y la temperatura de superficie del Gran San Miguel de Tucumán.

Este trabajo se llevó a cabo mientras R. Oltra-Carrió disfrutaba de una beca predoctoral *V Segles* de la Universitat de València.

REFERENCIAS

- BREIMAN, L. 2001. Random Forest. *Machine Learning*, 45: 5- 32.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., CRISTÓBAL, J., SOBRIÑO, J. A., SÒRIA, G., NINYEROLA, M. & PONS, X. 2009. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 4 (1): 339-349.
- SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SÒRIA, G., ROMAGUERA, M., GUANTER, L., MORENO, J., PLAZA, A. & MARTÍNEZ, P. 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 8(2): 316-327.
- SOBRINO, J. A., BIANCHI, R., PAGANINI, M., SÒRIA, G., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., OLTRA-CARRIÓ, R., MATTAR, C., ROMAGUERA, M., FRANCH, B., HIDALGO, V., CUENCA, J., JULIEN, Y., ATITAR, M., FERNÁNDEZ-RENAU, A., GÓMEZ, J. A., DE MIGUEL, E., GUTIÉRREZ DE LA CÁMARA, O., JIMÉNEZ, M., PRADO, E., RODRÍGUEZ-CANTANO, R., RUIZ, I., NERRY, F., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P. P., PUJADAS, M., MOLERO, F., MORENO, J., ALONSO, L., FERNÁNDEZ, F., GALÁN, E., CAÑADA, R., ROMERO, J. M., CALPE-MARAVILLA, J., CAMPS-VALLS, G., BOSCH-MAGRANER, M., PUENTE-ROBLES, R., CORDERO-SALVADOR, J., TORRES-CARRERO, J., DUQUE-CUESTA, M. A., MOYA, F., LABAJÓ, A., LABAJÓ, S., HIDALGO-RODRÍGUEZ, J., ACERO, J. A., HERNÁNDEZ-MARTÍN, E., MARTILLI, A., SALAMANCA, F., GIMENO-PRESA, L. & PIGEON, G. 2009a. Dual-use European Security IR Experiment 2008 (DESIREX 2008) Final Report. Frascati (Italy), European Space Agency.
- SOBRINO, J. A., SÒRIA, G., OLTRA-CARRIÓ, R., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., ROMAGUERA, M., CUENCA, J., HIDALGO, V., FRANCH, B., MATTAR, C., JULIEN, Y., BIANCHI, R., PAGANINI, M., MORENO, J. F., ALONSO, L., FERNÁNDEZ-RENAU, A., GÓMEZ, J. A., DE MIGUEL, E., GUTIÉRREZ, O., JIMÉNEZ, M., PRADO, E., RODRÍGUEZ-CANTANO, R., RUIZ, I., NERRY, F., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P. P., PUJADAS, M., MOLERO, F., MARTILLI, A., SALAMANCA, F., FERNÁNDEZ, F., GALÁN, E., CAÑADA, R., HERNÁNDEZ, E., HIDALGO, J., ACERO, J. A., ROMERO, J. M., MOYA, F. & GIMENO, L. 2009b. DESIREX 2008: estudio de la isla de calor en la

Ciudad de Madrid. *Revista de Teledetección*, 31: 80-92.

STATHOPOULOU, M., SYNNEFA, A., CARALIS, C., SANAMOURIS, M., KARLESS, T. & AKBARI, H. 2009. A surface heat island study of Athens

using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. *International Journal of Sustainable Energy*, 28: 59-76.