

DESIREX 2008: Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid

DESIREX 2008: Urban heat island analysis in the City of Madrid

J. A. Sobrino¹, G. Sòria¹, R. Oltra-Carrió¹, J. C. Jiménez-Muñoz¹, M. Romaguera¹, J. Cuenca¹, V. Hidalgo¹, B. Franch¹, C. Mattar¹, Y. Julien¹, R. Bianchi², M. Paganini², J. F. Moreno³, L. Alonso³, A. Fernández-Renau⁴, J. A. Gómez⁴, E. de Miguel⁴, Ó. Gutiérrez⁴, M. Jiménez⁴, E. Prado⁴, R. Rodríguez-Cantano⁴, I. Ruiz⁴, F. Nerry⁵, G. Najjar⁵, P. Kastendeutch⁵, M. Pujadas⁶, F. Molero⁶, A. Martilli⁷, F. Salamanca⁷, F. Fernández⁸, E. Galán⁸, R. Cañada⁸, E. Hernández⁹, J. Hidalgo¹⁰, J. Á. Acero¹⁰, J. M. Romero¹¹, F. Moya¹², L. Gimeno¹³
sobrino@uv.es

¹Universidad de Valencia – Unidad de Cambio Global (UCG), ²Agencia Espacial Europea (ESA),

³Universidad de Valencia – Laboratorio de Observación de la Tierra (LEO),

⁴Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), ⁵Universidad Louis Pasteur, Strasbourg – LSIT,

⁶CIEMAT - Unidad de Polución Atmosférica (Estación Lidar), ⁷CIEMAT - Unidad de Polución Atmosférica (Modelización Atmosférica), ⁸Universidad Autónoma - Madrid (UAM),

⁹Universidad Complutense - Madrid (UCM), ¹⁰Labein-Tecnalia (LBEIN),

¹¹Ayto. de Madrid - Área de Gobierno de Urbanismo y Vivienda - Departamento de Cartografía,

¹²Ayto. de Madrid- Sistema Integral de Vigilancia, Predicción e información,

¹³Universidad de Vigo (UVIGO)

Recibido el 03 de marzo de 2009, aceptado el 27 de abril de 2009

RESUMEN

Entre el 23 de junio y el 6 de julio de 2008 tuvo lugar en Madrid la campaña experimental DESIREX2008 (Dual-use European Security IR Experiment 2008), de la agencia espacial europea ESA, con el objetivo de estudiar el efecto de isla de calor en zonas urbanas. La Unidad de Cambio Global de la Universidad de Valencia organizó y participó en la campaña DESIREX 2008, llevando a cabo medidas de parámetros biofísicos como, entre otros, la temperatura del aire, temperatura de la superficie, velocidad y dirección del viento, emisividad y reflectividad de las superficies urbanas y rurales. Dichas medidas se desarrollaron diariamente en mástiles fijos, transectos en automóvil y en puntos de calibración/validación durante las 2 semanas de la campaña y en coincidencia con el paso de sensores a bordo de satélites como el ASTER/TERRA, TM/Landsat, AATSR/ENVISAT,

ABSTRACT

From June 23rd to July 6th of 2008, the DESIREX 2008 (Dual-use European Security IR Experiment 2008) experimental campaign from the European Space Agency (ESA) was carried out in the city of Madrid, with the objective of studying the Urban Heat Island (UHI) effect. The Global Change Unit from the Universitat de València organized and took part in the campaign DESIREX2008. Different biophysical parameters were measured, as air temperature, surface temperature, wind speed, wind direction, emissivity and reflectivity of urban and rural surfaces. These measures were taken daily using fixed masts, car transects and calibration/validation points. 30 flight lines were performed during the campaign, covering the urban area of Madrid and its surroundings with the Airborne Hyperspectral Scanner AHS. In addition, spaceborne images were acquired: ASTER/TERRA,

AVHRR/NOAA, MODIS/TERRA-AQUA, SEVIRI/MSG2 y del paso del sensor aerotransportado AHS para un total de 30 líneas de vuelo sobre el municipio de Madrid y alrededores. En el presente trabajo se presentan las medidas realizadas en la campaña DESIREX 2008 así como se realiza un análisis de los datos obtenidos y las imágenes adquiridas durante la campaña.

PALABRAS CLAVE: DESIREX, Isla de Calor, AHS, temperatura de la superficie, temperatura del aire

TM/Landsat, AATSR/ENVISAT, AVHRR/NOAA, MODIS/TERRA-AQUA, SEVIRI/MSG2. The data and images obtained during the campaign are shown in this work.

KEYWORDS: DESIREX, Urban Heat Island, AHS, Land Surface Temperature, Air Temperature

INTRODUCCIÓN

Entre el 23 de junio y el 6 de julio de 2008 tuvo lugar en la ciudad de Madrid la campaña experimental DESIREX 2008 (Dual-use European Security IR Experiment 2008), financiada por la Agencia Espacial Europea (ESA) en el marco de los proyectos de Isla de Calor Urbana (ICU) y termografía urbana (TU) del Data User Element (DUE). Esta campaña nace como parte de las actividades propuestas en la reorientación del programa FUEGO-SAT, generando un conjunto espectral, geométrico y radiométricamente representativo de datos medidos in situ, así como de imágenes hiperespectrales a bordo de avión y satélite.

La campaña fue coordinada por la Unidad de Cambio Global de la Universidad de Valencia (UEVG), que realizó medidas a nivel de superficie en colaboración con la Universidad de Estrasburgo (LSIIT), el CIEMAT, el Ayuntamiento de Madrid, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), la Universidad Complutense de Madrid (UCM), LABEIN y la Universidad de Vigo (UVIGO); las adquisiciones a bordo de avión fueron realizadas por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

La zona de estudio cubre la ciudad de Madrid, con una población estimada de 3.2 millones de habitantes, llegando a los 5.1 millones al considerar los núcleos de población adyacentes. Posee un clima mediterráneo con estacionalidad en las temperaturas, sequía estival e irregularidad en las precipitaciones.

Localizada en un área relativamente llana a 50 km al sur de la cordillera central, su altitud varía entre los 550 m y los 700 m, lo que le aporta inviernos fríos y veranos muy calurosos. Estas son las estaciones más secas, produciéndose los máximos de

precipitación en otoño y primavera.

El rasgo topográfico más destacado es el río Manzanares, que cruza la ciudad de oeste a este.

En la campaña DESIREX 2008 (Sobrinó *et al.* 2009) se obtuvieron datos del sensor aerotransportado multiespectral AHS (Airborne Hyperspectral Scanner), propiedad del INTA, siguiendo dos líneas de vuelo, norte-sur y oeste-este (Figura 1). Se adquirieron imágenes desde satélite de la zona de estudio a partir de los sensores ASTER/TERRA, TM/Landsat, AATSR/ENVISAT, MODIS/TERRA y AQUA, AVHRR/NOAA y SEVIRI/MSG2 gracias al sistema de recepción de imágenes instalado en el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (LPI) de la UVEG, así como imágenes proporcionadas por la ESA y el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Las medidas in situ consistieron en medidas atmosféricas, actividades de calibración del sensor AHS, validación de productos, medidas móviles y fijas de temperatura del aire, humedad del aire y temperatura de la superficie, balance de radiación, caracterización espectral de superficies urbanas y termografía urbana.

INSTRUMENTACIÓN

La campaña DESIREX2008 utilizó un importante volumen de instrumentación científica.

El sensor AHS a bordo de avión posee 80 bandas espectrales en el rango del visible y próximo infrarrojo (VNIR), infrarrojo de onda corta (SWIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo térmico (TIR).

Se realizaron medidas de temperatura del aire y humedad relativa con sensores HMP45C (Vaisala), en transectos móviles y sensores Unidata 6501-EU en medidas fijas. En alguno s de estos mástiles se midió la velocidad y dirección del viento con sensores Unidata 6504-F.

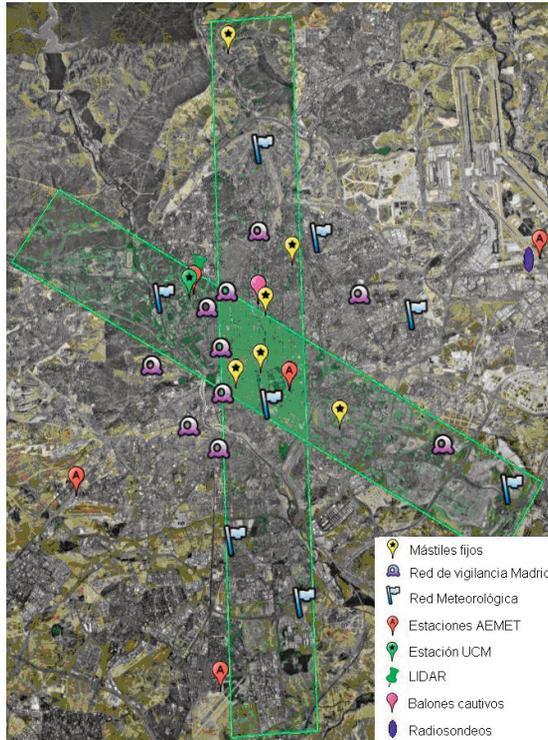


Figura 1. Líneas de vuelo del sensor AHS y localización de las medidas en tierra y atmosféricas

En el infrarrojo térmico (Figura 2), se usaron radiómetros multiespectrales y de banda ancha. El radiómetro CIMEL CE312-1 es un detector multiespectral que posee una banda ancha en los, 8-13 μm , y tres bandas estrechas cuya longitud de onda efectiva es 8.8 μm , 10.8 μm y 11.9 μm . El CE312-2 posee 6 bandas, una ancha en 8-13 μm , y cinco estrechas, 8.4 μm , 8.7 μm , 9.1 μm , 10.6 μm y 11.3 μm . Los sensores de banda ancha (en el rango 8 – 14 μm) son el Everest 3000.3LC/4ZL, Apogee IRR-P, OPTRIS CS/CT-LT15, Raytek MID, Raytek ST6 y Heitronics KT 19.85. Además se usaron tres cámaras térmicas, NEC TH9100, NEC TH7800 y FLIR P640 para la adquisición de imágenes de termografía urbana y actividades de calibración/validación. La radiación atmosférica descendente se midió con un plato difusor (Labsphere) y todos los radiómetros se calibraron con una fuente LAND P80P. Las medidas en el rango solar del espectro se realizaron con los espectroradiómetros ASD y GER. El ASD FieldSpec3 mide en el rango comprendido entre los 350 – 2500 nm, mientras que el GER 1500 abarca de los 350nm a 1050 nm. Ambos sensores se usaron para calibrar y validar la corrección atmosférica de las imágenes del sensor AHS así como para producir una librería espectral de superficies ur-

banas.

METODOLOGÍA

Imágenes a bordo de avión

Se realizaron un total de 10 vuelos de avión a las 11h, 21h, y 4h UTC, empezando el 25 de Junio a mediodía y terminando el 4 de Julio a medianoche. Teniendo en cuenta las dos líneas de vuelo (Norte-Sur y Oeste-Este), así como las diferentes altitudes, se obtuvieron 30 líneas de vuelo, lo que suman una longitud aproximada de 1000 km.

Datos atmosféricos

AEMET realizó dos radiosondeos diarios (a mediodía y a medianoche). En los días con vuelo de avión se realizaron cuatro sondeos mediante globo cautivo en el centro de la ciudad. El CIEMAT realizó medidas LIDAR y meteorológicas para la caracterización del perfil vertical de aerosoles. Las estaciones de la red meteorológica de la ciudad de Madrid, aportaron medidas de dirección y velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, temperatura de aire y precipitación.



Figura 2. Instrumentación utilizada en las medidas en el infrarrojo térmico

Datos a nivel de superficie

Durante la campaña se realizaron diferentes medidas a nivel de superficie: i) medidas radiométricas para la calibración/validación de los datos AHS, ii) medidas para la caracterización del efecto de Isla de Calor, las cuales incluyen transectos móviles, medidas en mástiles y caracterización espectral de superficies urbanas, y iii) medidas relacionadas con la termografía urbana.

i) Las actividades de calibración y validación se realizaron simultáneamente con el paso de los senso-

res AHS y ASTER. Los sensores CIMEL, RAYTEK y Heitronics, así como la cámara térmica NEC TH9100, realizaron medidas de temperatura de la superficie terrestre, emisividad de la superficie y radiancia atmosférica descendente (UCG y LSIT). Las reflectividades fueron medidas con el ASD (INTA).

Las superficies de estudio elegidas fueron: como foco frío una superficie de hierba verde en la UAM y el agua del lago del parque del Retiro; como foco caliente, un suelo desnudo en la UAM y cemento del Palacio Real (Figura 3).

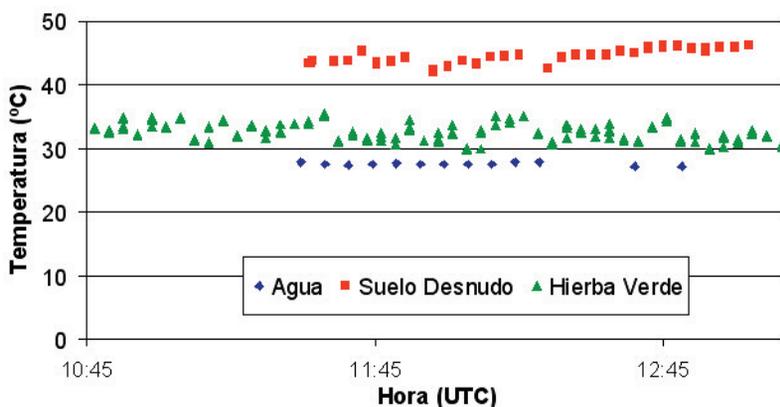


Figura 3. Medidas de calibración en las superficies de referencia de agua, suelo desnudo y hierba verde para el vuelo a mediodía del 1 de julio.

ii) Las medidas móviles para caracterizar el efecto ICU se realizaron mediante transectos en automóvil, con cuatro rutas. La ruta 1 transcurre en el eje vertical norte-sur.

La ruta 2 se sitúa en una zona urbana densa, cubriendo zonas vegetadas. La ruta 3 transcurre por distintos distritos de la ciudad de densidad media como el barrio de Salamanca. La ruta 4 cubre desde el Parque del Retiro hasta Vallecas incluyendo medidas en autovía. Los automóviles incorporaban sondas HMP45AC de temperatura de aire y humedad y radiómetros APOGEE IRR-P y OPTRIS CS para la medida de la temperatura de la superficie, así como GPS para la geo-referenciación de los datos. Los transectos se realizaron de forma continuada tres

veces al día (4h, 11h y 22h UTC) con una duración de 1 hora. Se instalaron un conjunto de 6 mástiles fijos en zonas rurales, urbana-media y urbana densa para realizar medidas de forma continua durante la campaña DESIREX. Estos mástiles registraron valores de temperatura de aire, humedad relativa, temperatura de la superficie y, en algunos mástiles, dirección y velocidad del viento. Los sensores ASD y GER realizaron medidas de las respuestas espectrales de reflectividad para superficies naturales y artificiales, representativas de materiales urbanos (Figura 4). Se obtuvieron medidas de emisividad (Figura 5) de las diferentes superficies, usando el sensor CIMEL CE312-2 mediante el método de separación de temperatura y emisividad (Temperature

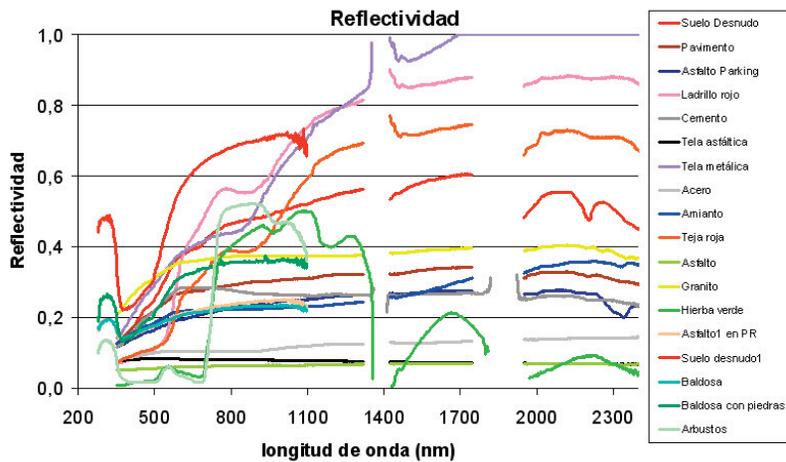


Figura 4. Reflectividad de las superficies urbanas medidas durante la campaña DESIREX 2008 medida con el ASD

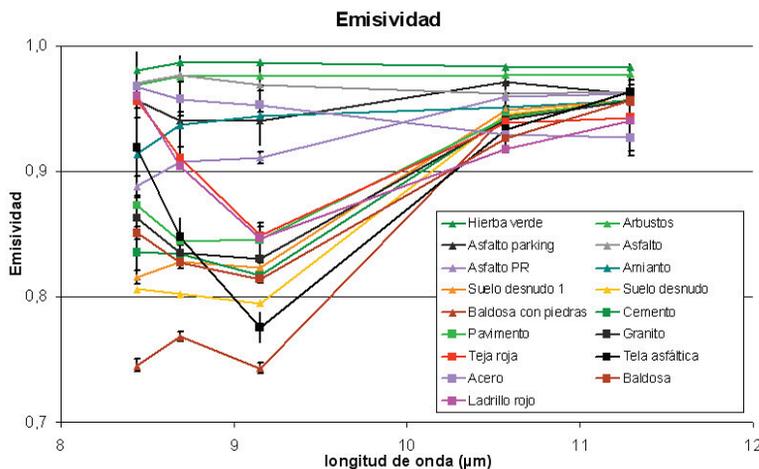


Figura 5. Emisividad de las superficies urbanas medidas durante la campaña DESIREX 2008 a partir de medidas CIMEL



Figura 6. Superficies urbanas seleccionadas para la caracterización espectral de reflectividad y emisividad durante la campaña DESIREX 2008

Emissivity Separation - TES, Gillespie *et al.*, 1998). Entre las superficies analizadas que se muestran en la figura 6, podemos destacar: hierba verde, suelo desnudo, ladrillo, pavimento, cemento, tela asfáltica, amianto, teja, acero, asfalto y granito.

iii) Simultáneamente con el paso del sensor AHS, se adquirieron imágenes térmicas para las actividades de Termografía Urbana. Estas imágenes se tomaron desde terrazas de edificios como el Área de Urbanismo y Vivienda, la imprenta municipal, así como desde la torre del Parque de Bomberos de la Villa de Vallecas y la torre Picasso. (Figura 7).

RESULTADOS

Calibración de imágenes del sensor AHS

En la Figura 8 se muestra el resultado de la calibración de las 10 bandas del TIR, se representa la temperatura de brillo del sensor frente a la temperatura de brillo simulada a partir de las medidas in situ, aplicando la ecuación de transferencia radiativa y datos atmosféricos estimados con MODTRAN4 a partir de los sondeos atmosféricos de la zona. Los resultados muestran un buen valor de RMSE de 1 K.

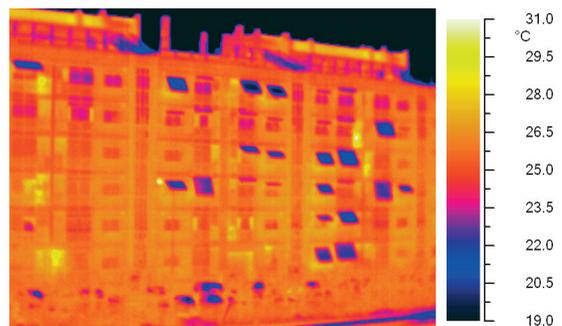


Figura 7. Ejemplo de datos de termografía urbana

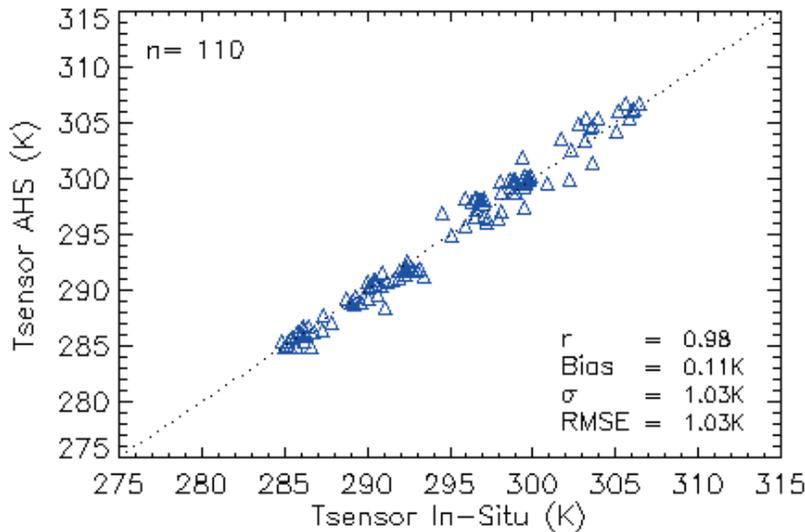


Figura 8. Comparación entre las temperaturas de brillo simuladas a partir de las medidas in situ (Tsensor In-Situ) y las obtenidas de imágenes AHS (Tsensor AHS)

A partir de las bandas TIR se han obtenido mapas de temperatura de la superficie terrestre (TST) y emisividad del suelo para todas las imágenes recogidas. Los mapas de temperatura se han generado aplicando dos algoritmos distintos, el algoritmo Split-Window (SW) (Sobrino y Raissouni, 2000), que utiliza dos bandas térmicas y el algoritmo TES, que requiere de datos multispectrales y proporciona también la emisividad.

El algoritmo SW utilizado en este análisis tiene la siguiente estructura:

$$T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\varepsilon \quad (1)$$

donde T_i y T_j son las temperaturas de brillo (en K) para dos bandas térmicas diferentes del AHS, w es el contenido atmosférico de vapor de agua (en g/cm^2) y $\varepsilon = 0.5(\varepsilon_i + \varepsilon_j)$ y $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ son respectivamente la emisividad media y la diferencia entre emisividades para las dos bandas de AHS consideradas. Las dos bandas elegidas para el análisis son la banda 75 ($10.07 \mu m$) y la 79 ($12.35 \mu m$) ya que son las que proporcionan mejores resultados (Sobrino *et al.*, 2006). Los coeficientes c_i se obtienen de datos si-

mulados (sondeos atmosféricos, MODTRAN4 y espectros de emisividad) (Sobrino *et al.*, 2006). Para aplicar el algoritmo SW se ha utilizado la emisividad obtenida a partir del método TES. Este método se ha aplicado a 7 de las 10 bandas térmicas que posee el sensor AHS, en concreto a las bandas 72, 73, 75, 76, 77, 78 y 79. Las bandas 71 y 80 no se han considerado por estar situadas en una región de mayor absorción atmosférica, mientras que la banda 74 no se ha considerado por estar situada en la banda de absorción del ozono.

Estos dos algoritmos fueron validados con 46 puntos verdad del terreno, que incluían hierba, suelo desnudo, agua y dos superficies urbanas distintas (tela asfáltica negra y tela asfáltica verde). La validación se dividió en dos grupos: los vuelos diurnos (mediodía local) y los vuelos nocturnos (medianoche local y madrugada). En la Tabla 1 se muestra como para los vuelos diurnos, el RMSE es mayor del doble que el obtenido para los vuelos nocturnos. Esto es debido a la presencia de sombras durante el día y a la complejidad y heterogeneidad del entramado urbano. Comparando los diversos métodos, para la noche se obtienen valores de RMSE de 1.9 K para el SW, resultado que se mejora en el caso del TES, con un RMSE de 1.4 K. Hay que señalar que estos últimos valores de RMSE son similares a los obtenidos cuando se considera en la validación únicamente zonas rurales (hierba, suelo y agua) tanto en el caso diurno como en el nocturno.

	Vuelos	r	Bias (K)	σ (K)	RMSE (K)
SW	nocturnos	0.96	-1.2	1.4	1.9
SW	diurnos	0.98	0.9	3.2	3.2
SW	todos	0.98	-0.0	2.8	2.8
TES	nocturnos	0.96	-0.7	1.2	1.4
TES	diurnos	0.99	-0.0	3.0	3.0
TES	todos	0.99	-0.3	2.4	2.4

Tabla 1. Valores estadísticos de la validación de los algoritmos TES y SW.

En las siguientes figuras se muestran dos mapas de temperaturas de superficie obtenidos con el TES para el día 28 de junio a mediodía, hora local, (Figura 9) y a medianoche, hora local, (Figura 10). Las imágenes son una composición de las dos pasadas, la Norte-Sur y la Este-Oeste.

Para el mediodía, el mapa se representa en un rango

de temperaturas de 27 grados, entre 301 K y 328 K. Las zonas de temperatura máxima se dan en el entorno rural. En cambio, para la imagen de noche, tenemos un intervalo de temperaturas de 14 grados, entre 290 K y 304 K. La temperatura máxima en este caso se sitúa dentro de la ciudad, mientras que los alrededores presentan una temperatura baja.

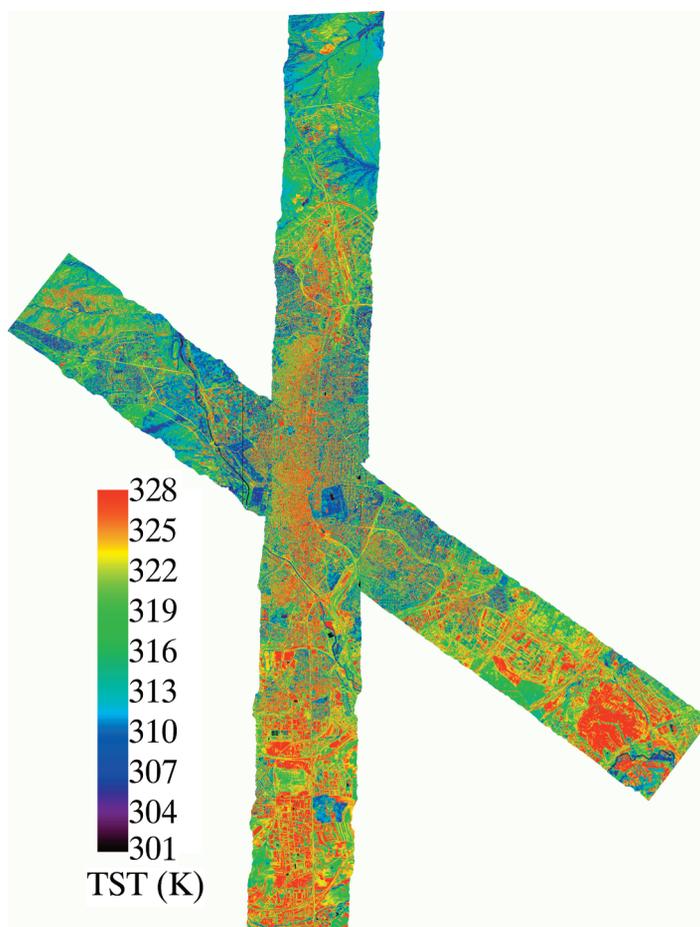


Figura 9. Mapa de TST con el método TES de las imágenes AHS del mediodía del 28 de junio

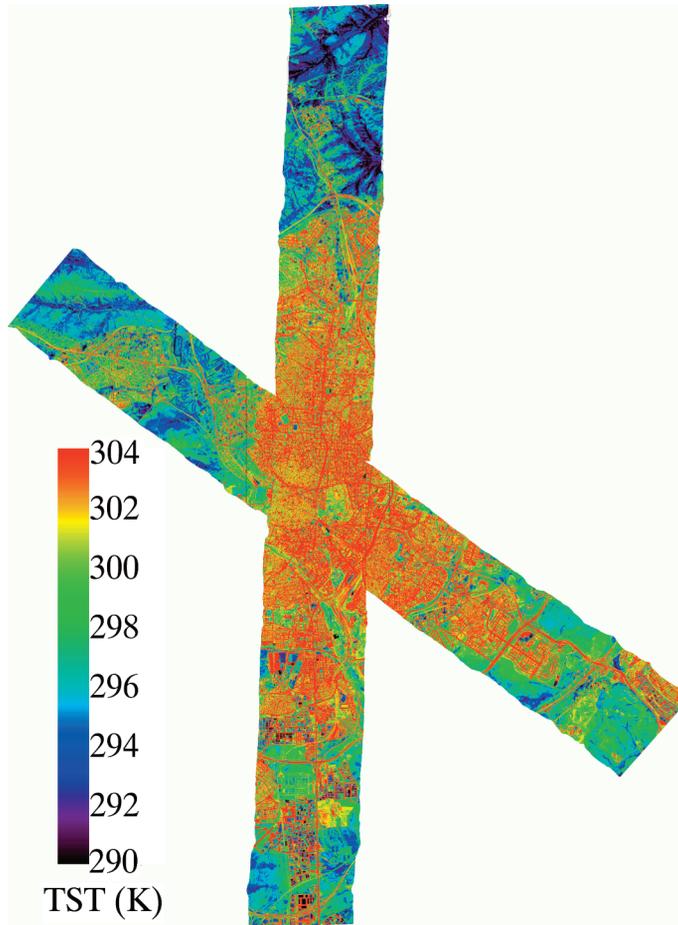


Figura 10. Mapa de TST con el método TES de las imágenes AHS de la medianoche del 28 de junio

Evolución de los parámetros atmosféricos

El análisis de los datos LIDAR muestra evidencias de una intrusión de aerosoles saharianos el 24 de junio, y en menor medida el 30. Durante este evento, la distribución vertical de aerosoles presentó una capa de transporte situada por encima de la capa de mezcla, entre los 1.6 y 3 km en el primer caso y entre 2.5 y 4 km en el segundo. El 2 de julio tuvo lugar un cambio en las condiciones atmosféricas (Figura 11), cuando la llegada de una masa de aire del Atlántico redujo la carga de aerosoles, con un espesor óptico de aerosoles por debajo de 0.1 y la capa de mezcla se extendió 1.5 km.

El vapor de agua registrado en los radiosondeos durante la campaña está situado en un rango entre los 1.0 y 2.7 g/cm², sin apreciarse claras diferencias entre los valores obtenidos por el día y por la noche. La evolución de parámetros atmosféricos muestra un evento de precipitación previo al inicio de la campaña (23 junio) y posteriormente una evolución dia-

ria estable en términos de temperatura de aire y humedad relativa, cuya tendencia se rompe el 2 de julio (Figura 12). Los picos en la velocidad de viento registrados en la tarde del 2 de julio (con 5m/s en la estación meteorológica de Plaza Castilla) confirman el cese de esta tendencia de estabilidad.

Evolución del efecto de Isla de Calor Urbana (ICU) con datos meteorológicos

Siendo el efecto ICU como la diferencia de la temperatura de aire entre una zona urbana y una zona rural adyacente, podemos estudiar este efecto usando las medidas en mástiles fijos, como muestra la Figura 12. El efecto ICU es más importante durante la noche, así pues, se han calculado las diferencias en los valores mínimos de la temperatura de aire en horas nocturnas (Figura 13). Dichos mínimos muestran una tendencia ascendente desde el inicio de la campaña hasta el 2 de julio, cuando el efecto ICU se interrumpió.

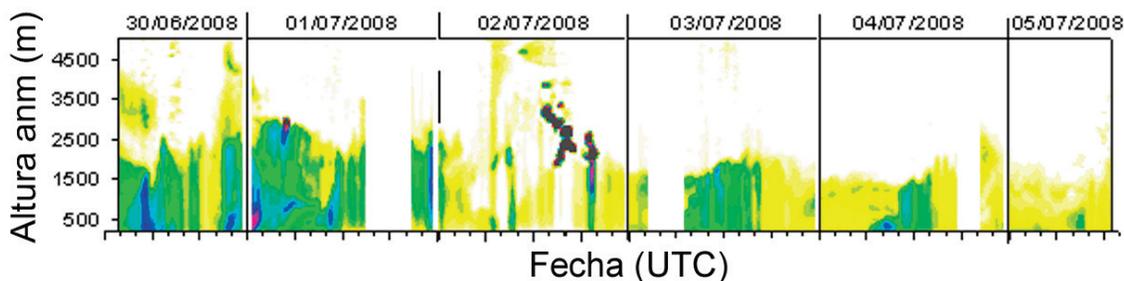


Figura 12. Evolución de la temperatura del aire y de la humedad relativa registrada en las estaciones meteorológicas de Barajas y el Retiro

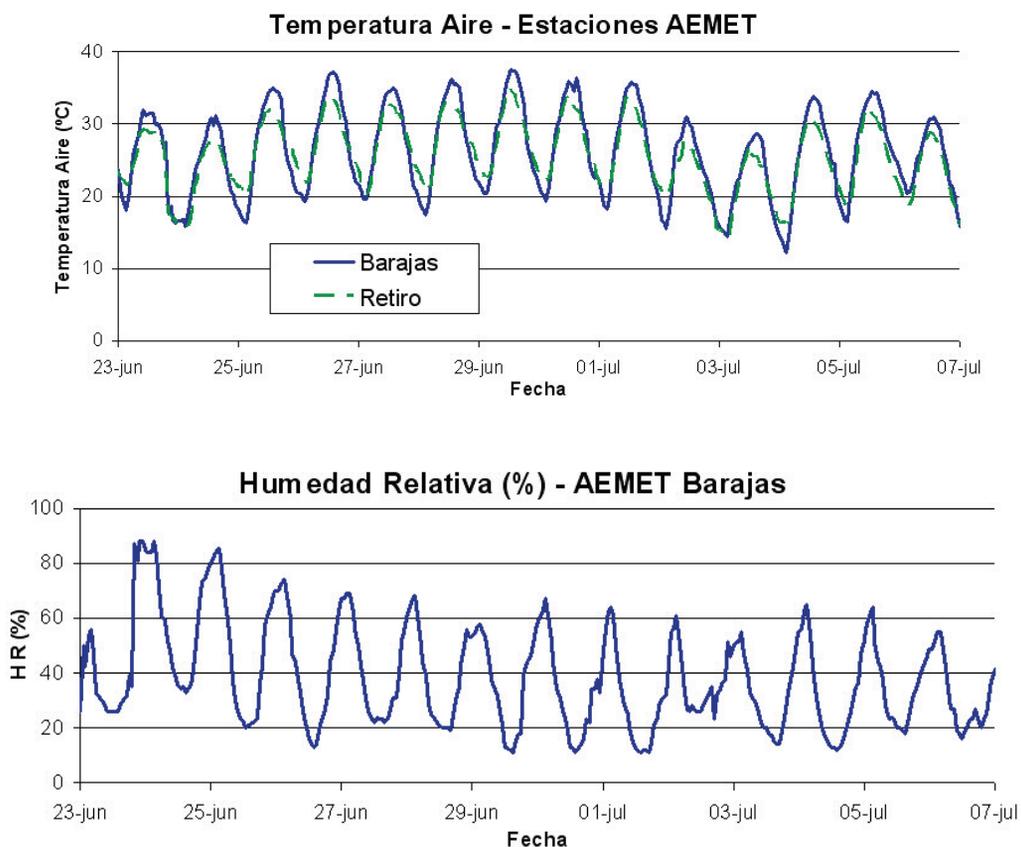


Figura 13. Evolución de la temperatura del aire en zona urbana y rural. Los círculos muestran la diferencia del mínimo diario entre ambas.

Evolución del efecto de Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS) con imágenes AHS

La serie de imágenes generadas de temperatura de superficie nos permiten estudiar la evolución de la isla de calor urbana superficial (ICUS) (Voogt *et al.* 2003), a lo largo de la campaña. Este fenómeno, viene definido según la ecuación 2:

$$ICUS = TST_{Urbana} - TST_{Rural} \tag{2}$$

donde TST_{Urbana} es la media de la TST del area considerada como urbana en las imágenes AHS. TST_{Rural} es la media de la TST de la imagen del AHS, cuando se excluye la zona urbana anterior.

La figura 14 muestra la evolución del fenómeno ICUS durante los días de vuelo del sensor AHS. Los datos de temperatura de superficie corresponden a la pasada Este-Oeste del sensor AHS. El fenómeno es importante durante la noche y antes de la salida del Sol, en cambio, durante el día, el fenómeno se invierte, teniendo temperaturas más elevadas fuera que dentro de la ciudad. Los resultados muestran que el fenómeno de ICU fue creciendo hasta la madrugada del 2 de julio, cuando se alcanzó una ICUS de 5 K.

Mapa de Clasificación

Además de las imágenes de emisividad y temperatura, se han obtenido otros productos con los datos AHS. La figura 15 muestra un mapa de clasificación supervisada usando el método de Máxima Probabilidad. Las clases de entrenamiento utilizadas se han definido a partir de las medidas in-situ y de la inspección visual de las imágenes. Se han elegido un total de 12 clases (más las sombras). La clasificación se ha llevado a cabo utilizando los valores de radiancia a nivel de sensor medida en las 80 bandas espectrales del sensor AHS, durante el vuelo de mediodía del día 4 de julio.

Para validar los resultados se han utilizado unos 200 píxeles independientes repartidos entre las diferentes clases, obteniendo unos valores del coeficiente kappa (κ) de alrededor del 70% (Para el vuelo Este-Oeste $\kappa=67\%$, para el vuelo Norte-Sur $\kappa=73\%$).

La tabla 2 nos muestra el porcentaje de cada clase incluido en los dos vuelos. Se puede observar que las clases más abundantes son “otras carreteras y pavimentos” y “tejados con tejas”. Las clases minoritarias son “tejados metálicos” y “agua”. El porcentaje de vegetación (clases “árboles” y “hierba verde”) está alrededor del 14% para el vuelo este-oeste y del 12% para el vuelo norte-sur. En el primer caso, la mayoría de la vegetación pertenece a “árbo-

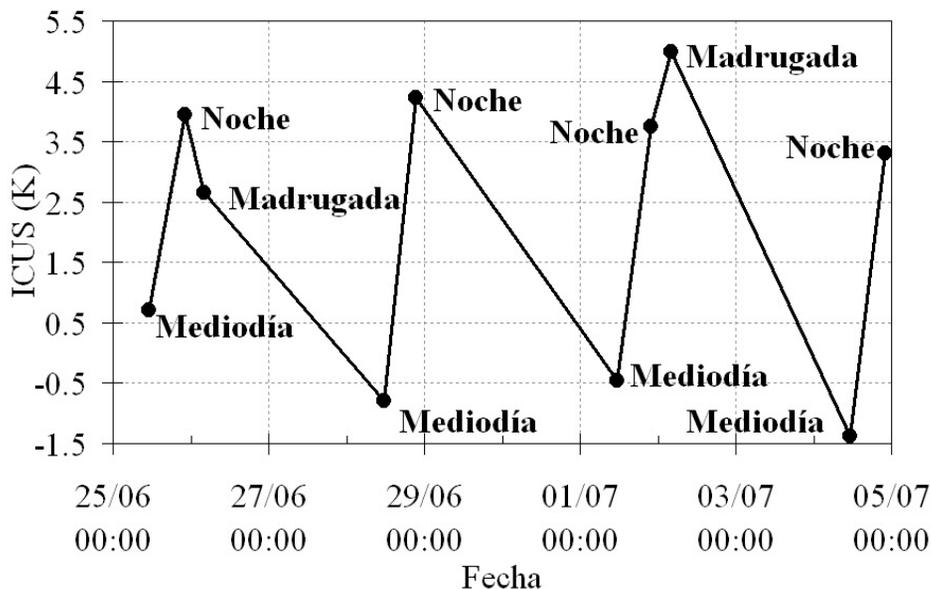


Figura 14. Fenómeno ICUS obtenido a partir de las imágenes Este-Oeste de TST del AHS

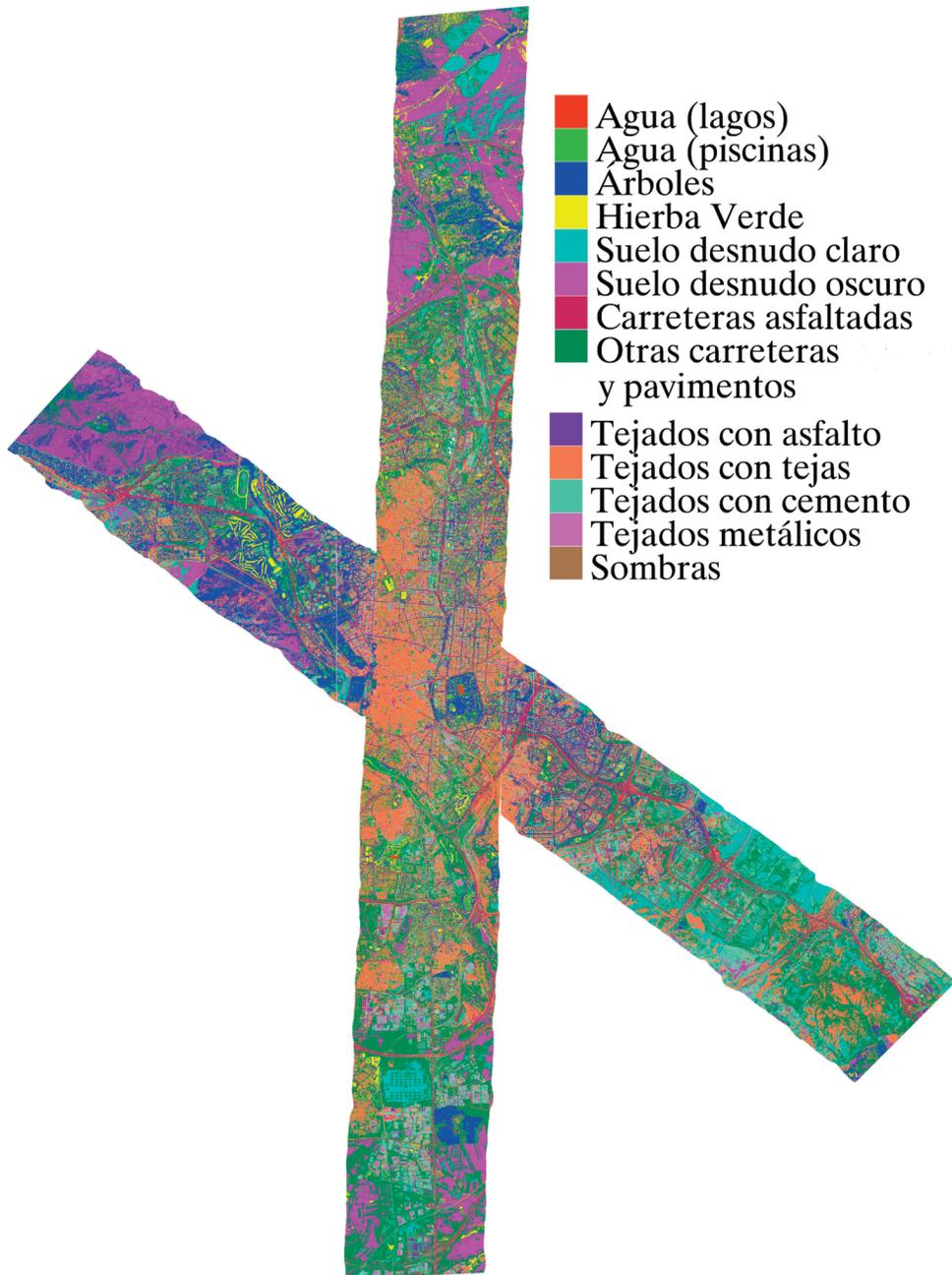


Figura 15. Mapa de clasificación con datos AHS sobre la ciudad de Madrid. Composición del vuelo este-oeste y del vuelo norte-sur.

les”, mientras que en el vuelo norte-sur, la proporción se distribuye equitativamente entre las dos clases. Para los dos vuelos, las clases de agua y vegetación, que minimizan el efecto de ICU, conforman un total de alrededor del 15% del total, mientras que el resto de zonas urbanas constituyen más del 80% de la escena. A la hora de analizar estos

porcentajes, hay que tener en cuenta que estos dos vuelos no cubren la totalidad de la zona urbana de la ciudad de Madrid, pero sí cubren áreas representativas de las diferentes estructuras urbanas.

Las imágenes de clasificación permiten obtener estadísticas para cada clase, proporcionando información adicional acerca del fenómeno ICUS.

Clase	% (Vuelo Este-Oeste)	% (Vuelo Norte-Sur)
Agua (lagos)	0.03	0.04
Agua (piscinas)	0.9	4.1
Árboles	12.8	6.8
Hierba verde	1.2	5.5
Suelo desnudo claro	6.1	3.0
Suelo desnudo oscuro	8.4	13.0
Carreteras asfaltadas	9.6	7.1
Otras carreteras y pavimentos	26.1	30.6
Tejados con asfalto	2.5	2.2
Tejados con tejas	20.1	18.7
Tejados con cemento	12.2	7.5
Tejados metálicos	0.04	1.3
Sombras	0	0.15

Tabla 2. Porcentaje de cada clase incluido en el vuelo del AHS este-oeste y en el vuelo norte-sur

CONCLUSIONES

La campaña experimental DESIREX 2008 se ha realizado en la ciudad de Madrid para caracterizar el efecto de ICU. Los parámetros atmosféricos y las medidas a nivel de superficie muestran una estabilidad en las condiciones atmosféricas y una acumulación del efecto ICU de hasta 4 K. Se han obtenido mapas de temperatura de la superficie mediante el sensor aerotransportado AHS que permiten observar la evolución de este fenómeno a nivel de superficie durante la campaña, el llamado efecto ICUS, que se presenta negativo para las imágenes diurnas y positivo para las nocturnas, alcanza su valor máximo de 5 K el día 2 de julio de madrugada. A partir de las imágenes del sensor AHS se ha obtenido un mapa de clasificación donde se han llegado a diferenciar 12 clases distintas de superficies. En la actualidad la Unidad de Cambio Global está planificando nuevas campañas con el fin de analizar el efecto ICU en ciudades como Atenas (Grecia) y San Miguel de Tucumán (Argentina).

REFERENCIAS

GILLESPIE, A., ROKUGAWA, S., MATSUNAGA, T., COTHERN, J. S., HOOK, S. y KAHLE, A. B., 1998. A temperature and emissivity

separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113-1126.

SOBRINO, J.A y RAISSOUNI, N. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring. Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 353- 366.

SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., ZARCO-TEJADA, P. J., SEPULCRE-CANTÓ, G. y DE MIGUEL, E. 2006. Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 102, 99-115.

SOBRINO, J. A., BIANCHI, R., PAGANINI, M. *et al.*, 2009. Final Report of the Dual-use European Security IR Experiment 2008 (DESIREX 2008). Contract: 21717/08/I-LG.

VOOGT, J. A. y OKE, T. R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370 – 384.