

SEGUIMIENTO DEL BALANCE DE ENERGÍA EN SUPERFICIE A TRAVÉS DE LA FUTURA MISIÓN HYSPIRI

Juan M. SÁNCHEZ TOMÁS¹, Vicente CASELLES MIRALLES², Vicente GARCÍA SANTOS², Andrew N. FRENCH³, Raquel NICLÒS CORTS², Carolina DOÑA²

¹*Depto. de Física Aplicada. Universidad de Castilla-La Mancha, Plz. Manuel Meca s/n, 13400 Almadén, Ciudad Real.*

²*Depto. Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia*

³*Arid Land Agricultural Research Center, USDA-ARS, 21881 North Cardon Lane, 85238 Maricopa, Arizona*

juanmanuel.sanchez@uclm.es, vicente.caselles@uv.es, vicente.garcia-santos@uv.es,
andrew.french@ars.usda.gov, raquel.niclos@uv.es, carolina.dona@uv.es

RESUMEN

La estimación operativa y a escala global del balance de energía en superficie requiere de datos de temperatura desde satélite con alta frecuencia y resolución espacial. Sus 8 bandas en el térmico, los 60 m de tamaño de píxel y los 5 días de revisita, convierten a la misión HypsIRI en el futuro de la teledetección térmica multiespectral. En este trabajo se han simulado productos HypsIRI de flujos energéticos a partir de vuelos MASTER, de muy alta resolución espacial, sobre las reservas experimentales de Jornada y Sevilleta, situadas en el suroeste de EEUU. Para ello se ha utilizado un modelo de balance de energía de dos fuentes, combinado con datos meteorológicos registrados en la zona. Los resultados muestran la estabilidad del modelo aplicado a las imágenes simuladas HypsIRI, y permiten hacer un análisis del efecto de la pérdida de resolución espacial sobre la variabilidad de los flujos energéticos en zonas áridas.

Palabras clave: HypsIRI, MASTER, evapotranspiración, temperatura, emisividad, multiespectral.

ABSTRACT

Frequent and high resolution remote sensing temperature data are needed for global scale, operational estimation of the surface energy balance. Its 8 thermal bands, 60-m pixel size and 5-day revisit time make the HypsIRI mission the future of the multispectral thermal remote sensing. In this work HypsIRI products of surface energy fluxes were simulated from very high spatial resolution MASTER flights, over the Jornada and Sevilleta experimental ranges, southwest USA. A two-source energy balance model, together with meteorological data, were used in this work. Results show the stability of the model when applied to simulated HypsIRI

images, and allow performing an analysis of the effect of the spatial resolution degradation on the surface variability in arid areas in terms of energy fluxes.

Keywords: HypsIRI, MASTER, evapotranspiration, temperature, emissivity, multispectral.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la última década se ha trabajado intensamente en la estimación de la evapotranspiración de la superficie (LE) mediante técnicas de teledetección. Son numerosos los trabajos y publicaciones en los que se van desarrollando y actualizando modelos, al tiempo que implementando nuevas técnicas, en búsqueda de una mayor precisión y operatividad en la estimación de este parámetro clave, tanto en el balance de agua como en el balance energético de la superficie terrestre.

Los llamados modelos de balance de energía plantean la estimación de LE como un término residual de la propia ecuación de balance de energía. La estimación operativa y a escala global de este balance de energía en superficie requiere de datos de satélite frecuentes, de alta resolución espacial y que cubran las franjas del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico, dentro del espectro electromagnético. A principios de 2013, los únicos sensores en órbita que satisfacían estas necesidades, y que por tanto permitirían realizar una estimación de los flujos energéticos y de evapotranspiración en zonas de cierta heterogeneidad, como por ejemplo zonas agrícolas, eran el Landsat 7- Enhanced Thematic Mapper (L7/ETM+) y el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Afortunadamente, desde el mes de mayo de 2013 se cuenta también con el nuevo sensor Landsat Data Continuity Mission (LDCM) (tabla 1).

Uno de los parámetros clave para la estimación de LE a través de los modelos de balance de energía, es la temperatura de la superficie (LST). Esta temperatura presenta una gran variabilidad tanto espacial como temporal, y por tanto, un tiempo de revisita de 16 días puede no ser suficiente para ciertas aplicaciones. Además, el tamaño de muchas parcelas de cultivo en zonas agrícolas, donde cuantificar la evapotranspiración es esencial para la gestión de los recursos hídricos, y especialmente en zonas áridas, suele estar por debajo de los 100 m de lado, lo que dificulta su distinción con los sensores actuales. Estas limitaciones condujeron a la idea de diseñar un nuevo sensor que satisficiera las necesidades anteriores.

De esta manera surgió la misión *Hyperespectral Infrared Imager* (HypsIRI) que fue recomendada por el *U.S. National Research Council* en su informe de 2007. En líneas generales, el objetivo de la misión HypsIRI es observar los ecosistemas de todo el planeta y proporcionar información crítica sobre desastres naturales como volcanes, incendios, y sequías. Además, permitirá registrar y estudiar los cambios en la superficie gracias a su capacidad para identificar tipos de vegetación, e incluso su estado de salud.

Para conseguir estos objetivos la misión HypsIRI se compone de dos instrumentos a bordo de un satélite polar: un espectrómetro cuyo intervalo comprende desde el visible hasta el infrarrojo cercano (VSWIR: 380 - 2500 nm), en 224 bandas contiguas de 10 nm de anchura, y un sensor multiespectral (8 bandas) de 3 a 12 μm en el infrarrojo medio y térmico (TIR). Ambos instrumentos poseen una resolución espacial de 60 m en nadir, el FOV es de 25,5°, y el tiempo de revisita varía de los 19 días del VSWIR hasta los 5 días del TIR (Ramsey et al. 2012). Además, se incluye un módulo inteligente que permitirá procesar una serie de datos a bordo del propio satélite y enviarlos a tierra casi en tiempo real.

Más allá de las posibilidades que plantea el sensor hiperespectral VSWIR, en este trabajo

pretendemos resaltar la trascendencia que tendrá el sensor TIR, ya que sus 8 bandas convierten a HyspIRI, hoy en día, en la única posibilidad de dar continuidad a la serie histórica de medidas de temperatura y emisividad de superficie del sensor multiespectral ASTER, mejorando incluso su resolución espectral, espacial y temporal. La tabla 1 muestra una comparación de las principales características del sensor TIR de HyspIRI con el resto de sensores térmicos de alta resolución actualmente en órbita (ASTER, L7/ETM+ y L8/LDCM). En este trabajo se han utilizado vuelos de alta resolución del sensor aerotransportado MODIS/ASTER Airborne Simulator (MASTER) para simular imágenes HyspIRI de flujos energéticos en superficie. El objetivo es mostrar la estabilidad de los modelos aplicados a HyspIRI, así como el potencial de su alta resolución espacial y temporal para resolver la variabilidad en términos de los distintos flujos energéticos en superficie. El estudio se ha centrado en una zona experimental árida del suroeste de EEUU en la que existen registros históricos de parámetros biofísicos y de variables meteorológicas.

Con este trabajo nos sumamos a los esfuerzos de la comunidad científica involucrada en la misión por mostrar las posibilidades y capacidades, y demostrar la necesidad de puesta en órbita, de HyspIRI.

Sensor TIR	L7/ETM+	L8/LDCM	ASTER	HyspIRI
Fecha de lanzamiento	15/04/1999	11/02/2013	18/12/1999	>2020
Resolución espacial (m)	60	100	90	60
Revisita (días)	16	16	16	5
Nº Bandas	1	2	5	8
FOV (km)	185	185	60	600

Tabla 1. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES TÉRMICOS DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL ACTUALMENTE EN ÓRBITA.

2. ZONA DE ESTUDIO Y MEDIDAS

Este trabajo se centra en dos reservas ecológicas (Jornada y Sevilleta) en la zona norte del desierto de Chihuahua, dentro del estado de Nuevo México, USA, destinadas a la investigación de los cambios en la superficie y en la dinámica de los ecosistemas. La reserva experimental Jornada (Fig. 1) se encuentra a 25 km al noreste de Las Cruces (32.5 N, -106.8 W, 1200 m altitud), y la reserva experimental Sevilleta se localiza a unos 80 km al sur de Albuquerque (34.3 N, -106.6 W, 1600 m altitud). Ambas son zonas muy áridas, caracterizadas por temperaturas altas, pluviometría escasa, y un alto grado de evaporación. La vegetación predominante son los mezquites (*Prosopis sp*), arbustos y hierbas dispersas (French et al. 2008).

Las reservas de Jornada y Sevilleta han sido sobrevoladas repetidas veces (73) por MASTER desde 1999. Las imágenes MASTER (Hook et al. 2001) poseen 50 bandas espectrales, de 0,4 a 13 μm , entre las que se puede encontrar correspondencia con bandas HyspIRI, y un tamaño de píxel que varía entre 3 y 25 m, en función de la altura del vuelo. Las fechas, lugares y

datos de todos los vuelos están disponibles en el sitio <http://master.jpl.nasa.gov> Para este trabajo se han utilizado 6 de esos vuelos.

Los perfiles atmosféricos de la zona necesarios para la corrección atmosférica de las escenas se obtuvieron de dos fuentes: los radiosondeos de Santa Teresa y Albuquerque (NOAA/ESRL; www.esrl.noaa.gov/raobs) y el reanálisis a 32 km del centro de reanálisis regional para Norteamérica (NARR) (Mesinger et al. 2006).

Finalmente, los datos de las variables meteorológicas necesarias, temperatura del aire, velocidad de viento, y radiación de onda corta y onda larga, se tomaron de la densa red de estaciones meteorológicas distribuidas por la zona.

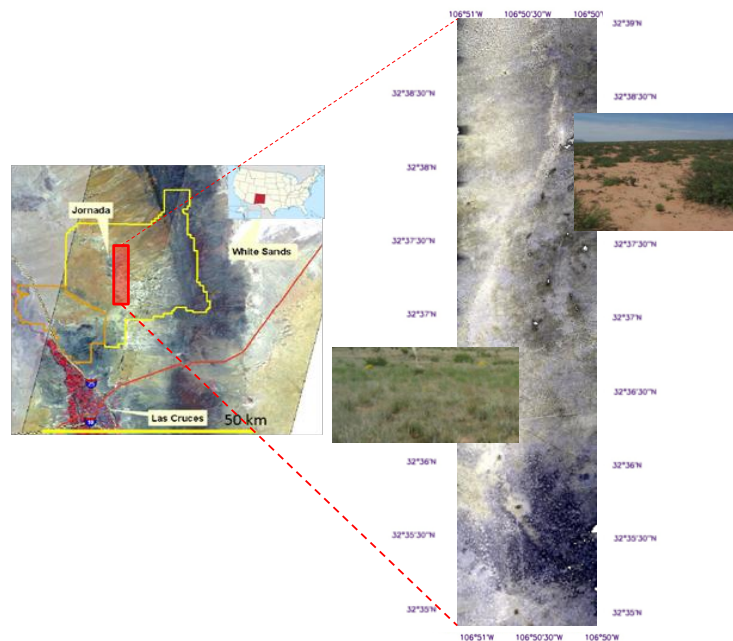


Fig. 1: Localización de la reserva experimental Jornada, y composición en falso color de un vuelo MASTER del día 20/5/2004 (11:36 GMT).

3. METODOLOGÍA

En este trabajo se ha seguido el modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes (STSEB), propuesto por Sánchez et al. (2008 a y b), para obtener mapas de radiación neta (R_n), flujo de calor en el suelo (G), flujo de calor sensible (H) y evapotranspiración (LE) (figura 3).

Con el fin de analizar el efecto del degradado de la resolución espacial del sensor HypsIRI sobre los flujos energéticos estimados en la zona de estudio, los resultados se han obtenido a dos resoluciones espaciales diferentes. En primer lugar, a tamaño de píxel original 3-12 m de MASTER (según altura vuelo) y, posteriormente, también a 60 m (resolución HypsIRI) tras haber degradado a esta resolución los valores de radiancia TOA (*top of atmosphere*). El procesado de las imágenes MASTER podría resumirse en los siguientes pasos:

- 1- Empleando el código de transferencia radiativa 6S (Kotchenova et al. 2006), se realizó la conversión de valores de reflectividad a radiancia TOA en las bandas del VNIR.
- 2- Para la corrección atmosférica de las bandas del TIR se utilizó el modelo de transferencia radiativa MODTRAN (Berk et al. 2006).

- 3- Dado el ancho campo de visión de los vuelos MASTER (FOV=85°) hubo que incluir una parametrización angular de los factores de corrección atmosférica. Esta parametrización se obtuvo previamente a partir de simulaciones con MODTRAN.
- 4- Se georreferenciaron todas las imágenes y se promediaron las radiancias TOA a 60 m de resolución.
- 5- Se vuelven a propagar los datos hacia la superficie y se obtienen de esta forma valores de reflectividad y radiancia en superficie simulados a escala HypsIRI (60 m).

Tras este procesado inicial de los vuelos MASTER se aplicó el modelo de Liang (2000) diseñado para ASTER, adaptado a las bandas MASTER, para calcular el albedo (α) de la superficie necesario para el balance de radiación neta. La estimación de la proporción de vegetación se realizó de acuerdo con el modelo descrito en Valor y Caselles (1996). Hay que recordar que HypsIRI contará con las 224 bandas de su sensor VSWIR, lo que permitirá una estimación precisa de parámetros biofísicos y también del albedo de la superficie.

En cuanto al cálculo de las emisividades de canal (ϵ_i) y temperatura de la superficie (LST) con HypsIRI, se están investigando distintos modelos y combinaciones de bandas que permitan la estimación más precisa (Ramsey et al., 2012). Para este trabajo, se aplicó un algoritmo de separación temperatura/emisividad (NEM) a las 5 bandas de MASTER coincidentes con las de ASTER. Finalmente, se aplicó el modelo de Ogawa (2002) diseñado para ASTER, adaptado a las bandas MASTER, para el cálculo de la emisividad en banda ancha (ϵ), también necesaria para el balance de radiación neta.

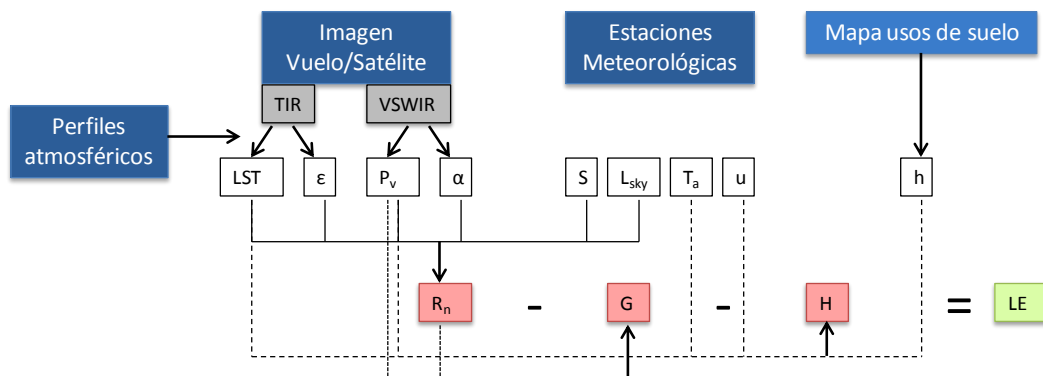


Fig. 2: Esquema del modelo simplificado de dos fuentes STSEB.

Combinando la información de las imágenes con los datos meteorológicos (S : radiación solar, L_{sky} : radiación onda larga, T_a : temperatura del aire, u : velocidad del viento) obtenidos de la red de estaciones propias situadas en las reservas experimentales de Jornada y Sevilleta, y asumiendo una altura de vegetación (h) estándar de unos 0,5 m de altura, se aplicó el STSEB, siguiendo el esquema de la figura 2. Todos los detalles del modelo y de las distintas ecuaciones puede consultarse en Sánchez et al. (2008 a y b).

La validación regional de los productos de flujos energéticos y evapotranspiración obtenidos mediante satélite resulta siempre una tarea complicada por las dificultades asociadas a la falta de representatividad de las medidas locales puntuales realizadas. Con el fin de poder llevar a cabo una validación regional de los productos HypsIRI (60 m) generados en este trabajo, se re-escalaron hasta alcanzar esta resolución espacial los productos MASTER obtenidos a las resoluciones originales (3-12 m), y se tomaron como “patrón” de comparación. Hay que

aclarar que este re-escalado de los productos finales MASTER es diferente al degradado de las radiancias MASTER originales, a partir de las cuales se han obtenido los productos simulados HypsIRI.

4. RESULTADOS

Una vez realizado el pre-procesado de las imágenes MASTER, se aplicaron uno por uno los diferentes pasos descritos en la sección anterior a todas las imágenes disponibles. La figura 3 muestra, a modo de ejemplo, los productos simulados HypsIRI de los cuatro términos de la ecuación de balance de energía en superficie (R_n , G, H y LE), para el vuelo sobre Jornada del día 20/5/2004 (11:36 GMT). Se presentan conjuntamente los flujos a escala original MASTER (3 m) y las simulaciones HypsIRI (60 m). A simple vista se aprecia un evidente suavizado de los contrastes de colores, si bien se mantienen los patrones generales dentro de cada imagen. Entre todos los flujos, es precisamente la evapotranspiración la que presenta una mayor variación dentro de la imagen, con valores que oscilan entre 0 y 200 W m^{-2} , para las zonas de suelo totalmente desnudo y aquellas con proporciones de vegetación próximas al 50%, respectivamente. En cualquier caso son valores muy bajos, en sintonía con la aridez de la región, que a escala diaria no superan los 60 W m^{-2} (el equivalente a unos 2 mm/día).

Tal y como se ha descrito en la sección anterior, llevando a cabo una degradación progresiva de los productos MASTER a escala original se puede realizar un análisis del efecto de la pérdida de resolución espacial en las imágenes de satélite. A 60 m de resolución todavía se pueden distinguir las distintas clases de cubierta del suelo en Jornada. En regiones agrícolas en las que el patrón de tamaño de los cultivos sea del orden de 1 ha o superior, el papel de HypsIRI podría resultar esencial para resolver la variabilidad de la superficie en términos de flujos energéticos y evapotranspiración, gracias a su mayor resolución espacial frente a otros sensores como ASTER o el LDCM.

El promediado de los valores de los distintos flujos para toda la escena pone de manifiesto la estabilidad de toda la cadena de procesado aplicada a las imágenes simuladas HypsIRI, ya que los resultados son prácticamente coincidentes con los obtenidos al degradar los productos originales MASTER a la misma resolución espacial de 60 m. Los buenos resultados de esta validación regional de los productos HypsIRI se aprecian en la tabla 2 con los valores promedio de las desviaciones sistemáticas y los errores de estimación para las 6 escenas procesadas. En resumen, los errores de los promediados espaciales de los flujos instantáneos cuando se trabaja a una escala de 60 m se sitúan por debajo de los 20 W/m^2 . Además, en la práctica totalidad de los casos se obtiene una desviación mayor que el propio valor del promedio.

	Bias (W m^{-2})	RMSE (W m^{-2})
R_n	3±6	6±3
G	7±10	8±9
H	1±19	14±12
LE	-6±23	15±18

Tabla 2. VALORES PROMEDIO DE LAS DESVIACIONES SISTEMÁTICAS (BIAS) Y LOS ERRORES DE ESTIMACIÓN (RMSE) DE LAS COMPARACIONES ENTRE LAS 6 IMÁGENES SIMULADAS HYSPIRI Y SUS CORRESPONDIENTES DEGRADADAS MASTER A 60 M.

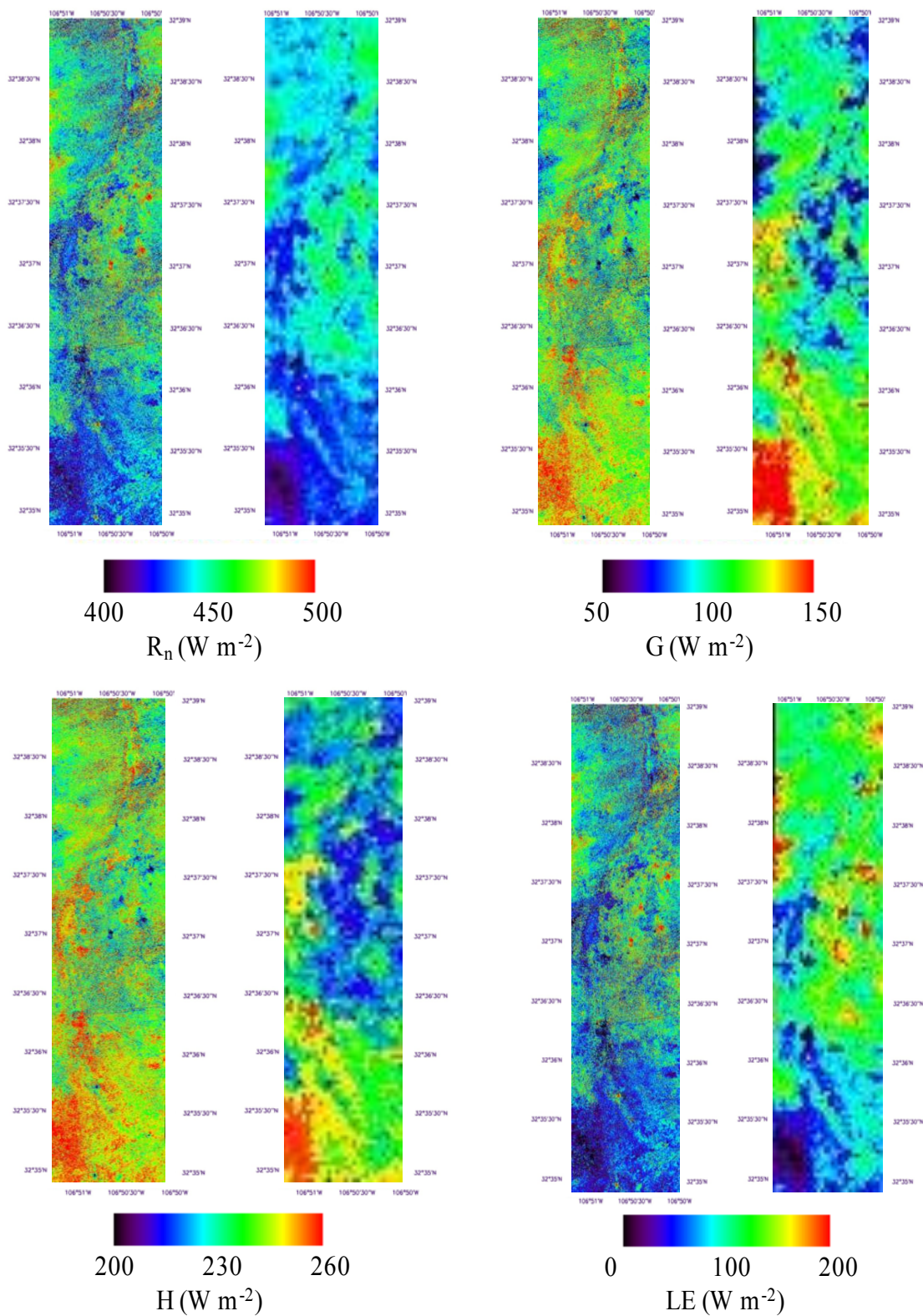


Fig.3: Mapas de flujos energéticos sobre Jornada para el día 20/5/2004 (11:36 GMT). Vuelo MASTER con píxeles de 3 m (izquierda); simulación HypSPIRI con píxeles de 60 m (derecha).

5. CONCLUSIONES

HyspIRI es en estos momentos la única misión en fase de estudio que contempla poner en órbita un sensor multiespectral en el TIR. Está, por tanto, llamada a ser la sucesora de ASTER en este sentido, reduciendo incluso la resolución espacial a 60 m y el tiempo de revisita a tan solo 5 días. Los modelos de estimación de flujos energéticos en superficie se verían altamente beneficiados de estas mejoras.

En este trabajo se han simulado mapas de flujos energéticos para HyspIRI, a partir de imágenes de 6 vuelos del sensor aerotransportando MASTER, y empleando un modelo de balance de energía de dos fuentes. Aunque los detalles de la distribución de vegetación dispersa, característica de la zona seleccionada, se pierden para resoluciones por encima de 10 m, a escala de 60 m se continúa distinguiendo bastante variabilidad en términos de flujos energéticos, asociada a cambios en la proporción de vegetación o en la temperatura de la superficie, entre otros. Por otro lado, se comprueba la estabilidad del modelo de balance de energía de dos fuentes aplicado a escala HyspIRI, al reproducir resultados de los distintos flujos energéticos, muy similares a los obtenidos degradando los productos MASTER a su misma resolución espacial.

Así pues, entre las muchas y diversas aplicaciones de HyspIRI hay que contar con la posibilidad de obtener mapas de evapotranspiración real cada 5 días, lo que permitiría reducir significativamente los tiempos de respuesta ante la detección de situaciones de estrés hídrico, y también una mejor gestión de los riegos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento por la financiación recibida a NASA (10-HYSPIRI 0-13), al Ministerio de Economía y Competitividad (CGL2010-17577/CLI) y a la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2009/086).

7. REFERENCIAS

- Berk, A. et al. (2006). MODTRAN5: 2006 Update. Proc. SPIE, Vol. 6233, 62331F.
- French, A.N., Schmugge, T.J., Ritchie, J.C., Hsu, A., Jacob, F. y Ogawa, K. (2008). "Detecting land cover change at the Jornada Experimental Range, New Mexico with ASTER emissivities". *Remote Sensing of Environment*, 112, 1730-1748.
- Hook, S.J., Myers, J.J., Thome, K.J., Fitsegald, M. y Kahle, A.B. (2001). "The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) - a new instrument for earth science studies". *Remote Sensing of Environment*, 76 (2), 93-102.
- Kotchenova, S.Y., Vermote, E.F., Matarrese, R. y Klemm, F.J. (2006). "Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance". *Applied Optics*, 45(26), 6762-6774.
- Liang, S. (2000). "Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithm". *Remote Sensing of Environment*, 76, 213-238.

Mesinger, F. et al. (2006). “North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*”, 87, 343-360.

Ogawa, K., Schmugge, T., Jacob, F., y French, A. (2002). “Estimation of broadband land surface emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing”. *Agronomie*, 22, 19-20.

Ramsey, M.S., Realmuto, V.J., Hulley, G.C., y Hook, S.J. (2012). HypsIRI Thermal Infrared (TIR) band study report. JPL, 12-16.

Sánchez, J.M., Kustas, W.P., Caselles, V., y Anderson, M.C. (2008a). “Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observation”. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1130-1143.

Sánchez, J.M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V.A. y Telesca, V. (2008b). “Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region”. *Journal of Hydrology*, 351, 58-70.

Valor, E., y Caselles, E. (1996). “Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas”. *Remote Sensing of Environment*, 57, 167-184.