

MARCADORES CLIMATICOS MINERALES EN LAGOS FOSILES CON DATOS HIPERESPECTRALES DAIS 7915 (TABLAS DE DAIMIEL, LA MANCHA)

A.Riaza(*), E.Garcia-Meléndez(**), M.Suarez(**), A.Hausold(***), U.Beisl(***), H.Van der Werff(****)

a.riaza@igme.es

(* *Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Rios Rosas 23, 28003 Madrid, Spain
Ph: 3491 3475907; Fax: 3491 4426216*

(** *Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Pza. de la Merced s/n, 37008 Salamanca, Spain*

(*** *DLR_ German Aerospace Research Establishment, Remote Sensing Data Centre, Oberpfaffenhofen,
Postfach 1116, 82230 Weßling, Deutschland*

(**** *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), P.O.Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands*

RESUMEN: Los medios lacustres relacionados con ríos son especialmente sensibles a los cambios climáticos. Al disminuir la humedad, las orillas retroceden y se depositan minerales en los sedimentos expuestos a la atmósfera que son marcadores climáticos, y que pueden detectarse usando imágenes hiperespectrales. Se han cartografiado suelos salinos, carbonatos, materia orgánica y costras de óxidos de hierro dependientes del clima, desarrolladas en varias etapas de inmersión y emersión en los últimos 2000 años con el espectrómetro DAIS 7915. Las interacciones y enmascaramientos en la respuesta espectral de mezclas de varios componentes minerales presentes en los sedimentos lacustres se describen por medio de espectros de laboratorio. Se han cartografiado las charcas antiguas que rodeaban el humedal actual. De este modo se proporciona un contexto inestimable para el desarrollo de nuevas técnicas en limnología.

ABSTRACT: Open-system lakes developing marshes are sensitive environments to climate changes. Mineralogical climate markers such as gypsum and dolomitized carbonate are spatially traced using hyperspectral imagery. Climate-dependent saline soils, carbonate, organic matter and iron oxide crusts, have been mapped along different stages of flooding and emersion in the frame of the past 2000 years using DAIS and ROSIS spectrometer data. Spectral behaviour of interacting and masking from various mineralogical components are described on laboratory spectra including interactions and masking produced by mineral associations related to the effect of palustrine and fluvial processes on the sediments. A general outline of the past pools is drawn on the area surrounding the actual marsh, providing priceless data to use in further paleoclimate limnological techniques research.

PALABRAS CLAVE: hiperespectral, marcadores climáticos, evaporitas, paleolimnología.

INTRODUCCIÓN: El Parque Natural de las Tablas de Daimiel (Figura 2) es un humedal de morfología lineal asociado a llanuras y fondos aluviales que resulta del desbordamiento de los ríos Ciguela y Guadiana, y de la descarga del acuífero subyacente por una serie de surgencias ("ojos"). Los estudios palinológicos previos denotan condiciones paleoambientales adversas en el pasado inmediato (2500 años b.p.) con disminución de humedad y descenso de los niveles freáticos. La explotación intensiva de agua subterránea para el riego de cultivos durante los últimos 30 años en La Mancha ha provocado un cambio brusco de los flujos subterráneos. Como consecuencia, las Tablas han pasado de ser una zona de descarga de agua subterránea a un gran balsa de recarga artificial.

Los lagos son medios sedimentarios especialmente sensibles a los cambios climáticos. En épocas de disminución de humedad, las orillas retroceden, y los depósitos de las llanuras circundantes se enriquecen en minerales salinos, arcillas y carbonatos, que son detectables con imágenes hiperespectrales. Los depósitos más recientes en las cercanías de las Tablas de Daimiel son arenas holocenas, cuyo color cambia de rojizo a gris en las zonas paleoinundadas, por la materia orgánica que se deposita en el fondo de la charca.

Durante los últimos quince años, se han desarrollado estudios espectrales en evaporitas tanto en el visible y el infrarrojo cercano (Crowley 1991) como en el infrarrojo térmico (Crowley, 1996). La influencia de la materia orgánica en el color del suelo es una línea tradicional en estudios espectrales (Shields *et alii* 1968, Leone y Escadafal 2001). También son frecuentes los trabajos espectrales en suelos salinos (Dehaan y Taylor 2002). Existen varias espectrootecas de minerales y rocas de dominio público (Clark *et alii* 1993, Salisbury *et alii* 1992)

que se usan como referencias para la interpretación de imágenes multiespectrales. Los autores han usado previamente los mismos minerales marcadores climáticos para la interpretación espectral en una zona carbonatada (Riaza *et alii* 1998) y la cartografía digital de la evolución de una cuenca sedimentaria terciaria (Riaza *et alii*, 2000).

METODO: Se han tratado digitalmente imágenes hiperespectrales DAIS 7915 (Julio 2000, resolución espacial de 5 m) cuyo tramiento preinterpretativo realizó la Agencia Espacial Alemana (Riaza *et alii* 2002). Se tomaron espectros en el campo en puntos de interés geológico con un espectrómetro GER (400-2400 nm), y en laboratorio sobre muestras de rocas no consolidadas con un espectrómetro Perkin-Elmer Lambda 6 provisto de esfera integradora (400-2400 nm). En muestras seleccionadas por su peculiaridad espectral, se realizaron análisis de difracción de rayos X para confirmar las observaciones mineralógicas de campo. La influencia del tamaño de grano se evaluó con muestras de polvo molido a tamaño arcilla.

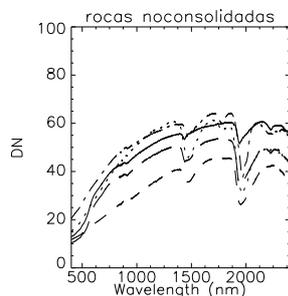
TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES: Las imágenes DAIS se trataron digitalmente intentando separar sedimentos y minerales indicadores de procesos geológicos ligados a cambios climáticos en ambientes palustres y fluviales (Figura 1). Después de enmascarar agua y vegetación densa, se seleccionaron combinaciones (Riaza *et alii*, 2002) en falso color con canales en longitudes de onda con absorciones diagnósticas en los minerales que se consideran indicadores climáticos en la zona de estudio (Clark *et alii* 1993).

Los seis canales en el infrarrojo térmico (Figura 2) se usaron para hacer estimaciones iniciales sobre variabilidad litológica (Riaza *et alii* 1998). Se construyeron máscaras a partir de las Transformadas de Fracciones de Ruido Mínimo para aislar las unidades geológicas en las arenas (Figura 1). El Índice de Pureza de Pixel y análisis n-dimensional se usó en las zonas enmascaradas para cada unidad (Riaza *et alii* 2002) para depurar el significado espectral de las distintas poblaciones estadísticas en las arenas (Boardman y Kruse 1994). El Cartógrafo de Angulos Espectrales con espectros de campo tomados con un espectrómetro GER (Kruse *et alii* 1993) demostró sensibilidad a pequeñas variaciones dentro de cada una de las unidades iniciales (Riaza *et alii* 2002).

ESPECTROS DE LABORATORIO: Las observaciones de campo y los análisis mineralógicos indican que la charca antigua era una solución acuosa sulfatada y carbonatada, sin cloruros. La respuesta espectral de las arenas en el fondo de las

antiguas Tablas de Daimiel está dominadas por el yeso y calcita o dolomita (Figura 4). El aumento en el contenido de dolomita representa una intensificación de los procesos palustres.

Las *arenas rojas* holocenas son sedimentos compuestos de arena con cuarzo como componente más importante (Riaza *et alii* 2002). La reflectancia global de las arenas rojas es mayor que



en la turba por la influencia del yeso y los minerales salinos (Figura 4). La goetita contribuye con un mínimo suave en 1943 nm. Los análisis de difracción de rayos X no demuestran la presencia de arcillas, sino de carbonatos. Los espectros tomados en muestras del polvo molido a tamaño arcilla confirman la presencia de carbonatos en la mayoría de las arenas rojas (Figura 5).

arenas rojas emergidas antiguas
arenas rojas emergidas recientes
arenas grises en llanuras salinas con yeso
arenas grises en llanuras salinas (+yeso, carbonato)
turba

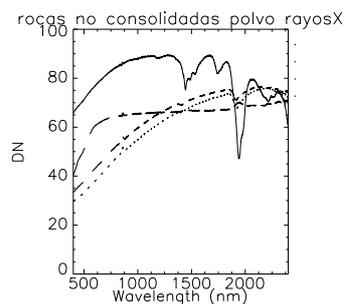
Figura 4.- Espectros de laboratorio de muestras de rocas no consolidadas tomados con un espectrómetro Perkin Elmer Lambda 6 en unidades sedimentarias representativas, con expresión de los minerales que dominan la respuesta espectral de la mezcla.

Las *arenas grises* presentan un mínimo en 2298 nm atribuido a dolomita, que está ausente en el resto de las arenas. La presencia de dolomita es indicativa de degradación de materia orgánica, ya sea por liberación de azufre en los sedimentos inundados, o por aumento de magnesio en el sistema aportado por aguas de escorrentía superficial. Las arenas grises paleoinundadas también muestran absorciones por la presencia de carbonatos en los espectros tomados en muestras de polvo molido a tamaño arcilla.

La respuesta espectral del yeso domina las arenas grises, acompañado de la dolomita (Figura 4). El desplazamiento de un mínimo de 1940 a 1970 nm indica la transición desde las llanuras temporalmente inundadas a las arenas emergidas rojas con óxidos de hierro desarrollados por exposición a la atmósfera. Las medidas espectrales tomadas en las muestras de

polvo molido a tamaño arcilla sólo muestran los rasgos de absorción del yeso, allí donde existe. Sin embargo, se sabe de la presencia de carbonatos en las mismas muestras. Por lo tanto, el yeso domina y oculta espectralmente la presencia de carbonato, tanto en las muestras de rocas no consolidadas, como en las muestras de polvo molido a tamaño arcilla.

Los espectros de laboratorio de la turba están dominados por la presencia de yeso con las típicas formas con mínimos en 1477, 1520, 1565 and 2250 nm (Clark *et alii* 1992) (Figura 4). La presencia de carbonato se revela en un suave mínimo en 1975 nm. La sepiolita y sobre todo la dolomita se detectan por un mínimo en 2298 nm. La presencia de carbonato en las muestras de turba se refleja espectralmente en las medidas tomadas sobre muestras molidas de tamaño arcilla (Figura 5). La turba, a pesar de su elevado contenido en materia orgánica, que es espectralmente dominante en mezclas minerales deprimiendo y aplanando la respuesta espectral del conjunto (Clark *et alii*, 1993),



rocas no consolidadas polvo rayosX
arenas emergidas rojas con yeso
arenas emergidas rojas con carbonato
arenas grises llanuras salinas con carbonato
turba con carbonato

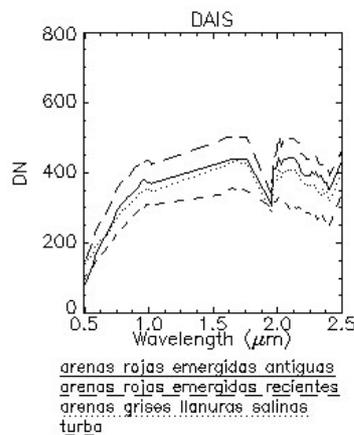
denota espectralmente por el contrario la presencia de yeso (Figura 4). La presencia masiva de materia orgánica enmascara cualquier respuesta espectral de los minerales ferruginosos (Galvao y Vitorello 2001).

El carbonato es espectralmente omnipresente en toda la zona de estudio, tanto en las áreas paleoinundadas como en las emergidas.

Figura 5.- Espectros de laboratorio tomados en muestras de polvo molido a tamaño arcilla a partir de rocas no consolidadas con un espectrómetro Perkin Elmer Lambda 6 en sedimentos representativos, con expresión de los minerales que dominan la respuesta espectral de la mezcla.

RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS IMÁGENES DAIS 7915: Las imágenes DAIS reflejan una respuesta diferente entre las regiones paleoinundadas y las emergidas (Figura 6). Todas las zonas

emergidas muestran depresiones en el visible por la presencia de minerales ferruginosos (Clark *et alii*, 1993). Estas depresiones son más acusadas en las arenas emergidas, de acuerdo con su color naranja brillante a simple vista. De todas las unidades geológicas cartografiadas, las arenas rojas emergidas más jóvenes dan la reflectancia global más alta. En cambio, las áreas paleoinundadas son menos



expresivas en el visible.

En el infrarrojo cercano, lo más llamativo es un absorción estrecha en 2100 nm en las zonas paleoinundadas con arenas grises, que puede atribuirse a bloedita, un sulfato de sodio y magnesio hidratado, o a carbonatos como la calcita o dolomita.

Figura 6.- Perfiles Z de imágenes DAIS en zonas que representan unidades sedimentarias en los mapas geológicos elaborados con tratamiento digital de imágenes (fig1).

Las zonas emergidas con arenas rojas muestran una hombrera centrada entre 2200-2300 nm que no existe en la respuesta espectral de las regiones paleoinundadas, atribuible a carbonatos.

Las imágenes DAIS también reflejan variedad en las áreas paleoinundadas según su contenido en materia orgánica, yeso y minerales salinos (Figura 3). Las zonas topográficamente más profundas y endorreicas, en las que hubo agua estancada prolongadamente y donde se desarrollaron pantanos con precipitación abundante de materia orgánica, parecen contener también yeso abundante.

Tanto en la turba como en las llanuras salinas aparece una depresión en 2300 nm, que puede deberse tanto al yeso como al carbonato. La reflectancia global es más baja en las zonas que estuvieron más tiempo inundadas con turba por su mayor contenido en materia orgánica. Las imágenes

recogen el predominio espectral de la materia orgánica en las turberas, aunque los estudios de laboratorio indiquen el predominio del yeso, que no debe estar espacialmente extendido homogéneamente.

CONCLUSIONES: Las imágenes hiperespectrales DAIS han distinguido zonas paleoinundadas en relación con un humedal en retroceso por su mineralogía diferencial asociada a procesos sedimentarios en medios palustres y fluviales.

El yeso, el carbonato y la materia orgánica son minerales indicadores climáticos detectables espectralmente en las imágenes en los intervalos de longitudes de onda del Visible y el Infrarrojo cercano. Las imágenes han permitido cartografiar suelos salinos con yeso en las llanuras inundadas temporalmente alrededor de las charcas de agua según las variaciones de humedad. También se manifiestan las zonas más profundas ricas en materia orgánica que desarrollan pantanos y turberas en los periodos de calma del movimiento del agua.

El yeso enmascara la presencia de carbonato en su respuesta espectral. Sólo los análisis de difracción de rayos X revelan la presencia de carbonato cuando coexiste con yeso. Por lo tanto, también puede esperarse la presencia de carbonato en las zonas fluvio-lacustres geoquímicamente centrales ricas en yeso.

Se elaboró un mapa del paleoalago a base de sucesivos procesos de tratamiento hiperespectral en zonas selectivamente enmascaradas correspondientes a distintas unidades geológicas. Estos mapas orientarán los análisis paleoambientales posteriores con otras técnicas.

AGRADECIMIENTOS: El vuelo con el sensor hiperespectral DAIS 7915 fue financiado por el Quinto Programa Marco, Mejora de Potencial Humano, Acceso a Infraestructuras de Investigación (contr. [HPRI-CT-1999-00075, ref HS2000-ES1](#)). [S. Martín Alfageme](#) y [Iñigo Martín](#) proporcionaron inestimable asesoría en soporte físico y programación informática ([STIG, University of Salamanca](#)).

BIBLIOGRAFÍA:

[Boardman J.W. and Kruse, F. A., 1994. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in Proceedings, Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I-407 - I-418.](#)
[Clark, R. N., Swayze, G. A., Gallagher, A., King, T. V. V. and Calvin, W. M., 1993. The U.S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to](#)

[3.0 mm: U.S. Geological Survey, Open File Report 93-592, 1340 p.](#)

[Crowley, J.K. and Hook, S.J., 1996. Mapping playa evaporite minerals and associated sediments in Death Valley, California, with multispectral thermal infrared images, Journal of Geophysical Research, vol.101, no. B1, 643-660, January 10.](#)

[Crowley, J.K., 1991. Visible and near-infrared \(0.4-2.5 \$\mu\text{m}\$ \) reflectance spectra of playa evaporite minerals, Journal of Geophysical Research, 96, 16.231-16.240.](#)

[Dehaan, R.L. and Taylor, G.R., 2002. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization, Remote Sensing of Environment 80, 406-417.](#)

[Galvao, L.S., and Vitorello, I., 1998. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils, International Journal of Remote Sensing, 19, n° 10, 1969-1979.](#)

[Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., and Goetz, A. F. H., 1993. The Spectral Imaging Processing System \(SIPS\) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data, Remote Sensing of Environment, 44, 145-163.](#)

[Leone, A.P., and Escadafal, R., 2001. Statistical analysis of soil colour and spectroradiometric data for hyperspectral remote sensing of soil properties \(example in a southern Italy Mediterranean ecosystem\), International Journal of Remote Sensing, 22, n°12, 2311-2328.](#)

[Riaza, A., Kaufmann, H., Zock, A. and Müller, A., 1998. Mineral Mapping in Maktesh Ramon \(Israel\) using DAIS 7915, Proceedings 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zürich, Switzerland, 6-8 October 1998, in press.](#)

[Riaza, A., Mediavilla, R., and Santisteban, J.I., 2000. Mapping geological stages of climate-dependent iron and clay weathering alteration and lithologically uniform sedimentary units using Thematic Mapper imagery, International Journal of Remote Sensing, vol.21, n°5, 937-950](#)

[Riaza, A., Mediavilla, R., García Meléndez, E. and Suárez, M., Hausold, A., Beisl, U., Van der Werff, H., 2002. Mapping paleoflooded areas on evaporite playa deposits over sandy sediments \(Tablas de Daimiel, Spain\) using hyperspectral DAIS 7915 and ROSIS Spectrometer data, Proceedings 1st International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Torrent, Spain, 16-20 September 2002; in Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Ed.: José A. Sobrino, 371-379, Guada Impresores S.L.](#)

[Salisbury, J. W., Walter, L. S., Vergo, N. and D'Aria, D. M. 1992. Infrared \(2.1-25 \$\mu\text{m}\$ \) Spectra of](#)

Minerals, The John Hopkins University Press, Baltimore (Maryland, USA).
Shields, J.A., Paul, E. A., Arnaud, R.J.Sr. and Head, W.K., 1968, Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter, Canadian Journal of Soil Science, 48, 271-280.