

Identificación y cartografía de surgencias costeras en el acuífero kárstico de El Maestrazgo (Castellón) mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico

C. Antón-Pacheco⁽¹⁾, B.J. Ballesteros⁽²⁾, M. Mejías⁽³⁾, E. de Miguel⁽⁴⁾, J.C. Gumiel⁽¹⁾, J. A. Gómez⁽⁴⁾ y P. Callejo⁽⁴⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. La Calera 1. 28760. Tres Cantos. 28760 Madrid.
c.pacheco@igme.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Cirilo Amorós, 42. 46004 Valencia.

(3) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

(4) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. de Ajalvir, k.4. 28850. Torrejón de Ardoz. Madrid.

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos del tratamiento e interpretación de los datos registrados mediante una campaña de vuelos con el sensor AHS. El objetivo ha sido la medida de la temperatura superficial del agua del mar mediante imágenes térmicas con el fin de identificar y cartografiar las descargas de aguas subterráneas (DAS) en el sector costero situado entre Peñíscola y Benicasim (Castellón), procedentes del acuífero Jurásico de El Maestrazgo. La ejecución de los vuelos se ha realizado mediante convenio de colaboración entre el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en el marco del proyecto HIPROMA (Investigación sobre el Comportamiento Hidrogeológico de Formaciones Acuíferas Profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 El Maestrazgo) que pretende mejorar el conocimiento hidrogeológico de los acuíferos profundos mediante la aplicación de diferentes técnicas multidisciplinares: geológicas, hidrogeológicas, geofísicas y de teledetección. El acuífero regional jurásico de El Maestrazgo (Castellón, España) constituye un sistema kárstico litoral con una amplia extensión, del orden de 2.400 km², caracterizado por un gradiente hidráulico extremadamente bajo (0,1-0,2%), lo que hace que, debido a la rápida elevación topográfica continental, el nivel piezométrico se localice a gran profundidad en zonas alejadas del mar. Cabe destacar la casi total ausencia de descargas naturales en las áreas interiores, produciéndose éstas principalmente hacia el Mediterráneo. Por este motivo, una de las principales incertidumbres existentes, y de los objetivos planteados en el estudio, ha sido conocer si las salidas al mar del acuífero son de carácter difuso o, por el contrario, se verifican en puntos concretos de la línea de costa y de forma localizada a través de surgencias no visibles. Para proceder a evaluar de forma más precisa el balance hídrico del sistema era necesario confirmar, en primer lugar, el mecanismo mediante el cual tiene lugar la transferencia de recursos hacia el Mediterráneo, y en su caso, localizar y cartografiar las surgencias litorales como paso previo para la determinación del volumen total drenado por el sistema al mar. La metodología utilizada se basa en el registro de imágenes en la región del infrarrojo térmico del espectro electromagnético con objeto de identificar las anomalías térmicas relacionadas con las descargas de agua subterránea (DAS). Se han realizado dos campañas de vuelo (una diurna y otra nocturna) durante la época estival, cuando se dan las condiciones de máximo contraste térmico entre las aguas de las surgencias y las aguas litorales. En ambos vuelos se han registrado tres pasadas de 40 km a diferentes alturas y resoluciones (3,5 m y 7 m). Los datos de temperatura registrados in situ con una cámara térmica Thermacam de forma simultáneamente a los vuelos, se han utilizado para validar las imágenes una vez calibradas de los efectos atmosféricos. La interpretación de las imágenes ha permitido identificar una serie de anomalías térmicas que corresponden a surgencias de agua dulce.

Palabras clave: acuíferos kársticos, descarga submarina agua subterránea, imágenes infrarrojo térmico, Maestrazgo

Identification and mapping of submarine groundwater discharges from the karstic aquifer of El Maestrazgo (Castellón) by means of airborne thermal infrared images

ABSTRACT

This study describes the results achieved by the use of thermal infrared (IRT) images acquired by a hyperspectral scanner system (AHS) along the Peñíscola and Benicassin localities (Castellón) in the Mediterranean coast of Spain to map fresh water discharges from the Jurassic Maestrazgo aquifer. The study has been carried out in the framework of a multidisciplinary project HIPROMA (Investigación sobre el Comportamiento Hidrogeológico de Formaciones Acuíferas Profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 El Maestrazgo), which the Instituto Geológico y Minero de España (IGME) is conducting to improve the insight of the Maestrazgo aquifer hydrogeological behavior. The Maestrazgo aquifer (Castellón, Spain) is a karstic coastal system which extends 2.400 km². Low hydraulic gradient (0,1-0,2%)

and rapid increase of topography towards inland condition the location of the saturated zone at a considerable depth. Groundwater discharge is scarce inland and in the coastal area is mainly restricted to coastal springs. The location and mapping of coastal springs as well as the discharge volume will help to more precisely evaluate the hydric balance. The applied methodology is based on the registration of high-radiometric resolution TIR images to map sea surface temperature (SST) to identify the thermal expression of groundwater plumes. The aerial survey was conducted using the Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) AHS system, which registers 750 pixel-wide swath images throughout the visible up to long-wave infrared spectrum. Day and night data collection was performed in the summer season to take into account the warmest and the coolest time of the solar radiation cycle. Three 40 km long passes were acquired: two overlapping passes at low altitude with 3.5 m spatial resolution and one high altitude pass with 7 m resolution. Temperature measurements at ground sites and sea surface were taken with a Thermacam infrared camera in order to validate the AHS data. Calibrated images have allowed mapping several fresh water plumes.

Key words: karstic aquifers, Maestrazgo aquifer, submarine groundwater discharge, thermal infrared images

Introducción

Una de las aplicaciones de la teledetección es la utilización de imágenes registradas en el infrarrojo térmico para determinar las diferencias de temperatura en las superficies de los cuerpos de agua, ya sean oceánicas, costeras o continentales. Este método se ha utilizado con éxito para identificar y cartografiar plumas

térmicas procedentes de vertidos y descargas de agua subterránea en áreas costeras (Scarpace *et al.*, 1975; Schott, J. R. 1979; Dalle Luca *et al.*, 2005). La temperatura superficial del mar (SST) se ha estudiado a partir de imágenes de satélite, con NOAA-AVHRR, TERRA-MODIS y ERS/ENVISAT-AATSR (McClain *et al.*; 1985; Reynolds *et al.*; 1994; Zavody *et al.*, 1995), que presentan resoluciones temporales y

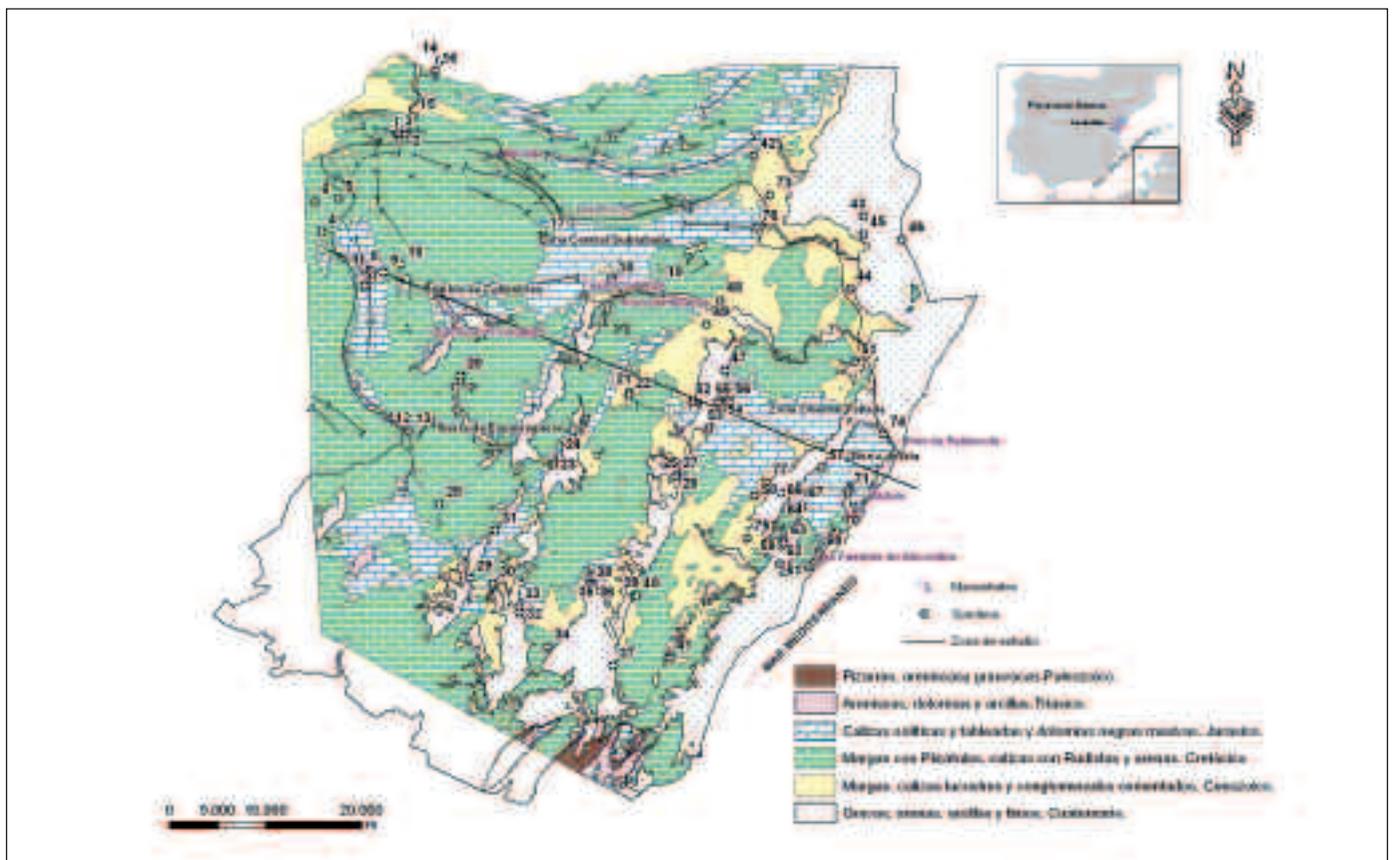


Figura 1: Localización del área de estudio en el marco geológico y morfoestructural de El Maestrazgo (Canerot, 1974) e inventario de manantiales y puntos acuíferos
 Figure 1: Geological and morfoestructural framework of the study area (Canerot, 1974) with location of springs and hydrogeological boreholes

espaciales apropiadas para el estudio y seguimiento de fenómenos de dimensiones globales. Sin embargo, las resoluciones espaciales de estas imágenes no permiten detectar pequeños fenómenos locales, como las descargas de agua subterránea al mar o los vertidos de aguas procedentes de usos agrícolas e industriales. Las imágenes de la serie Landsat TM y ETM+, con una única banda en el infrarrojo térmico (IRT), y resoluciones de 120 m y 60 m respectivamente, y las imágenes ASTER, con cinco bandas en el IRT y una resolución de 90 m, se han utilizado para estudiar diferencias de temperatura en aguas marinas y continentales en relación con diversos fenómenos (Ikeda y Emery, 1984; Steissberg *et al.*, 2005). La utilización de sensores aeroportados en avión es más efectiva para la detección de anomalías de dimensiones menores, siendo, además, posible programar los vuelos tanto de día como de noche y en las fechas más adecuadas para la identificación de estos fenómenos.

El Laboratorio de Teledetección del INTA, en el marco de diversos proyectos de investigación con el IGME, ha realizado vuelos multispectrales con diversos objetivos, cuyos resultados han puesto en evidencia el interés de la utilización de estas técnicas (Alonso *et al.*, 2001; Antón-Pacheco *et al.*, 2006). El INTA tiene experiencia en la realización de vuelos térmicos para la detección de surgencias de agua dulce al mar (Fernández *et al.*, 2000), y ha adquirido recientemente un sensor hiperespectral aerotransportado AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) que registra en 80 bandas dentro de las ventanas atmosféricas, desde el visible al infrarrojo térmico (IRT). Esta región del espectro es idónea para detectar diferencias de temperatura entre las salidas de agua dulce y el agua del mar, por lo que su aplicación en la localización de las descargas de agua subterránea al mar del acuífero regional jurásico de El Maestrazgo supone una aplicación óptima de esta técnica para la resolución de las incertidumbres identificadas.

Marco geológico

La zona de estudio se sitúa en el sector oriental de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, en su zona de transición hacia las Cadenas Costeras Catalanas y corresponde, de manera aproximada, a las zonas Central Subtabular y Oriental Fallada definidas por Canerot (1974). Los materiales aflorantes abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico, con predominio de litologías carbonatadas y, en menor medida, detríticas.

Los afloramientos de las formaciones jurásicas se

localizan en el sector oeste de la zona de estudio (Anticlinal de Bovalar), en el norte (Macizo del Turmell) y en la cadena montañosa litoral (Sierra de Irta), en este caso por efecto de una estructura anti-forme de dirección perpendicular a la línea de costa (fig.1). Los mayores espesores de la serie mesozoica se encuentran en el sector norte y este, mientras que son menores en el sur como consecuencia de la presencia de un umbral o alto estructural. Los materiales del acuífero regional son carbonatados y se depositaron en el Lías-Dogger, fundamentalmente entre el Kimmeridgiense y el Valanginiense, en la denominada cuenca del Maestrazgo. Estas formaciones, en algunos lugares y en conjunto, llegan a alcanzar potencias superiores a los 1.500 m. En general, la sedimentación mesozoica está relacionada con una tectónica distensiva de bloques limitados por fallas lítricas, de dirección NO-SE, y reactivación de fracturas del basamento paleozoico que condicionan una disposición en grabens y semigrabens.

La evolución del margen este de la cuenca Ibérica ha estado condicionada por la influencia de dos ciclos de rifting (Martín-Chivelet *et al.*, 2002; Mas and Salas, 2002; Bádenas *et al.*, 2004). El primero tuvo lugar entre finales del Pérmico y el Triásico, mientras que el segundo comenzó a final del Oxfordiense, manteniéndose hasta el Albiense medio. En la cuenca Ibérica, este segundo ciclo de rifting originó la progresiva destrucción de la plataforma del Jurásico superior y el desarrollo de un nuevo sistema de cuencas extensionales muy subsidentes que se superpusieron de forma discordante sobre el anterior rift Ibérico triásico. En síntesis, la secuencia Kimmeridgiense superior-Berriasiense tiene carácter regresivo y el intervalo Berriasiense-Hauteriviense continúa con carácter regresivo aunque interrumpido por un pulso transgresivo menor durante el Valanginiense.

Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero regional del Maestrazgo

Definición geométrica del acuífero y aspectos litológicos.

El acuífero Jurásico de El Maestrazgo es el de mayor importancia de la Unidad Hidrogeológica 08.07, El Maestrazgo, en la que se encuentra integrado, ocupando, además, parte de otras unidades colindantes. La zona de estudio tiene una extensión de unos 2.400 km², de los que aproximadamente el 30% son afloramientos permeables directamente relacionados con el acuífero (fig. 1). El resto pertenece a formaciones

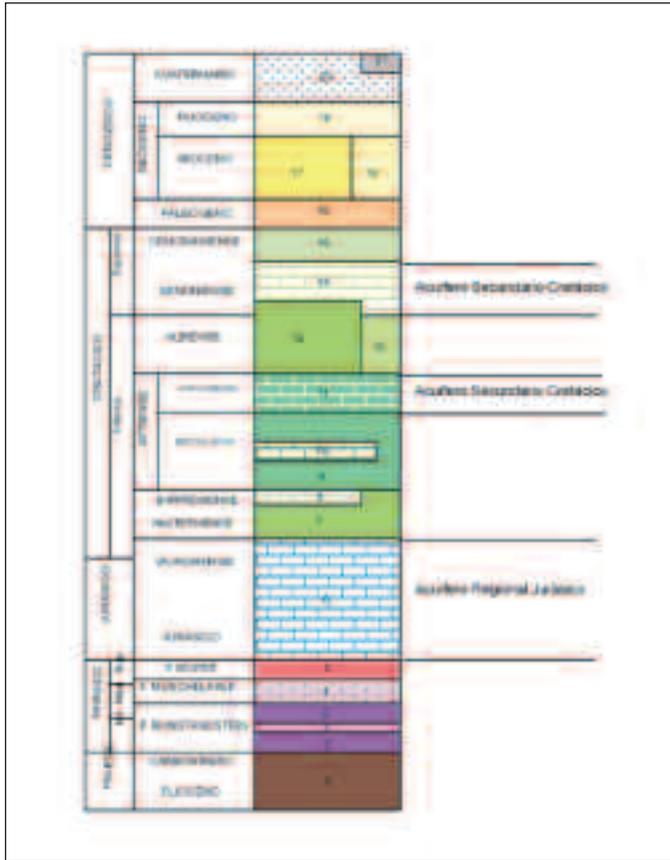


Figura 2. Cronoestratigrafía de los acuíferos de El Maestrazgo
 Figure 2. Chronostratigraphy of the Maestrazgo aquifers

impermeables o a estructuras acuíferas superpuestas con funcionamiento hidrogeológico independiente y superficies piezométricas topográficamente más elevadas (fig. 2).

En esencia, se diferencian tres conjuntos litológicos permeables: las calizas del Cenomaniense-Senoniense, las series calizas del Aptiense y los materiales carbonatados (calizas y dolomías) del Jurásico superior-Cretácico inferior que conforman el acuífero regional y se encuentran desconectados hidráulicamente de los anteriores. Este último conjunto, con una potencia media del orden de 1.100 a 1.500 m, presenta una alta permeabilidad por fisuración y karstificación, siendo los tramos de dolomías del Kimmeridgiense superior-Portlandiense y los de calizas y dolomías del Lías-Dogger los que cuentan con mejores características hidrodinámicas. La base impermeable del acuífero la conforman las arcillas y margas con yesos de la facies Keuper del Triás, loca-

lizadas en la mayor parte del acuífero a profundidades muy elevadas, aunque llegan a aflorar en la Sierra Espaneguera (Mejías *et al.* 2006). Además de los conjuntos permeables diferenciados, se pueden distinguir también una serie de acuíferos de menor entidad y de naturaleza detrítica o carbonatada, caracterizados por ocupar una extensión restringida y por albergar niveles elevados y colgados sobre la superficie piezométrica regional.

Funcionamiento hidrogeológico. Características hidrodinámicas.

La gran extensión del acuífero, y los relativamente pocos sondeos que logran captar las formaciones permeables saturadas, implica que no sea fácil determinar sus características hidrodinámicas, ya que hasta hace escasos años la casi totalidad de las captaciones se localizaban en la zona más próxima al litoral, donde las condiciones de los materiales acuíferos son muy buenas, con transmisividades entre los 1.000 y 4.000 $m^2 d^{-1}$ (ITGE, 1989), caudales medios de explotación entre 50 y 100 $L s^{-1}$ y caudales específicos entre los 5 y los 10 $L s^{-1} m^{-1}$. La modelación matemática llevada a cabo en algunos estudios (COPUT, 1990 y 1992) eleva dichas transmisividades hasta los 9.000 y 15.000 $m^2 d^{-1}$. Esta circunstancia se puede ajustar a lo observado, ya que en este sector (Sierra de Irta) el acuífero se encuentra sometido a un alto grado de karstificación, puesto en evidencia por las surgencias costeras de Las Fuentes de Alcocebre, Prat de Peñíscola y Badum, (fig. 1). Recientemente, en 2007, se han realizado varios ensayos de bombeo en sondeos de investigación que han arrojado valores de transmisividades para las formaciones jurásico-cretácicas del orden de 3.000 $m^2 d^{-1}$, con caudales específicos entre 5 y 60 $L s^{-1} m^{-1}$.

La superficie piezométrica asciende lentamente hacia el oeste desde la cota cero, en el litoral, hasta cerca de los 60 m s.n.m. en las proximidades de la alineación que forman las localidades de Tírig y Benlloch (fig. 3). Más hacia el oeste asciende de forma importante hasta alcanzar los 500-600 m s.n.m. en las áreas de Cincorres y Morella, lo que implica la existencia de una considerable zona no saturada en una gran parte del acuífero, donde la superficie piezométrica se encuentra a profundidades superiores a los 500 metros.

El análisis general de las campañas piezométricas llevadas a cabo por el IGME en el período 2004-2006, indica que el flujo subterráneo se ordena según dos grandes sectores separados entre sí por una zona de umbral de dirección NNE-SSW, en donde los niveles

se encuentran algo más elevados, que parte cerca de la localidad de Albocácer, Tírig, San Mateo y La Jana (fig. 3). Aunque su origen no ha podido establecerse todavía con precisión, este umbral no implica la existencia de desconexión hidráulica entre ambos sectores, ya que no se han identificado formaciones impermeables que la justifique (Mejías *et al.*, 2007). La presencia de tramos acuíferos con diferentes cargas hidráulicas, variables según la posición relativa de los niveles en la zona de umbral, o la existencia de una mayor permeabilidad a ambos lados del mismo, podrían explicar este fenómeno. En el sector de acuífero más próximo a la costa, coincidente con la estructura antiformal jurásica de dirección NO-SE perpendicular a las alineaciones montañosas de Valdancha Oriental y de Irta, la presencia de este umbral podría estar generada, por el contrario, por flujos de circulación preferencial a través de conductos kársticos instalados a favor del eje de dicha estructura, y que en última instancia serían los responsables de la surgencia costera del manantial de

Badum. (fig. 3). De esta forma, las líneas de flujo del sector nororiental y la mayor parte de la descarga procedente de la Sierra de Irta y de la zona de umbral convergerían hacia los manantiales del Prat de Peñíscola y Torre de Badum, respectivamente, así como de forma subterránea hacia el acuífero de la Plana de Vinaroz-Peñíscola. Por otro lado, el flujo subterráneo del área suroccidental (Villores-rambla de Celumbres hasta las proximidades de Cuevas de Vinromá), se orientaría hacia las surgencias de Alcocebre y hacia el acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca.

En coherencia con lo expuesto, y de forma resumida, se puede establecer que el drenaje principal del acuífero se verifica de oeste a este hacia el mar, a través de la mencionada Sierra de Irta, y en menor medida por alimentación lateral a los acuíferos detríticos instalados en las planas costeras de Vinaroz-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca. Estos últimos recursos podrían ser finalmente transferidos de forma difusa al mar a través de las formaciones

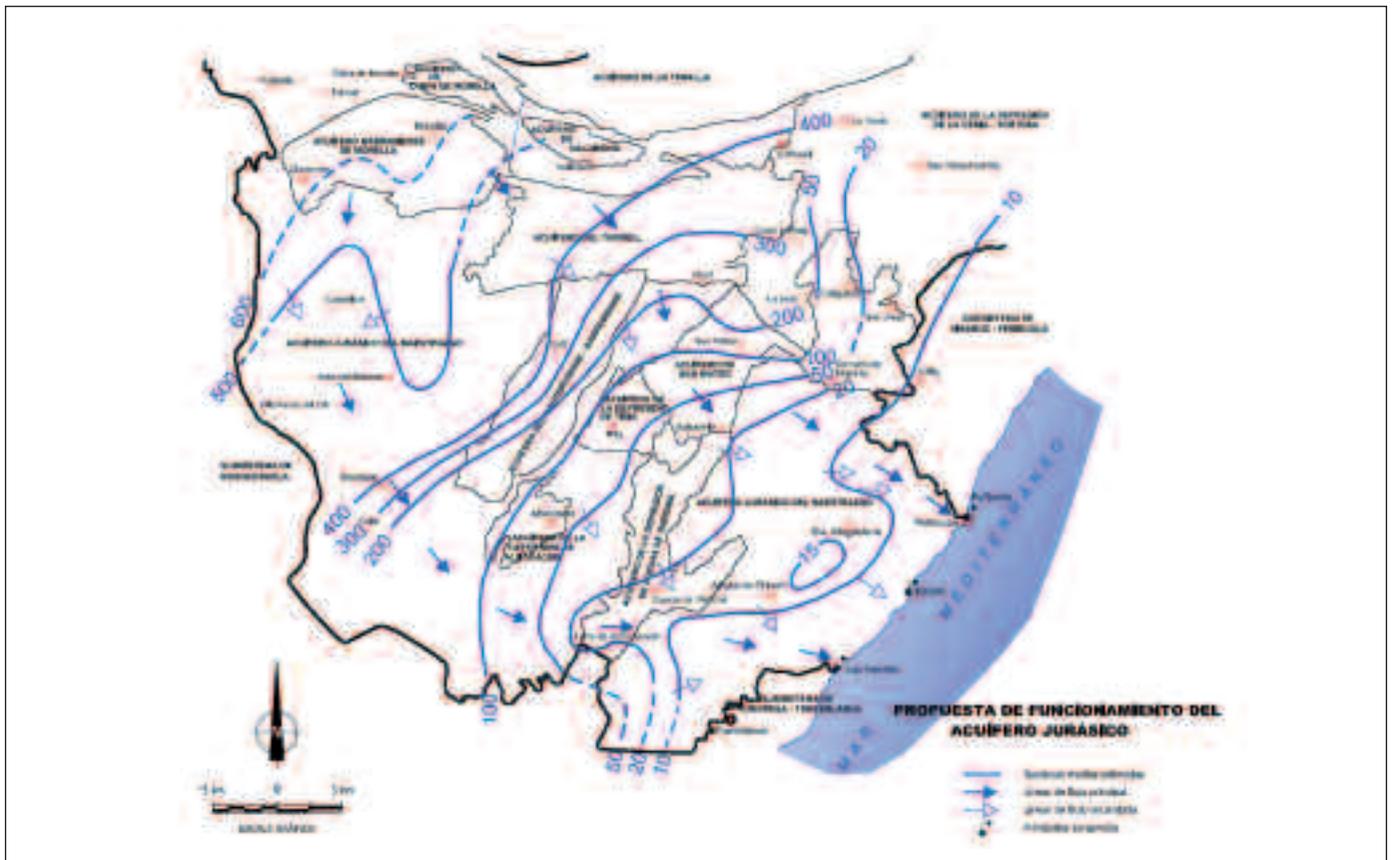


Figura 3. Esquema conceptual de flujo del acuífero Jurásico profundo de El Maestrazgo
 Figure 3. Conceptual flow model diagram of the deep-seated El Maestrazgo Jurassic aquifer

mesozoicas infrayacentes a dichas planas costeras (Mejías *et al.*, 2006).

Balance hídrico y origen de los recursos

Los recursos del acuífero Jurásico de El Maestrazgo se generan principalmente por la infiltración directa del agua de lluvia caída sobre los afloramientos permeables pertenecientes al Jurásico y al tránsito Jurásico-Cretácico, al que hay que sumar la escorrentía generada sobre las formaciones impermeables que se infiltra posteriormente en el subsuelo al circular sobre materiales permeables localizados aguas abajo. Debido a la particularidad de su estructura geológica, otro de los conceptos a considerar es la reinfiltración de aguas procedentes del drenaje de los acuíferos colgados superiores o de tramos permeables de disposición subtabular con altos coeficientes de infiltración (barras calizas del Gargasiense, Bedouliense y, especialmente, Barremiense superior), pero incapaces de almacenar agua. Este hecho debe potenciar un cierto efecto de retardo en la respuesta del acuífero a las precipitaciones, con lo que el sistema adquiere una mayor componente inercial. También puede contribuir a este fenómeno la existencia de epikarst o acuíferos colgados dentro de la propia serie Jurásico-Cretácica, posiblemente propiciados por los horizontes margosos del Portandiense-Valanginiense, como parece ser el caso del manantial Font del Molinar (fig.1) (Antón-Pacheco *et al.*, 2005).

Durante cierto tiempo fue asumido como válido, en una primera aproximación y como punto de partida, el balance hídrico referido en el estudio del ITGE

(1989). Según éste, la alimentación del acuífero tiene lugar por infiltración del agua de lluvia sobre los afloramientos permeables, con un volumen medio 81 hm³a⁻¹; por alimentación vertical y lateral de la unidad colindante del sistema de Mosqueruela (fig. 3), estimada en 60 hm³a⁻¹; por alimentación vertical procedente de acuíferos suprayacentes de menor entidad y con niveles piezométricos de mayor cota, unos 12 hm³a⁻¹, y por aportes laterales procedentes del sector acuífero del Turmell, evaluados en unos 10 hm³a⁻¹. El total de todos estos conceptos permitiría cuantificar la recarga del acuífero en unos 163 hm³a⁻¹. Por su parte, la descarga, estimada en el mismo volumen que el asignado a la alimentación, se establece en el mencionado estudio de la siguiente forma: 80 hm³a⁻¹ serían drenados al mar a través de los manantiales de la Sierra de Irta (Prat de Peñíscola, Las Fuentes de Alcocebre y Badum) y 65 hm³a⁻¹ serían aportados a las Planas de Vinaroz-Peñíscola y Oropesa-Torreblanca. Finalmente, unos 18 hm³a⁻¹ serían extraídos por bombeos dispersos en sectores cercanos a las planas litorales.

No obstante, estudios posteriores basados en la reinterpretación del modelo geológico y en sondeos de investigación (Serrano *et al.*, 1995), así como en una modelación matemática del sector costero del acuífero, consideraron que la descarga es de 64 hm³a⁻¹, de los que 9 hm³a⁻¹ descargarían por el sector costero de las Fuentes de Alcocebre. Hay, por tanto, una importante disparidad entre las diversas estimaciones existentes sobre los caudales y volúmenes drenados por dichas surgencias, que van desde los 1 a 2 m³s⁻¹ (IGME-IRYDA, 1977; IGME, 1988), ambas equivalentes a una media de 47 hm³a⁻¹, para una descar-

Fuente	Descargas		Descargas
	Surgencia Las Fuentes		Sierra de Irta
	m ³ /s	hm ³ /a	hm ³ /a
IGME-IRYDIA 1997	1-2	31-62	175
IGME 1988	1,5	47	145
Serrano et al. 1995	0,3	9	64
ITGE 1989	0,68	21	80

Tabla 1. Volúmenes de agua drenados al mar desde la Sierra de Irta y desde la surgencia de Las Fuentes
 Table 1. Water volume drained to the sea from the Sierra de Irta and Las Fuentes spring

ga total del acuífero al mar a lo largo de todo el frente costero de $175 \text{ hm}^3 \text{ a}^{-1}$, hasta los mencionados $9 \text{ hm}^3 \text{ a}^{-1}$ (Serrano *et al.*, 1995) que implicarían caudales medios de $0,25$ a $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Por último, en ITGE (1989) se deducen valores de drenaje intermedios cifrados entre 21 a $22 \text{ hm}^3 \text{ a}^{-1}$ ($0,68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), en este caso para una descarga total a través de la Sierra de Irta de $80 \text{ hm}^3 \text{ a}^{-1}$ (tabla 1).

Esta divergencia en los datos y conclusiones referentes al balance hídrico del sistema no hace sino reflejar las dificultades existentes para la determinación de la recarga natural del mismo y, especialmente, de sus salidas, dada la complejidad para realizar mediciones directas del agua drenada por las surgencias a lo largo de la costa.

Con el objetivo de mejorar las estimaciones de algunos términos del balance hídrico, durante los años 2005-2007, se ha realizado por parte del IGME, en el marco del mencionado proyecto HIPROMA, varios estudios basados en diferentes métodos. Así, se ha llevado a cabo un estudio hidrometeorológico para el cálculo de la lluvia útil, utilizando el método de Thornthwaite, obteniéndose un valor medio anual de la recarga del sistema de $373 \text{ hm}^3 \text{ a}^{-1}$. También se

ha calculado la recarga natural mediante la aplicación de métodos numéricos soportados en un sistema de información geográfica, en concreto mediante el método APLIS (Andreo *et al.*, 2004), obteniéndose un valor de $420 \text{ hm}^3 \text{ a}^{-1}$.

Este relativamente amplio rango de valores en la cuantificación de la infiltración ha llevado a buscar métodos que permitan evaluar las salidas de este sistema hidrogeológico a lo largo de la línea costera, con objeto de intentar lograr de forma indirecta una aproximación al valor real de la recarga. Para estimar dicho término ha sido preciso, en primer lugar, la identificación de los puntos donde se producen las descargas de aguas subterráneas (DAS) al mar y, a continuación, la cartografía de dichas descargas mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico, obteniendo así unos datos objetivos de partida para su evaluación posterior.

Características del sensor AHS

El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) ha adquirido recientemente un sensor de tipo hiperespectral aeroportado. Se trata de un espectrómetro de imagen AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) de tipo opto-electrónico de barrido mecánico (whiskbroom) con 80 bandas (fig. 4), desarrollado por la compañía Imaging Group ArgonST. Las características técnicas del sensor se definen por su resolución espacial, radiométrica, espectral y temporal, así como por el tipo de geometría de adquisición (<http://www.argonst.com/>) (Rejas *et al.*, 2004; Fernández-Renau *et al.*, 2005). El diseño óptico está compuesto por un espejo giratorio cuya rotación produce el barrido de la superficie observada en dirección perpendicular a la trayectoria del avión. Cada giro del espejo adquiere una línea de imagen del terreno, de manera que el avance del avión a una velocidad acoplada a la del espejo del sensor, permite la adquisición de la imagen mediante líneas consecutivas en la dirección del vuelo.

La energía reflejada y/o emitida por la superficie del suelo que se registra en el espejo, se fracciona mediante un sistema de filtros dicróicos en diferentes longitudes de onda en las ventanas atmosféricas del visible al infrarrojo térmico, en 5 espectrómetros o "puertos" individuales (Tabla 2). Estos espectrómetros constan de distintos detectores: una matriz lineal de fotodiodos de silicio para el puerto 1, de InGaAs en el puerto 2A, de InSb en los puertos 2 y 3, y MCT en el puerto 4, estos últimos refrigerados con nitrógeno líquido a 77°K . Las diferentes bandas del sensor se forman separando la energía mediante rejillas de

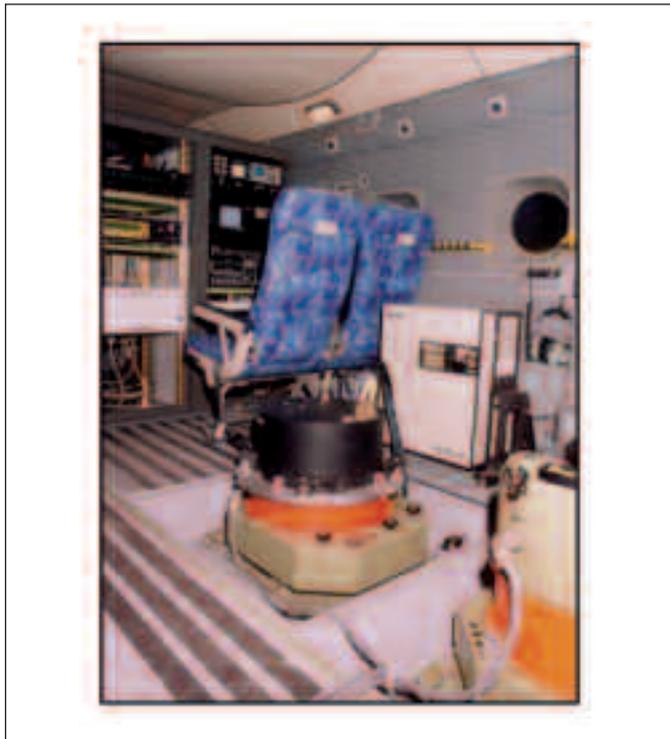


Figura 4. El sistema AHS instalado en un avión CASA 212-200 del INTA

Figure 4. The AHS scanner in the CASA 212-200 INTA aircraft

difracción según su longitud de onda. Cada banda tiene una curva de responsividad espectral, que típicamente es de forma gaussiana, y se caracteriza por su centro espectral de máxima respuesta y un ancho de banda o Full Width Half Maximun (FWHM). Tanto el número de bandas como su FWHM condicionan la resolución espectral del sensor y el muestreo de la signatura espectral.

La señal analógica de salida es amplificada por un sistema electrónico y digitalizada en 12 bits. Las fuentes de referencia interna son dos cuerpos negros cuya temperatura es seleccionable, y son observados y registrados en cada línea de imagen, proporcionando un valor de "radiancia cero" en los canales reflectivos (1, 2 y 2A) y niveles de referencia para la calibración de los canales "emisivos" de los puertos 3 y 4. La geometría del sensor esta determinada por el FOV (Field of View) y el IFOV (Instantaneous Field of View) que, junto a la velocidad de barrido, determinan la cobertura y resoluciones espaciales a las que puede registrar los datos. El IFOV del sensor y la altura de la plataforma determinan la resolución espacial del píxel. La gama de velocidades de barrido del AHS es 6,25; 8,3; 12,5; 16,7; 25; 40 Hz, que para un FOV de 90° y un IFOV de 2,5 mrad permiten obtener resoluciones de 2,5 m a 13,7 m. El ángulo de barrido, medido en grados, determina la franja del terreno que se observa y el ancho de la imagen registrada.

Normalmente los sensores aeroportados barren con ángulos de 90° a 120°, mientras los satélites debido a su mayor altura, necesitan ángulos menores, del orden de 10° a 20°, para cubrir regiones mucho mas extensas. Debido a que la distancia del sensor al terreno aumenta hacia los bordes de la línea de barrido, la resolución espacial y las distorsiones geométricas de la imagen se incrementan también en estas áreas. La anchura de la línea varía con la altura de vuelo al variar el campo de visión. Cada línea se

registra en 750 pixeles. Los canales en el infrarrojo térmico entre 8 a 14 μm pueden llegar a detectar gradientes horizontales de temperatura de hasta 0,10 °C, en función de la diferencia de temperatura de ruido equivalente o NETDs (Noise Equivalent Temperature Difference), que depende de la frecuencia de rotación del espejo y del IFOV seleccionados (SenSytech, 2002).

Campañas de vuelos

Las características de estos sensores requieren una meticulosa planificación de los parámetros de vuelo para obtener unos resultados satisfactorios en función de los objetivos planteados. En la planificación de la campaña se han tenido en cuenta las siguientes variables: altura de vuelo, campo de visión instantáneo (IFOV), velocidad de la plataforma, velocidad de barrido del espejo y temperatura máxima y mínima de los cuerpos negros internos de calibración.

Para la realización de los vuelos se ha seleccionado una banda en dirección NNE, determinada por la orientación general de la línea de costa, que cubre el sector litoral situado entre las localidades de Benicasim y Peñíscola (Castellón) (fig. 5). Se han efectuado dos campañas de vuelos con objeto de registrar dos momentos térmicamente diferentes durante la época estival, cuando se dan las condiciones de máximo contraste térmico entre las aguas de las surgencias y las aguas litorales, ya que la temperatura de la superficie del mar en verano es superior a la temperatura del agua subterránea que permanece prácticamente constante a lo largo del año. Se han consultado a través de SAIDIN (Satellite Image Database Interface, CNIMA-CSIC, <http://www.cnima.csic.es/>) los datos de temperatura de la superficie del mar (SST) calculados a partir de datos AVHRR/NOAA del Mediterráneo occidental.

La campaña diurna se realizó el día 21 de junio de 2006, entre las 12:45 UTC y las 14:00 UTC (14:45 y 16:00 hora local), y la campaña nocturna ese mismo día, entre las 20:45 UTC y 22:50 UTC (22:45 y 00:50 hora local). En cada campaña se registraron tres pasadas de aproximadamente 40 km de longitud: dos pasadas a altura media (1.370 m; 4.500 ft) con una anchura de 2,6 km, y una pasada alta (2.740 m; 9.000 ft) con una anchura de 5,2 km., y resoluciones espaciales de 3,5 m y 7 m respectivamente.

Todas las pasadas de vuelo fueron registradas en la misma dirección N40° con el fin de mantener unas condiciones similares respecto a la iluminación solar y a la dirección del viento. Las condiciones meteorológicas en las horas locales de los vuelos resultaron

	Puerto 1 VIS / NIR	Puerto 2A SWIR	Puerto 3 SWIR	Puerto 4 MIR	Puerto 5 TIR
Rango espectral (micrómetros)	0,43 - 1,03	1,25 - 1,75	1,99 - 2,54	3,00 - 5,41	7,35 - 13,17
Ancho espectral (Pixel/cm)	28	100	18	30-40	400-500
Nº de bandas	25	1	42	7	10

Tabla 2. Configuración espectral del sensor AHS
Table 2. AHS spectral configuration

favorables, con cielo despejado, sin viento y mar en calma. Se adquirieron simultáneamente datos auxiliares para calibración de las imágenes.

Tratamiento de los datos AHS

El INTA ha suministrado la información registrada por el sensor AHS en unos ficheros de imagen en formato ENVI de nivel L1a, que contienen los datos originales sin proceso geométrico ni radiométrico, así como los quicklooks (fig. 6) y gráficos con el histograma de las imágenes. También se han incluido los datos estadísticos (ficheros *_stats.csv) para evaluar la calidad de las imágenes. Incluyen las medidas de la relación señal ruido (SNR), calculada como el cociente entre la radiancia media de la imagen y la desviación típica de la señal registrada sobre los cuerpos negros de referencia en vuelo. En general, los datos presentan una

calidad aceptable, excepto varios canales del infrarrojo de onda corta (SWIR), entre 2,0-2,5 μm , (AHS47, AHS53, AHS55 y AHS61), que presentan una relación señal/ruido < 5 . Al tratarse de datos del infrarrojo reflectivo, no ha tenido incidencia en el tratamiento de la información térmica. La pasada P02MD muestra asimismo unos pequeños saltos en el nivel de ganancia en los canales del visible por debajo de 0,6 μm y líneas anómalas en algunos canales térmicos.

Proceso radiométrico

Obtención de radiancias en el sensor

En este proceso se han considerado por una parte las imágenes correspondientes a la región reflectiva registradas en el VIS/NIR/SWIR (puertos 1 y 2) y las imágenes correspondientes a la región del infrarrojo



Figura 5. Esquema de los vuelos (21/06/2006). Centro de las pasadas bajas P1 y P2 en rojo. Centro de la pasada alta P3 en azul
Figure 5. Flight paths location (21/06/2006). P1 and P2 low path lines in red and P3 high path line in blue

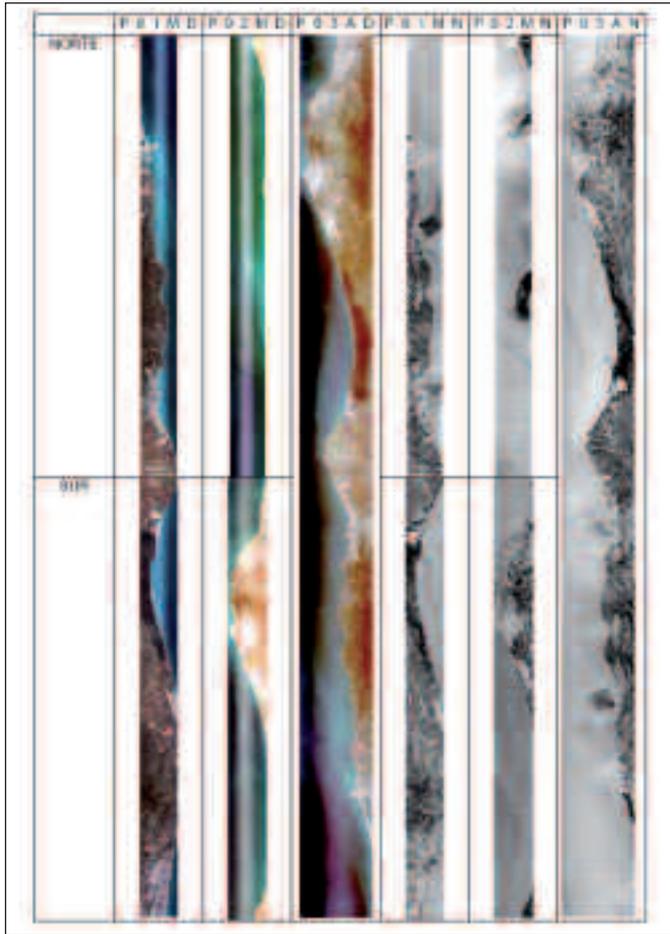


Figura 6. Quicklooks de las pasadas de la campaña diurna (PO1MD, PO2MD, PO3AD) y de la campaña nocturna (PO1MN, PO2MN, PO3AN)

Figure 6. Quicklooks corresponding to the diurnal flight (PO1MD, PO2MD, PO3AD) and to the nocturnal flight (PO1MN, PO2MN, PO3AN)

térmico TIR (puertos 3 y 4). En ambos casos, el nivel digital en cada banda ha sido convertido a radiancia en el sensor. El proceso radiométrico utilizado ha sido diferente en cada caso, utilizándose coeficientes de calibración de laboratorio para las bandas reflectivas, e información de los dos cuerpos negros de referencia térmica y de las curvas de responsividad espectral del instrumento en las bandas térmicas. Las temperaturas máximas y mínimas de los cuerpos negros de referencia se definieron a 30°C y 15°C respectivamente para el vuelo nocturno, y a 45° C y 15° C para el diurno. La resolución térmica de los vuelos diurno y nocturno se expresa en las tablas 3 y 4.

Obtención de reflectividad y temperatura

Los valores de radiancia en el sensor se han convertido en valores de reflectividad lambertiana del terreno (puertos 1 y 2) y en temperatura (puerto 4) utilizando el modelo de corrección radiométrica ATCOR4. Los valores de reflectividad obtenidos se han validado comparando con firmas espectrales de superficies equivalentes, y los valores de temperatura se han contrastado con los datos tomados sobre el terreno, simultáneamente al vuelo, con el instrumento Thermacam del INTA. No se han calculado valores de emisividad, ya que el valor del agua del mar es constante (0.985).

Reducción del ruido en las bandas térmicas

El ruido en los canales térmicos es, en valor absoluto, bajo en todas las bandas térmicas excepto en AHS80

Canales AHS	25 rps (pasadas bajas)			12.5 rps (pasada alta)	
	λ (nm)	NEDT	Resolución	NEDT	Resolución
71	8132,3	0,19	0,02	0,18	0,02
72	8530,0	0,18	0,03	0,17	0,02
73	9127,3	0,19	0,02	0,18	0,02
74	9575,0	0,20	0,03	0,18	0,03
75	10051,8	0,21	0,01	0,19	0,01
76	10559,5	0,25	0,02	0,23	0,02
77	11161,5	0,46	0,02	0,46	0,02
78	11748,8	0,35	0,02	0,34	0,01
79	12343,5	0,47	0,02	0,45	0,02
80	12934,3	0,91	0,03	0,80	0,03

Tabla 3. NEDT y resolución de digitalización en °C de los vuelos diurnos
 Tabla 3. Diurnal flights NEDT and digitization resolution in °C

Canales AHS	25 rps (pasadas bajas)			12.5 rps (pasada alta)		
	λ (nm)	NEdT	Resolución	NEdT	Resolución	
71	8132,3	0,18	0,01	0,18	0,01	
72	8630,0	0,17	0,01	0,18	0,01	
73	9127,3	0,18	0,01	0,18	0,01	
74	9575,0	0,18	0,01	0,19	0,01	
75	10051,8	0,19	0,01	0,20	0,01	
76	10559,5	0,24	0,01	0,25	0,01	
77	11161,5	0,46	0,01	0,49	0,01	
78	11748,8	0,32	0,01	0,35	0,01	
79	12343,5	0,45	0,01	0,47	0,01	
80	12934,3	0,94	0,02	0,84	0,02	

Tabla 4. NEdT y resolución de digitalización en °C para los vuelos nocturnos
 Table 4. Night flights NEdT and digitization resolution in °C

y ocasionalmente AHS77. Sin embargo, la alta resolución radiométrica de las imágenes (0,02°C/ND) hace que el ruido ocupe un rango considerable de niveles digitales. Se ha intentado reducir el ruido procurando evitar pérdida de información espectral o espacial. La inspección visual muestra que existe una alta correlación espacial (dentro de cada línea y en grupos de líneas) y espectral (entre canales muy próximos). La parte no correlacionada se puede eliminar calculando la temperatura con ATCOR4 en cinco bandas diferentes, y promediando los resultados. En la tabla 5 aparece este procedimiento en detalle. La tabla 6 muestra la configuración utilizada en ATCOR4.

Proceso geométrico

Las imágenes se han georreferenciado utilizando un Modelo Digital del Terreno generado a partir de la altimetría digital de los mapas del IGN 1:25.000 y de los datos de navegación del avión (procesados con la aplicación POSPAC y PARGE), de forma automatizada sin ayuda de puntos de control. Se ha utilizado el sistema de referencia espacial UTM (huso 30) sobre ED50. El resultado de la georreferenciación es un fichero Image Geometry Map (IGM), que se utiliza como un parámetro de entrada en un algoritmo de referenciación en ENVI para generar directamente la imagen corregida geoméricamente. Utilizando los ficheros IGM correspondientes a cada pasada, se han generados las imágenes correspondientes al vuelo nocturno y al vuelo diurno. Así mismo, se han realizado mosaicos con las imágenes de temperatura nocturnas y diurnas de altitud media. El ajuste de la geo-

referenciación se ha evaluado superponiendo la cartografía vectorial 1:25.000 sobre las zonas costeras, obteniéndose un error del orden de 1 pixel.

Toma de datos en campo

Imágenes termográficas

Con objeto de validar las imágenes térmicas AHS registradas desde el avión, se realizó una campaña de campo, sincrónica a los vuelos, para adquirir imágenes con el sensor ThermaCAM SC2000, sistema portátil de obtención de termografías infrarrojas en la banda espectral de 7,5 a 13 micrómetros (Tabla 7).

Para la corrección de las imágenes respecto a la transmisividad atmosférica, se tomaron datos de temperatura y humedad relativa del aire en campo, con un equipo de mano, al comienzo de la adquisición de cada serie de imágenes infrarrojas. Estas imágenes han sido procesadas utilizando el software ThermaCAM Researcher, propio del sensor y rutinas programadas en Matlab para la realización de análisis estadísticos. Se han considerado los siguientes parámetros:

- Emisividad¹⁾: arena húmeda (0.95), arena ligeramente húmeda (0.93), arena seca (0.90), agua (0.985), adoquines (0.95), hormigón (0.94).
- Distancia sensor-superficie observada: variable según la superficie observada
- Temperatura atmosférica y humedad relativa:

⁽¹⁾ Valores de emisividad obtenidos de la librería digital MODIS UCSB Emissivity Library: (<http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>).

paso	input	herramienta	output
for i=72:76			
modificar sensor model	fichero de configuración ATCOR4: sensor_ahs_feb06.dat sensor_ahs_feb06_noc.dat	--	fichero modificado
ejecutar ATCOR4	imágenes AHS * L10120_PTAT (radiancia en el sensor) datos atmosféricos	ATCOR4, configurado inicialmente según los parámetros de la tabla 3, refinados según resultados parciales hasta llegar a una combinación altura vuelo - altura de atmósfera - wv que de un perfil razonable sobre vegetación y/o una temperatura correcta sobre los puntos de test.	imágenes de T cinética, una por canal * L00220_T7i.raw/hdr
calcular estadísticas en una zona para evaluar ruido	imágenes AHS * L00220_T7i.raw/hdr	ENVI>Basic tools>statistics	ficheros de texto con estadísticas: * L00220_T7*stats.txt
end			
promediar las imágenes	imágenes AHS * L00220_T7*.raw/hdr	ENVI>spectral math	imágenes AHS * L00220_PTTc.raw/hdr
calcular estadísticas en una zona para evaluar ruido	imágenes AHS * L00220_Tc.raw/hdr	ENVI>Basic tools>statistics	ficheros de texto con estadísticas: * L00220_Tcstats.txt
borrar las imágenes de temperatura por canal (* L00220_T7*.raw)			

Tabla 5. Procedimiento de obtención de temperatura de las imágenes
Table 5. Procedure used to obtain image temperature

Altura de vuelo (feet)	1370 / 2700
atmósfera para rango solar	h01000_wv20_mar1.atm /
atmósfera para rango térmico	h03000_wv20_mar1.atm
Adjacency range (feet)	h01000_wv20.tam / h03000_wv20.tam
Visibilidad (feet)	0.100 / 0.300
Factor de escala de reflectividad	area/25 ft, ajustata según imagen
Tamaño Pixel (m)	100.0
Offset T _s	3.4 / 6.8 m
ErrorAzad	4 (diurnos), 0 (nocturnos)
	0.98

Tabla 6. Parámetros utilizados en el modelo ATCOR4
Table 6. ATCOR 4 parameters used in the data calibration

previamente a la adquisición de las series de imágenes de cada superficie se tomaron datos de temperatura y humedad relativa del aire.

- Transmisividad atmosférica: el valor de transmisividad atmosférica aplicado se obtiene automáticamente del modelo incluido en el software *ThermaCAM Researcher 2001*, a partir de los datos introducidos de temperatura atmosférica, humedad relativa y distancia sensor-superficie.
- Temperatura ambiente (temperatura de reflexión): se utiliza para compensar la radiación proveniente de objetos cercanos que se refleja en el objeto o superficie del que se va a obtener su temperatura. El programa asume que el efecto de esta radiación es el mismo en toda la imagen. Teniendo en cuenta que las superficies a estudiar son mayoritariamente de suelo en campo abierto, se considera que la radiación

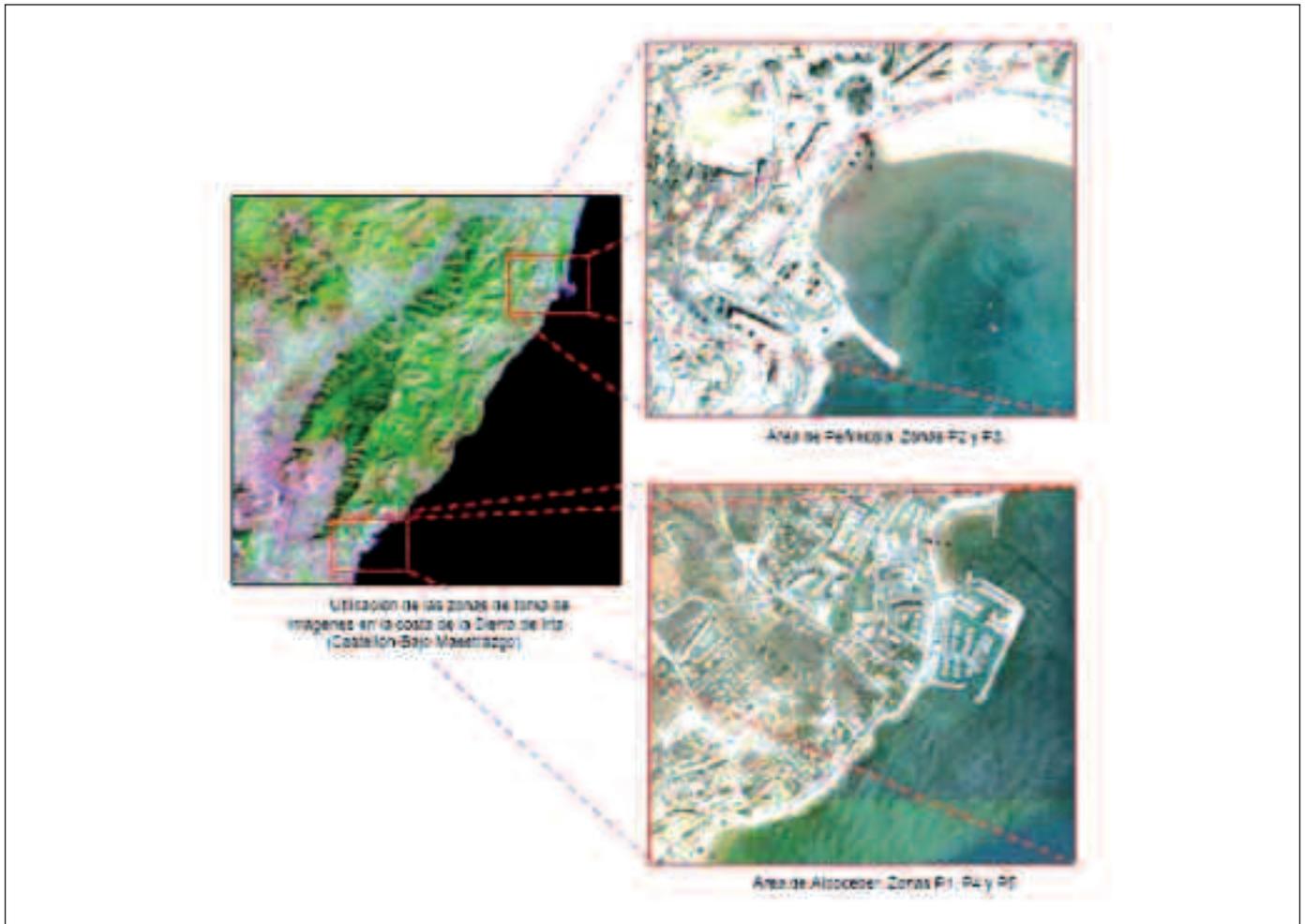


Figura 7. Localización general de las áreas de medidas *in situ*
 Figure 7. General location of *in situ* measurements

ThermaCAM SC2000 s/n 11890180	
FOV Horizontal:	24°
FOV Vertical:	18°
Rango espectral:	7.5 – 13 micrómetros
Rango medida de temperatura:	-40°C a +500°C
Precisión de medida:	± 2% (según especificaciones del fabricante)
Sensibilidad térmica:	< 0.1 °C (según especificaciones del fabricante)
Distancia al objeto:	variable

Tabla 7. Configuración de la ThermaCAM SC2000
 Table 7. *ThermaCAM SC2000* configuration

que puede reflejar provendrá principalmente del cielo. Por tanto, el valor del parámetro de temperatura ambiente o temperatura de refle-

xión generalmente se estima igual a la temperatura media aparente del cielo despejado. Para la obtención de la temperatura media aparente del cielo se adquiere una imagen infrarroja del mismo en cada una de las zonas de adquisición. El tratamiento y análisis de estas imágenes proporcionan una temperatura media aparente cuyo valor se introduce en el resto de imágenes como "temperatura ambiente".

La adquisición de los datos se realizó el día 21 de junio de 2006, procurando coincidir en el tiempo con el registro desde el avión. Se realizaron dos campañas de campo, la primera en período diurno, de las 10:00 a las 16:30 (hora local) y la segunda en período nocturno, de las 23:00 a las 00:30 (hora local). En cada toma se adquirieron tres imágenes sucesivas de cada una de las superficies consideradas, excepto en el caso de las superficies de arena, en las que se cubrió



Figura 8. Puntos de medida de las imágenes termográficas registradas simultáneamente a la realización de los vuelos. A: P3 Playa Sur-Peñíscola. B: P2 Cala en playa Sur-Peñíscola. C: P1 Playa de Las Fuentes-Alcocebre. D: P4-P5. Playa El Carregador-Alcocebre
Figure 8. Thermographic data synchronically registered to the flights. A: P3 Peñíscola south beach. B: P2 Peñíscola inlet in south beach. C: P1 Las Fuentes beach-Alcocebre. D: P4-P5. El Carregador beach-Alcocebre

el tamaño de un píxel del sensor AHS, para lo que se adquirieron 3x3 imágenes IR. La repetición sucesiva de imágenes se realizó con fines estadísticos. Las superficies o materiales examinados correspondieron a arena de playa, superficie del agua del mar en la zona costera, superficie del agua proveniente de surgencias y otras superficies artificiales presentes en el área de estudio.

Así mismo, se capturaron imágenes IR auxiliares (pared reflectiva, cielo) como apoyo para el proceso y análisis posterior de las imágenes. Previamente a la adquisición de las series de imágenes de cada superficie considerada, se tomaron datos de temperatura y

humedad relativa del aire mediante un higrómetro portátil TestoTerm 6010. Se tomaron así mismo datos de localización geográfica con un receptor GPS. Las imágenes termográficas se adquirieron en la zona costera de las localidades de Alcocebre y Peñíscola, en los sectores de surgencias de agua dulce. Con las imágenes adquiridas se ha realizado una base de datos en la que se ha identificado cada archivo de imagen con la superficie o el material correspondiente, su localización geográfica y la pasada de vuelo. La ubicación de los puntos de medida se detalla en las figuras 7 y 8.

El tratamiento de las imágenes se ha realizado

mediante el programa ThermaCAM Researcher 2001, que aplica la corrección por transmisión atmosférica, la corrección por emisividad del material, los efectos de reflexión y la corrección por transmisión de la óptica externa del sensor. Así mismo, permite guardar las imágenes corregidas en formato Matlab para un análisis estadístico posterior de los datos de temperatura. Mediante este análisis se ha calculado el valor máximo, mínimo, medio, desviación estándar, percentiles 25, 50 (mediana) y 75 y máximo del histograma (moda) de cada imagen adquirida por ThermaCAM y en formato mat. Como resultado del análisis de los datos se han obtenido las temperaturas de las superficies investigadas que se muestran en la Tabla 8.

Datos de temperatura de las surgencias y el agua del mar

Durante la ejecución de los vuelos se efectuaron registros de temperatura y salinidad del agua del mar y de las surgencias de agua dulce coincidiendo con las horas de registro de los vuelos diurno y nocturno en Peñíscola y Alcocebre. Se utilizó para ello un medidor o sonda portátil de conductividad/salinidad/temperatura (Environmental YSI30), realizándose las medidas en la capa más superficial del agua del mar, entre 10 y 20 cm. El rango de valores obtenidos oscila entre 18°C en las surgencias de la playa de Las Fuentes en Alcocebre y 27°C en la cala sur de Peñíscola a las 13:15 hora solar.

Tipo de muestra (hora)	Nº de wacomas analizadas	Emisividad	Media aritmética de las medias de temperatura (°C)	Desviación estándar de las medias de temperatura (°C)	Media aritmética de las desviaciones estándar (°C)	Desviación estándar de las desviaciones estándar (°C)
AGUA SURGENCIA EN P1 (8:20)	2	e = 0.985	19.64	0.06	0.16	0.00
AGUA MAR EN P1 (8:25)	2	e = 0.985	23.26	0.22	0.18	0.02
ARENA HÚMEDA EN P3 (12:10)	9	e = 0.95	30.00	0.27	1.30	0.17
AGUA SURGENCIA EN P3 (12:18)	3	e = 0.985	21.90	0.36	0.24	0.01
AGUA DEL MARJAL EN P3 (12:22)	3	e = 0.985	24.88	0.02	0.17	0.01
ARENA HÚMEDA EN P3 (12:35)	9	e = 0.95	38.89	0.46	1.42	0.31
ARENA SECA EN P2 (12:55)	9	e = 0.90	54.51	1.22	1.89	0.30
AGUA MAR EN P2 (13:06)	7	e = 0.985	27.36	0.18	0.19	0.02
AGUA MAR EN P1 (14:22)	3	e = 0.985	24.41	0.02	0.21	0.01
AGUA SURGENCIA EN P1 (14:26)	3	e = 0.985	18.30	0.06	0.24	0.02
ARENA HÚMEDA EN P4 (20:50)	9	e = 0.93	26.14	0.21	0.90	0.02
AGUA MAR EN P4 (21:01)	3	e = 0.985	24.52	0.03	0.15	0.00
ARENA HÚMEDA EN P4 (21:10)	9	e = 0.93	25.18	0.24	0.91	0.04
ARENA HÚMEDA EN P4 (21:30)	9	e = 0.93	25.36	0.31	0.27	0.02
ADOCQUINES EN P5 (21:45)	5	e = 0.96	32.04	0.20	0.29	0.03
FORMIGÓN EN P1 (22:24)	6	e = 0.94	26.01	0.22	0.21	0.02

Tabla 8. Resultados del análisis de las imágenes termográficas registradas in situ simultáneamente a los vuelos
 Table 8. Results of thermographic image analysis registered in the field synchronically to flights

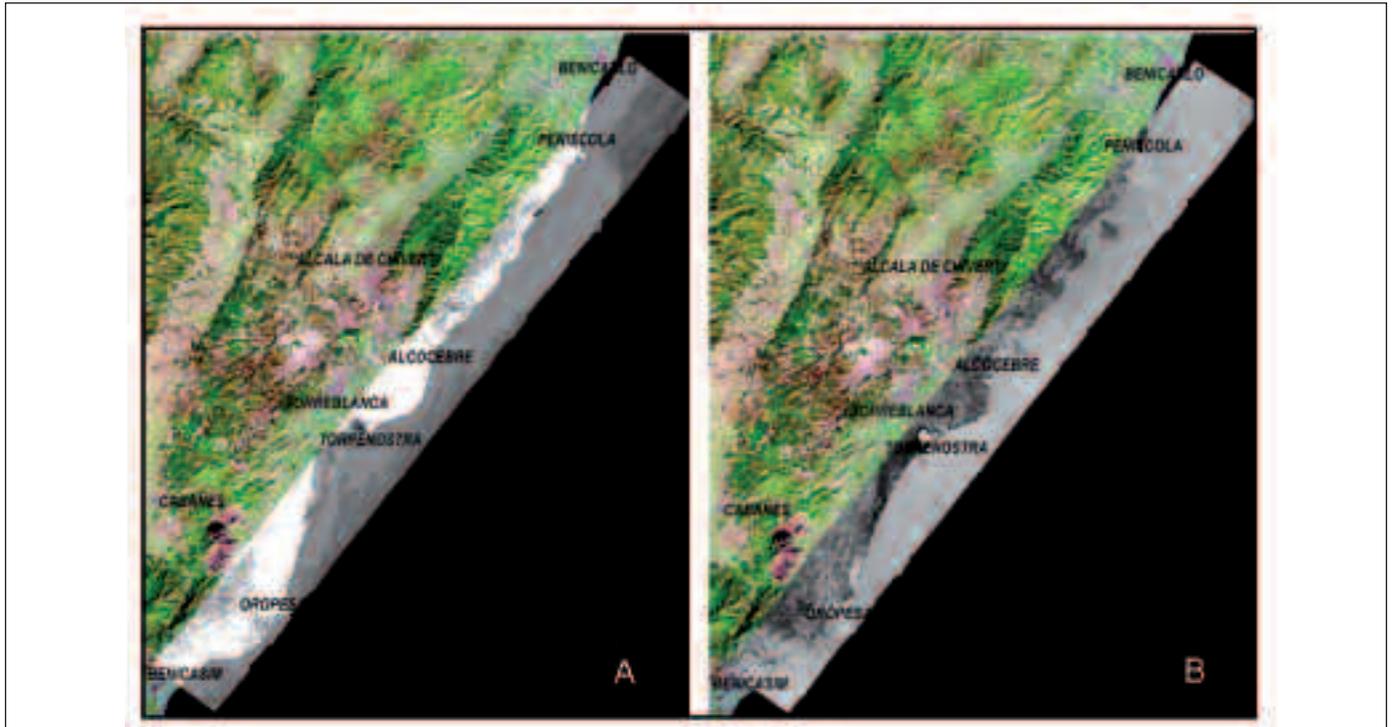


Figura 9. Imágenes térmicas georreferenciadas. A: Imagen diurna. B: imagen nocturna
Figure 9. Thermal georeferenced images. A: daytime image. B: nocturnal image

Resultados

Como resultado de las correcciones geométricas y radiométricas aplicadas a los datos AHS se ha obtenido un conjunto de imágenes calibradas y georreferenciadas correspondientes a los vuelos diurno y nocturno, y a las pasadas bajas y altas. Estas imágenes se han incluido en un proyecto SIG con objeto de comparar la información térmica con los datos registrados *in situ* con la cámara Thermacam y la sonda portátil. La imagen registrada en la pasada alta del vuelo diurno aparece en la figura 9A sobre la imagen Landsat TM, mostrando tonos más claros en las áreas terrestres, que corresponden a valores de temperatura más altas que la de la superficie del mar, que muestra valores relativamente más bajos expresados en tonos más oscuros. Por el contrario en la imagen del vuelo nocturno (figura 9B), estos valores se invierten, de manera que la superficie del mar y las zonas húmedas terrestres (marjales) exhiben temperaturas más altas que los materiales superficiales. Esto es debido a que la inercia térmica del agua es mayor que la de los suelos, rocas y vegetación. Además de estas diferencias, se observan en ambas imágenes, particularmente en la nocturna, una serie de anomalías tér-

micas en la línea de costa coincidentes con las surgencias de agua dulce ya mencionadas anteriormente.

Con objeto de localizar y caracterizar las anomalías térmicas en la zona costera, se ha realizado en primer lugar una máscara para eliminar las zonas terrestres. A continuación se ha llevado a cabo una segmentación de las imágenes con el fin de obtener los diferentes niveles de temperatura de la superficie marina. Las imágenes resultantes han permitido delimitar las anomalías térmicas situadas en la zona costera considerada. En la imagen térmica nocturna compuesta por el mosaico de las dos pasadas registradas a altura media (1.370 m) y resolución de 3,5 m (fig. 10), se han definido varias anomalías, algunas de ellas de primer orden, tanto por sus diferencias en el gradiente de temperatura como por su extensión superficial. Estas anomalías corresponden a las surgencias de Torre Badum, Las Fuentes de Alcocebre y Peñiscola (fig.11), y se identifican tanto en las imágenes diurnas como en las nocturnas. Las anomalías menores se exhiben fundamentalmente en las imágenes nocturnas.

En la figura 12 aparecen las imágenes térmicas diurna y nocturna correspondiente a la zona de

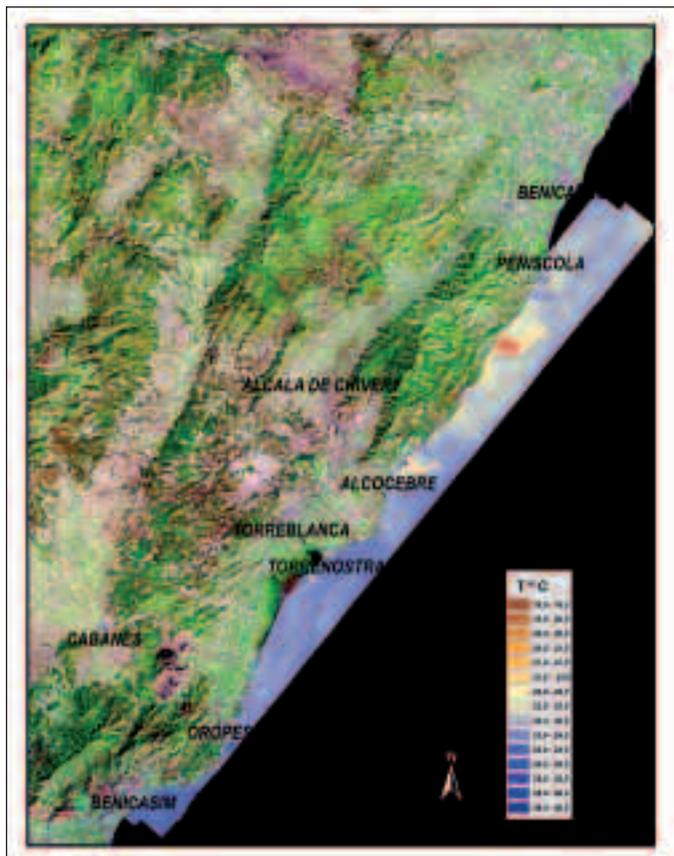


Figura 10. Imagen de temperatura de la superficie del mar compuesta a partir de las dos pasadas del vuelo nocturno a altitud media (1.370 m) (21 junio 2006). Las temperaturas más frías se han codificado en colores intensos con el fin de lograr una mejor expresión de las anomalías térmicas. Las discontinuidades en la zona de contacto se deben a la dinámica de la superficie del mar entre las dos pasadas

Figure 10. Sea skin temperature composite from two thermal images registered during the night at 1.370 m (21 June 2006). Cooler temperatures are coded in strong colour scale to better emphasize thermal anomalies related to fresh water discharges. Discontinuities along the contact zone are due to differences in the sea dynamics in the two passes

Peñíscola. En la imagen diurna (figura 12A), la superficie del mar presenta valores medios entre 23°C y 24°C (azules claros en la imagen). En zonas próximas a la costa la temperatura asciende, llegando a alcanzar 27°C en la cala sur de Peñíscola. En la imagen diurna se observa una pequeña pluma en la cala sur de Peñíscola, que exhibe temperaturas más bajas, entre 21°C y 23°C, correspondiente a la salida de la canalización de la surgencia de agua dulce del acuífero y agua con cierto contenido salino de la zona húmeda del Prat de Peñíscola, cuyas temperaturas,



Figura 11. Detalle de las anomalías térmicas relacionadas con las surgencias de Torre Badum, Las Fuentes de Alcocebre y Peñíscola *Figure 11. Thermal anomalies related to fresh water discharges in Torre Badum, Las Fuentes de Alcocebre y Peñíscola*

21° C y 24° C respectivamente, se registraron in situ la misma mañana del vuelo.

Así mismo, se observan temperaturas por debajo de la media marina en el depósito de agua dulce del Castillo de Peñíscola y sus salidas al puerto, siendo más evidente en la imagen nocturna (Figura 12B). También hay indicación de surgencias de agua dulce en las zonas que bordean el afloramiento carbonatado del tránsito Jurásico-Cretácico que conforma la península del castillo de Peñíscola, particularmente en su sector septentrional. La correlación de los valores de la imagen diurna con las temperaturas medidas con la sonda y la cámara ThermoScan da un error medio menor de 1°C. Este error puede explicarse porque la medida de la sonda se realiza en la capa de agua entre 10 y 20 cm, mientras que la medida de las imágenes corresponde a la película milimétrica de la superficie marina.

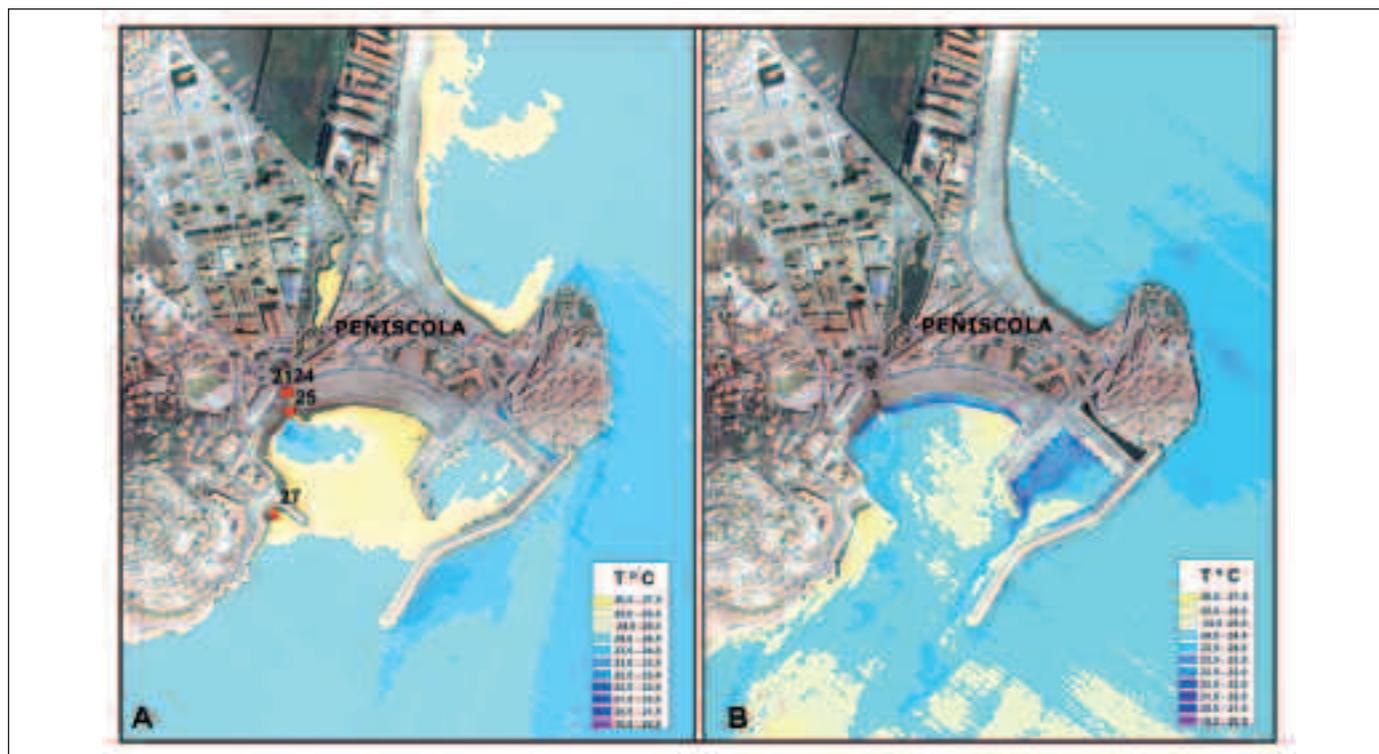


Figura 12. Anomalías térmicas derivadas de las imágenes registradas durante el día (A) y la noche (B) en el sector de Peñíscola
Figure 12. Thermal anomalies derived from daytime image (A) and night image (B) in the Peñíscola area

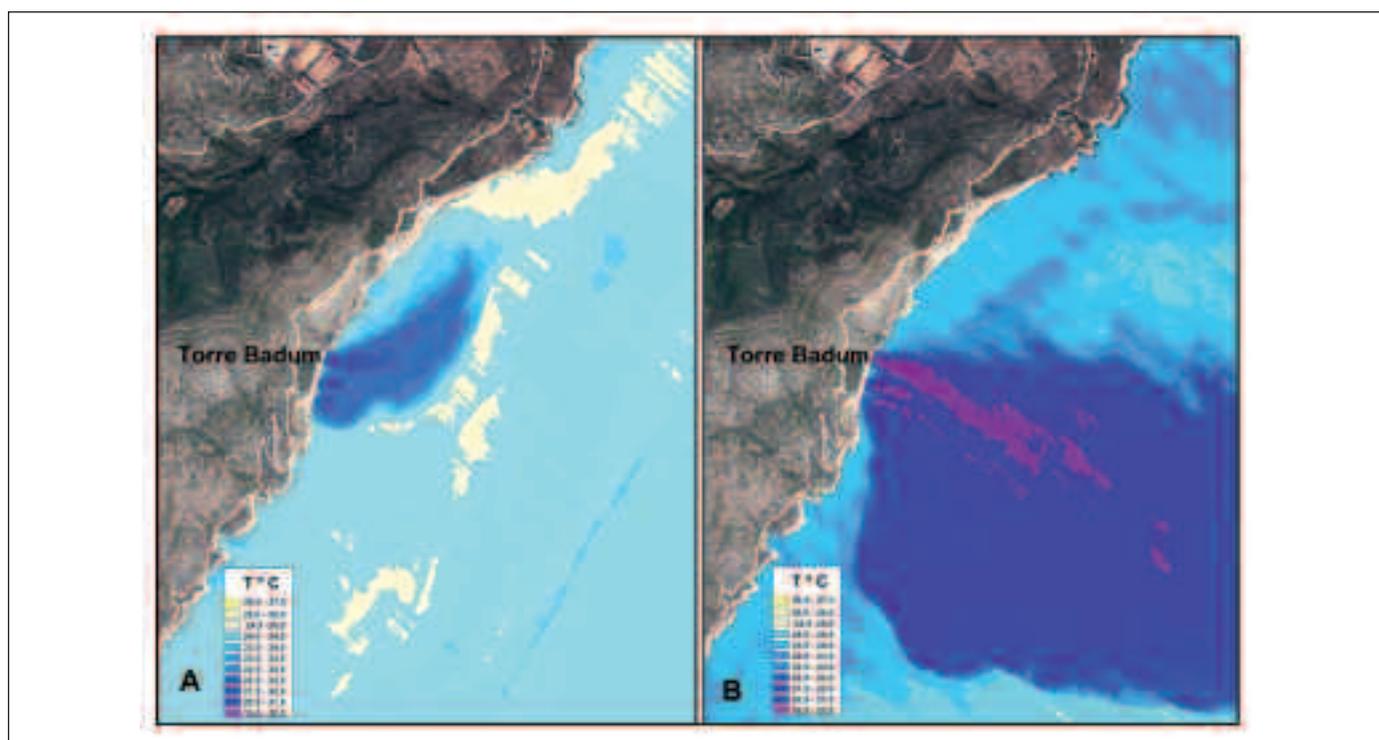


Figura 13. Anomalías térmicas derivadas de la imagen registrada durante el día (A) y la noche (B) en el sector de Torre Badum
Figure 13. Thermal anomalies derived from daytime image (A) and night image (B) in Torre Badum

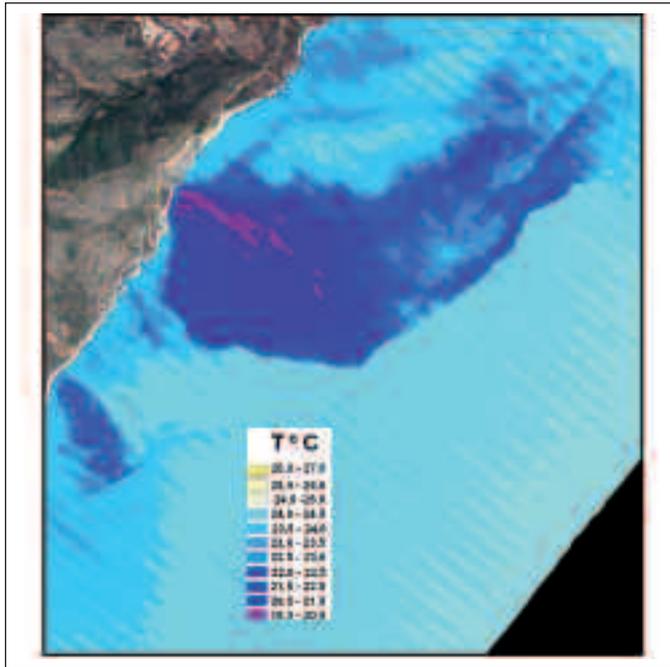


Figura 14. Pluma térmica principal de Torre Badum y dos anomalías menores derivadas de la imagen nocturna
Figure 14. Main thermal plume in Torre badum and two minor anomalies in the night image



Figura 15. Calizas intensamente fracturadas en el área de las surgencias de Torre Badum
Figure 15. Highly fractured carbonates in Torre Badum

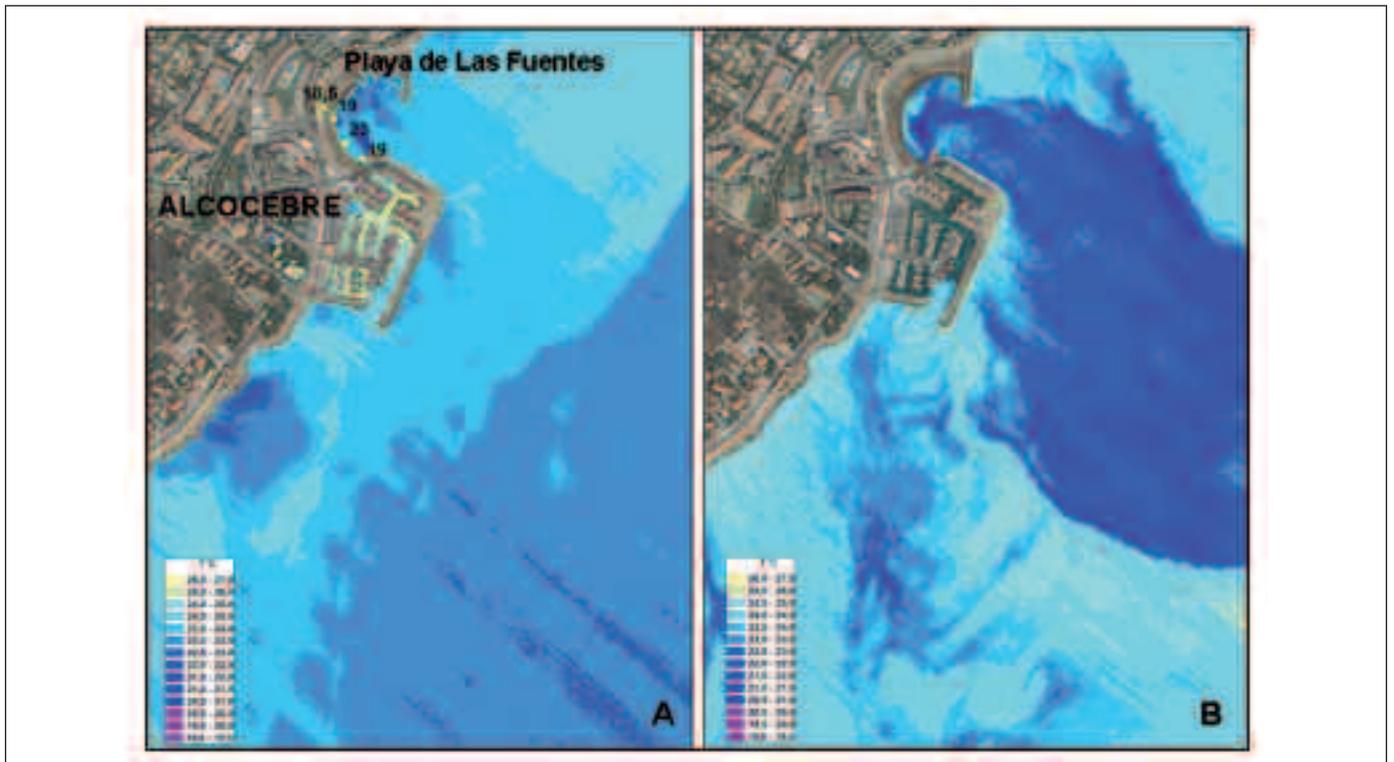


Figura 16. Anomalías térmicas derivadas de la imagen registrada durante el día (A) y la noche (B) en el sector de la playa de Las Fuentes (Alcocebre)
Figure 16. Thermal anomalies derived from daytime image (A) and night image (B) in Playa de Las Fuentes (Alcocebre)

En el sector costero situado en las inmediaciones de Torre Badum, se observa tanto en la imagen nocturna como en la diurna una anomalía térmica de dimensiones considerables (fig. 13). En ambas imágenes es visible la salida de cuatro caños diferenciados, separados entre sí unos 50 m en una distancia total de 200 metros, que dan lugar a la pluma. El caño más meridional se sitúa prácticamente al pie de Torre Badum. En la imagen diurna (fig. 13A), la pluma, con valores entre 18°C y 24°C, por debajo de los valores medios (25°C) de la temperatura superficial del agua del mar durante el día, se extiende 0,18 km², con una fuerte deriva hacia el norte. En la imagen nocturna (fig. 13B) el efecto térmico de la pluma es mucho más amplio, extendiéndose del orden de 1,5 km mar adentro, con una deriva de su borde externo también al norte. La parte central de la pluma, con valores de temperatura superficial entre 18°C y 22°C, muestra una extensión de 1,39 km², llegando a cubrir 3,35 km² si se considera el umbral de la anomalía hasta los 23°C, por debajo de los valores medios (24°C) de la temperatura superficial del agua del mar durante la noche (Fig. 14). Las surgencias están relacionadas con una zona intensamente fracturada que afecta a las calizas tableadas jurásicas (fig. 15) aflorantes en este sector de la Sierra de Irla. En la figura 14 se observa la existencia de otras dos anomalías térmicas de menores dimensiones a 600 m y 1.500 m al sur de la pluma principal.

La temperatura de las tres surgencias de la playa de Las Fuentes medida con la sonda y la Thermacam era constante en las distintas fuentes, oscilando entre 18,3°C y 19°C a lo largo del día, mientras que la temperatura del agua del mar en el borde de la playa oscilaba entre 23°C a las 9 am y 24°C a las 12 pm. Estas surgencias originan una anomalía térmica visible en ambas imágenes (fig.16), pero aparece mejor definida en la imagen nocturna (fig. 16B), en la que se observa una pluma con una extensión superficial de 1,16 km². En la imagen diurna (fig. 16A), las salidas surgentes son también visibles en la ensenada aunque el efecto térmico aparece en menor grado. En esta imagen se pone también de manifiesto una anomalía situada entre en puerto deportivo de Las Fuentes y la playa de El Cargador

Conclusiones

Las imágenes registradas en el infrarrojo térmico por el sensor aeroportado AHS han permitido obtener unos resultados de gran utilidad para la detección de anomalías térmicas relacionadas con surgencias de agua subterránea al mar (DAS), procedentes del acu-

ífero carbonatado de El Maestrazgo. La planificación de dos campañas de vuelo durante el día y la noche en la época estival ha hecho posible registrar el contraste óptimo de temperatura entre las surgencias y el agua del mar, para discriminar las plumas térmicas relacionadas con las salidas de agua dulce. La calibración de las imágenes mediante un modelo de transferencia radiativa, ha permitido convertir en temperatura los valores de radiancia registrados por el sensor. La segmentación de las imágenes de temperatura correspondientes al sector costero marino ha proporcionado una información muy valiosa para identificar y cartografiar anomalías térmicas. Dichas anomalías han permitido descartar la existencia de salidas difusas relevantes al mar desde el acuífero Jurásico de El Maestrazgo a lo largo de la sierra de Irla y confirmar, por el contrario, un modelo hidrogeológico basado en su drenaje a través de surgencias subacuáticas específicas que han podido ser identificadas y cartografiadas. Estas salidas, con caudales muy importantes, se concentran en tres sectores: Alcocebre, Badum y Peñíscola, siendo el resto de las surgencias detectadas de orden muy inferior a éstas, como es el caso de la localizada en la playa del Ruso, al sur de Badum. En consecuencia, el flujo subterráneo de salida se verifica de forma muy localizada en dichos puntos, en donde se deberán centrar los trabajos posteriores para intentar evaluar con mayor precisión la magnitud del volumen de la descarga de este sistema hidrogeológico.

Referencias

- Alonso, C., Antón-Pacheco, C., Baretino, D., Cabrera, F., Fernandez, A. M., Fernandez, J. E., García Gutierrez, M., Giraldez, J. V., Giron, I. F., Lopez-Pamo, E., Moreno, F., Ordoñez, R., Pelayo, M., Rivas, P., Vanderlinden, K., y M. V. Villar., 2001. Los suelos del Guadiamar: caracterización y evolución de los suelos contaminados por el lodo. *Boletín Geológico y Minero*, vol. esp.112:163-198.
- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J.A., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P., 2004. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Bol. Geol. Minero*, 115 (2): 177-186.
- Antón-Pacheco, C., Moreno, M.T., Gumiel, J.C., Mediavilla, C., Rebollo, A., 2006. Estudio de los humedales y de los usos del suelo en la comarca de Doñana y su entorno a partir de imágenes Landsat y AHS. Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. *Pub. Inst. Geol. y Min. de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*. 17: 383-391.
- Antón-Pacheco, C., Araguás, L., Ballesteros, B., Barnolas, A., Casas, A., Gil, I., Gumiel, J.C., López-Gutiérrez, J., Mejías, M., Plata, J.L., Samsó, J.M., Jiménez, I., Marina, M., Mediato, J. y Núñez, I., 2005. *Investigación sobre el*

- comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. *Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico. Recopilación y síntesis de la información.* Informe preliminar. Centro de documentación IGME: H1-002-05, pp. 535.
- Bádenas, B., Salas, R. and Burell, M., 2004. Three orders of regional sea-level changes control facies and stracking patterns of shallow platform carbonates in the Maestrat Basin (Tithonian-Berriasian, NE Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 93: 144-162.
- Barton, I.J., 1995. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status. *Journal of Geophysical Research*, 100(5): 8777-8790.
- Byrnes, A.E., Schott, J.R., 1986. Correction of Thermal imagery for atmospheric effects using aircraft measurement and atmospheric modeling techniques. *Applied Optics*, 25, (15): 2563-2570.
- Canerot, J., 1974. *Recherches géologiques aux confins des chaînes ibérique et catalane (Espagne) [Geological researches in the Iberian and Catalanian ranges (Spain)]*. Tesis doctoral. Universidad Toulouse. ENADIM-SA 5(2): 517 p.
- COPUT, 1990. *Estudio de identificación de las descargas al mar del acuífero del Maestrazgo en la zona litoral entre Alcocebre y Peñíscola*. Inédito.
- COPUT, 1992. *Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irta. Mancomunidad del Baix Maestrat (Castellón)*. Inédito.
- Dalle Lucca, E.V., J.V. Bandeira, J.A. Lorenzetti, R. da Costa Moreira, R. Morgado de Castro, L. H. Salim, O. D. Zaloti, E.S. Carmine, 2005. Uso de sensor hiperespectral aerotransportado no monitoramento da pluma termal. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Brasil, INPE, pp. 397-405.
- Fernández, G., de Miguel, E., Amaro, A., Rejas, J. G., Gómez, J. A., Gutiérrez de la Cámara, O., Jiménez, M., Fernández-Renau, A., 2000. Propuesta metodológica para la utilización de la teledetección multiespectral aeroportada en la gestión y seguimiento de recursos hídricos. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. pp.83-101.
- Fernández-Renau, A., Gómez, J. A., de Miguel, E., 2005. The INTA AHS system. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX*. Edited by Meynart, Roland; Neeck, Steven P.; Shimoda, Haruhisa. *Proceedings of the SPIE*, 5978: 471-478.
- Gillespie, A., Cothorn, J.S., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Hook, S.J. And Kahle, A.B. A., 1998. Temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1113-1126.
- IGME, 1988. Estudio hidrogeológico para el abastecimiento a núcleos urbanos del Maestrazgo, Castellón.
- IGME-ORYDA, 1977. Informe nº 4 Hidrogeología del Sistema Nº 55: *Sistema Acuífero de Javalambre y Sistema Acuífero del Maestrazgo. Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca media y baja del Júcar*. Inédito.
- Ikeda, M., y Emery, W. J., 1984. A continental-shelf upwelling event off Vancouver Island as revealed by satellite infrared imagery. *Journal of Marine Research*, 42(2): 303-317.
- ITGE (1989) *Estudio Hidrogeológico del Maestrazgo, Castellón*. Informe interno, pp. 158.
- Martín-Chivelet, J., Berástegui, X., Rosales, I., Vilas, L., Vera, J.A., Caus, E., Gräfe, K.U., Mas, R., Puig, C., Segura, M., Robles, S., Floquet, M., Quesada, S., Ruiz-Ortiz, P.A., Frenegal-Martínez, M.A., Salas, R., Arias, C., García, A., Martín-Algarra, A., Meléndez, M.N., Chacón, B., Molina, J.M., Sanz, J.L., Castro, J.M., García-Hernández, M., Carenas, B., García Hidalgo, J., Gil, J. and Ortega, F., 2002. Cretaceous. In *The Geology of Spain*. (Gibbons W. and Moreno, T., Eds). Geol. Soc. (London) 255-293.
- Mas, R. and Salas, R., 2002. Lower Cretaceous of the Iberian Basin. *The Geology of Spain* (Gibbons, W. and Moreno, T., Eds.). Geol. Soc. London, 284-288.
- McClain, E., Pichel, W.G. y Walton, C. (1985). Comparative performance of AVHRR multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysycal Research*, 90:11587-11601.
- Mejías, M., Plata, J.L., Ballesteros, B., López, J. and Marina, M., 2006. Metodología de caracterización de formaciones acuíferas profundas. Aplicación al acuífero Jurásico del Maestrazgo, Castellón. *Groundwater in Mediterranean countries. Hydrogeology and Groundwater series*, 17: 301-309. IGME.
- Mejías, M., García-Orellana, J., Plata, J.L., Marina, M., García-Solsona, E., Ballesteros, B., Masqué, P., López, J. and Fernández-Arrojo, C., 2007. Methodology of hydrogeological characterization of deep carbonate aquifers as potential reservoirs of groundwater. Case of study: the jurasic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, Spain). *Environmental Geology*. DOI 10.1007/S00254-007-0845-0.
- Reynolds, R. W. and T. M. Smith, 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation, *J. Climate*, 7: 929-948,
- Rejas, J. G., Prado, E., Jiménez, M., A. Fernández-Renau, Gómez, J. A. y E. de Miguel. Caracterización del sensor hiperespectral AHS para la georreferenciación directa de imágenes a partir de un sistema inercial GPS/IMU" www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/R16.pdf
- Scarpace, F.L.; Madding, R.P.; Green, T., 1975. Scanning thermal plumes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 41(10):12233-1231.
- Schott, J. R., Tourin, R .H. A., 1975. Airborne calibration of aerial infrared water temperature measurements. *Proceedings 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, pp 477-484.
- Schott, J. R., 1979. Temperature measurement of cooling water discharged from power plants. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45(6):753-761.
- Steissberg, T.E., Simon, J. H. Schladow, S. G., 2005. Characterizing partial upwellings and surface circulation at

- Lake Tahoe, California–Nevada, USA with thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, 99:2-15
- SENSYTECH. AHS – Airborne Hyperspectral Scanner. <http://www.argonst.com/>
- Serrano Orts V, Roca Maurí A, Pérez Baviera A, Nieto Salvatierra M, Ortiz Pérez S, and Capilla Romá, J., 1995. Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irta (U.H. 08.07: Maestrazgo). Mancomunidad del Baix-Maestrat, Castellón. *6th Hydrogeology Symposium in Seville, Spanish Association of Underground Hydrology, XIX*: 679-697.
- Zavody, A.M., Mutlow, C.T., and Llewellyn-Jones, D.T., 1995. A radiative transfer model for sea surface temperature retrieval for the along-track scanning radiometer, *J. Geophys. Res.*, 100, C1, 937-952.

Recibido: abril 2007

Aceptado: agosto 2007