

Contribución al estudio de los humedales del manto eólico litoral de el Abalario-Doñana a partir de imágenes AHS

C. Antón-Pacheco¹, M.T. Moreno¹, J. A. Gómez², M. Jiménez², C. Mediavilla¹,
J.C. Gumiel¹, E. Prado², J.G. Rejas², O. Gutiérrez² y A. Rebollo¹
c.pacheco@igme.es

¹Instituto Geológico y Minero de España. La Calera 1. 28760 Tres Cantos. Madrid.

²Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. de Ajalvir, km 4. 28850 Torrejón de Ardoz.
Madrid. gomezsj@inta.es

RESUMEN

Se han registrado tres campañas de vuelos con el sensor hiperspectral AHS sobre el Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana (MEL), importante ecosistema que comprende un gran número de lagunas permanentes y temporales, en parte dependientes del agua subterránea. El sensor AHS es un nuevo espectrómetro de imagen aeroportado que registra la radiación de las regiones solar y térmica del espectro en 80 canales. Las imágenes obtenidas en primavera y principios del otoño de 2004 y 2005 han sido geocodificadas utilizando los parámetros de orientación externa medidos por un sistema inercial GPS/INS a bordo del avión. Se han aplicado correcciones atmosféricas utilizando espectroradiometría de campo registrada durante los vuelos. A partir de la información AHS corregida y calibrada se han cartografiado los niveles de inundación de las formaciones palustres y sus fluctuaciones durante el período comprendido entre abril de 2004 y septiembre de 2005. Las medidas de campo y el tratamiento de los datos AHS ha permitido identificar y cartografiar la vegetación higrofitica (monte negro) característica de la zona, cuya distribución es un buen indicador de la profundidad del nivel freático en este sector del acuífero regional Almonte-Marismas.

PALABRAS CLAVE: imágenes hiperspectrales AHS, humedales, vegetación higrofitica, acuífero, Doñana.

ABSTRACT

High spectral-resolution AHS data have been collected over the Manto Eólico Litoral El Abalario-Doñana (MEL) within the nature reserve of Doñana, a Ramsar wetland, which constitutes one of the largest and most important remaining wetlands in Europe. The MEL is located in the eolic mantle of the Huelva coastal plain and holds a large number of permanent and temporal shallow marsh lagoons. Natural vegetation is mainly composed of different types of shrub communities, whose distribution depends on their position with regard to the phreatic water table depth of the Almonte-Marismas aquifer. The AHS system is a new 80-band airborne hyperspectral scanner covering the visible through long wave thermal IR. Data were collected during three flight campaigns in spring and early fall 2004 and early fall 2005. Atmospheric correction and in situ spectral reflectance measurements have been applied and the data has been geo-rectified using an integrated GPS/INS. Surface water fluctuation in april and september 2004 and september 2005 have been mapped and spectral characterization and mapping of hygrophytic shrub vegetation has been performed.

KEY WORDS: hyperspectral AHS data, wetlands, hygrophytic vegetation, water-table depth, Doñana.

INTRODUCCIÓN

Doñana y su entorno constituyen uno de los enclaves húmedos con mayor valor ecológico de Europa. Declarada Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1980 e incluida en el convenio Ramsar en 1982. Forma parte de la Red Natura como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) desde 1988 y es declarada Patrimonio de la Humanidad en 1994. Tres ecosistemas bien diferen-

ciados: el Sistema Eólico, la Marisma y la Vera conforman los humedales de esta región. Aunque la Marisma depende fundamentalmente de las aportaciones del sistema hidrológico superficial, la hidrodinámica del complejo palustre del Manto Eólico está estrechamente relacionada con las descargas de las aguas subterráneas del sistema acuífero de Doñana. Durante los últimos cincuenta años, el área de Doñana y su entorno han sido sometidos a una profunda modificación con la introducción de bos-

ques de pino y eucalipto, así como de arrozales y cultivos de regadío. La transformación de ciertos sectores de la marisma, las extracciones de aguas subterráneas para riegos de uso agrícola y el desarrollo de áreas urbanas próximas a estas zonas húmedas han provocado problemas zonales en el nivel freático del sistema acuífero regional Almonte-Marismas. Los descensos prolongados del nivel piezométrico producen severas modificaciones en la descarga natural por los ecotonos, reduciendo la extensión de los humedales durante la época seca.

Las imágenes multispectrales registradas desde avión y satélite proporcionan una visión óptima de los niveles de inundación de la marisma y de las formaciones palustres, permitiendo detectar los cambios a lo largo de distintos periodos hidrológicos. En este sentido, en un trabajo preliminar se abordó el estudio de una serie temporal de imágenes Landsat y una imagen del sensor aeroportado ATM para determinar las fluctuaciones de la lámina de agua de las lagunas peridunares de Doñana (Moreno et al., 2004). En este estudio se han utilizado los datos registrados por el sensor hiperespectral Airborne Hyperspectral Scanner (AHS). Estos sensores registran los datos en bandas espectrales estrechas y continuas, lo que posibilita el reconocimiento de rasgos espectrales diagnósticos críticos para identificar las distintas cubiertas. La utilización de sensores aeroportados ha dado buenos resultados en detección de suelos contaminados por metales pesados a partir de datos HyMap (Antón-Pacheco et al., 2002) y en estudios del grado trófico de embalses a partir de datos CASI-2 (Ruiz-Verdú et al., 2001). Se han registrado datos AHS en la zona correspondiente al Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana (MEL) para realizar la cartografía de los niveles de inundación de las formaciones palustres durante el período comprendido entre marzo de 2004 y septiembre de 2005. También se ha evaluado su utilidad para el estudio y caracterización de las formaciones palustres y de las distintas comunidades de vegetación higrofítica asociadas en el sector de las lagunas peridunares de Doñana.

ÁREA DE ESTUDIO

El Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana (MEL) se sitúa en el extremo meridional del acuífero Almonte-Marismas. Está limitado al norte por

el Arroyo de La Rocina y al sur por la Costa de Castilla y se extiende desde el río Tinto hasta la flecha de la desembocadura del Guadalquivir (figura 1). Esta formación eólica se incluye en el Ecosistema Litoral de Doñana (Montes et al., 1998). Se diferencian hasta cinco mantos eólicos en función de su geomorfología y comportamiento hidrodinámico (Borja et al., 1996). Entre ellos destaca el Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables, donde se localiza el núcleo principal

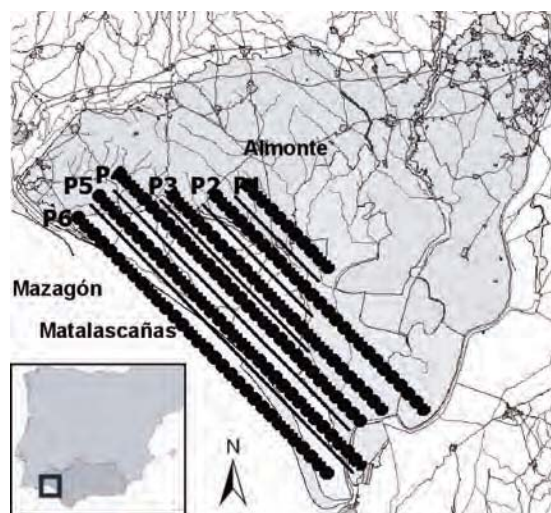


Figura 1: Situación del Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana (MEL) y líneas de vuelo AHS.

del complejo palustre endorreico de Doñana. Existe un inventario recientemente actualizado por Ruiz-Labourdette et al., en prensa. Desde el punto de vista hidrogeológico, se sitúa en el extremo meridional del acuífero Almonte-Marismas, conocido también como acuífero de Doñana o sistema acuífero 27, según antigua nomenclatura del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1992). La presencia del Parque Nacional de Doñana (54252 ha) y del Parque Natural de Doñana (53709 ha), que prácticamente lo circunda, confieren a este entorno una peculiar relevancia ecológica.

Desde el punto de vista geológico, el acuífero está constituido por una alternancia de materiales detríticos con intercalaciones de limos y arcillas depositados durante el Pliocuatrnario sobre un substrato regional de muy baja permeabilidad (formación "margas azules"). Los materiales acuíferos ocupan una extensión de 3400 km², de los que 1800 km² están confinados bajo los sedimentos recientes arcillosos de la marisma (acuífero en carga) y el

resto constituyen el área de recarga del acuífero libre. La recarga natural del acuífero se produce mayoritariamente por infiltración de agua de lluvia local en la zona de acuífero libre, donde afloran las arenas y limos arenosos. Gran parte de la descarga se efectúa por drenaje difuso hacia el mar, ríos y arroyos, a lo largo de los ecotonos entre las arenas y las arcillas de la Marisma, evaporación directa desde el nivel freático cuando está próximo a la superficie, evapotranspiración, y mediante descarga a las lagunas temporales y permanentes localizadas en el MEL. Las descargas no naturales se producen por bombeo para riego y abastecimiento urbano. El acuífero Almonte-Marismas sustenta gran parte de los humedales de esta región (Bravo et al., 1993), que se localizan en pequeñas depresiones del terreno cuando éstas interceptan el nivel freático, o bien surgen a partir de las descargas freáticas del agua subterránea, muchas veces difusas, hacia los arroyos, caños y el ecotono de la Vera. Estas formaciones palustres tienen diferentes tipos de abastecimiento hídrico, aunque la mayoría están relacionados con los sistemas de flujo de aguas subterráneas (Bravo y Montes, op.cit.; Custodio et al., 1995; Lozano, 2004; García Novo, F. y Marín Cabrera, 2005). Su dinámica depende en gran medida de la acusada estacionalidad de las precipitaciones. En el sistema acuífero de Doñana la piezometría regional se adapta con bastante fidelidad a la topografía del terreno, destacando el domo de El Abalarío, al oeste de la Marisma (Manzano et al., 2002).

El clima es de tipo mediterráneo subhúmedo con influencia oceánica. Se caracteriza por la variabilidad intraanual e interanual de las precipitaciones, con una pluviometría anual media que oscila entre 500 y 600 mm. Debido a su extrema irregularidad, las precipitaciones pueden reducirse a la mitad en años secos. La mayor parte de la precipitación anual se produce de octubre a marzo, con precipitaciones mínimas durante el verano, época en las que la mayor parte de la marisma se seca y la superficie inundada se reduce a la lámina de agua de algunas lagunas naturales y a las de las lagunas alimentadas artificialmente.

Sobre el MEL se desarrolla el núcleo principal del complejo palustre. A este rosario de formaciones palustres hipogénicas o alimentadas por aguas subsuperficiales y de carácter temporal o permanente está asociado un tipo de vegetación con requerimientos hídricos mayores (higrofítica). La distribución horizontal de los distintos tipos de

vegetación viene determinada fundamentalmente por la fluctuación de la capa freática (Zunzunegui, 1998), que a su vez, está influida por la topografía. Este tipo de vegetación de matorral natural es característica de la zona (monte negro), de tal manera que su disposición es indicativa de las fluctuaciones de dicho nivel. En el caso de las comunidades existentes en el ecotono de La Vera-Retuerta, éstas dependen de la inundación de la marisma y de las descargas freáticas del agua subterránea hacia esta zona, en la que el afloramiento de la humedad filtrada por las arenas permite una alta productividad vegetal.

El sector oriental del MEL alberga importantes complejos palustres, como el sistema de lagunas peridunares de Santa Olalla situadas en la zona de contacto entre el cordón de dunas semiestables y las arenas estabilizadas, dentro de la Reserva Biológica de Doñana. De estas formaciones palustres cabe destacar: Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Charco del Toro y Brezo, entre otras. Estas lagunas tienen su origen en la descarga del acuífero del sistema dunar por la base de los frentes de avance (Torres et al., 1977). En función de los niveles de encharcamiento aparecen distintas comunidades vegetales. La gradación de especies desde el borde de la laguna hacia el interior se organiza en bandas alrededor de la lámina de agua. Junto al borde se desarrolla un tapiz de herbáceas (*Agrostis stolonifera*, *Cynodon dactylon*, *Panicum repens*, *Mentha pulegium*) y diversas especies de helófitos (*Juncus maritimus*, *Juncus acutus*, *Scirpus holoschoenus*). El pasto perenne y los helófitos se caracterizan por tener humedad prácticamente durante todo el año (encharcamiento en la época invernal y afloramiento de humedad el resto del año). Hacia zonas más externas del borde de la laguna, en las depresiones húmedas y con encharcamiento temporal en invierno, se desarrollan las especies correspondientes al “monte negro”, constituido por una cobertura de especies higrofíticas como el brezo de escobas (*Erica scoparia*), la brecina o mogueriza (*Calluna vulgaris*), el tojo (*Ulex minor*) y el arrayán (*Myrtus communis*) entre otras. Este matorral higrofítico da paso a las especies xerofíticas del “monte blanco” (*Halimium halimifolium*, *Halimium commutatum*, *Cistus libanotis*, *Lavandula stoechas* y *Rosmarinus officinalis*) y al pinar (*Pinus pinea*), que se establecen en las zonas más secas y de topografía más elevada. Entre el matorral xerofítico y el higrofítico existe una transición en función del gradiente topo-

gráfico en donde aparecen especies como el tojo (*Ulex australis*), el brezo de escobas (*Erica scoparia*) y el jaguarzo blanco (*Halimium halimifolium*). La proporción de estas especies viene determinada por el carácter más o menos hidromórfico del suelo (García Murillo y Sousa Martín, 1999).

En la parte más septentrional del MEL, sobre arenas estabilizadas se desarrollan otros complejos palustres como la laguna del Caballo, del Navazo del Toro, del Contrabandista, de la Mata de los Domínguez,... Las cubetas de estas lagunas no son tan profundas como las de las peridunares, lo que origina una mayor temporalidad de las mismas. En el domo del Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables se localiza un importante conjunto de formaciones palustres, conocidas como complejo de El Abalario, que se caracterizan por su marcada temporalidad. La línea de contacto entre el Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables y el Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables, situada dentro del Parque Natural de Doñana, corresponde al conjunto de lagunas turbosas de Ribeteñilos. Estas cubetas mantienen el nivel freático casi en superficie durante prácticamente todo el año y se caracterizan por tener suelos turbosos que favorecen el desarrollo de especies como *Erica ciliaris* y *Ulex minor*. García Murillo y Sousa (op.cit.) destacan la importancia y el interés en la conservación de estas formaciones turbosas de carácter atlántico y de las turberas, en general, tan escasas en

Andalucía y de gran valor por sus rasgos de atlanticidad y por su alto valor biológico debido a su carácter relictico.

MATERIAL

Sensor AHS

El espectrómetro de imagen AHS (Airborne Hyperspectral Scanner, Imaging Group ArgonST (<http://www.argonst.com/>) es un sensor aeroportado tipo "line-scanner" que registra en 80 bandas (tabla 1), dentro de las ventanas atmosféricas, desde el visible al infrarrojo térmico y divide la radiación incidente en 5 espectrómetros o "puertos ópticos" individuales. Este sensor va instalado en un avión y registra datos a lo largo de una línea del terreno de forma perpendicular a la dirección de avance. Sus características técnicas se definen por su resolución espacial, radiométrica y espectral, así como por el tipo de geometría de adquisición (Rejas et al., 2004).

Campañas

Se han realizado tres campañas de vuelos en primavera y septiembre de 2004, y en septiembre de 2005 cubriendo la totalidad del MEL. Se planifica-

	Puerto 1 VIS / NIR	Puerto 2A SWIR	Puerto 2 SWIR	Puerto 3 MIR	Puerto 4 TIR
Rango espectral (µm)	0,442-1,019	1,491-1,650	2,024-2,498	3,03-5,41	7,95-13,17
Ancho espectral (FWHM nm)	28	160	13	30 - 40	400 - 550
$\lambda/\Delta\lambda$ (mínimo)	~16	~9	~156	~9	~17
Nº de bandas	20	1	42	7	10

Tabla 1. Configuración espectral del sensor AHS.

ron 6 líneas de vuelos (figura 1) con una resolución de 6,5 m. En la planificación se tuvo en cuenta la relación entre la superficie de terreno y el número de pasadas, cobertura lateral, solape transversal y rumbo de vuelo respecto al azimut solar. Las campañas de 2004 se realizaron el 27 de abril y el 21 de septiembre, adaptando para cada fecha las horas de vuelo a la posición solar requerida. Se registraron 5 líneas en abril y 6 líneas en septiembre. Para ambas campañas se repitieron dos líneas de vuelo sobre el sector de Santa Olalla en pasadas a 4,5 m de resolución. Debido a problemas técnicos del puerto 2 del sensor, no se registraron datos en el segmento SWIR en ninguna de las dos campañas. La tercera campaña se realizó el 27 de septiembre de 2005, coincidiendo con el máximo estiaje correspondiente a este ciclo seco. La planificación de las pasadas fue similar a las realizadas en el 2004 en lo referente a la cobertura del Manto Eólico.

MÉTODOS

Pre-procesos

Se han aplicado a las imágenes una serie de calibraciones y correcciones necesarias para el análisis de los datos hiperespectrales.

Calibración a radiancia en el sensor

La radiación registrada en cada canal es convertida en una señal eléctrica que es escalada y cuantificada en valores digitales. Estos valores digitales son convertidos a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración del sensor. Los niveles digitales originales se han calibrado mediante coeficientes de calibración de las bandas reflectivas VIS, NIR y SWIR (puertos 1 y 2 y 2A, tabla 1) obtenidos en el Laboratorio de Teledetección del INTA utilizando una "esfera integradora" de calibración USS 400 (*Labsphere*) (<http://www.labsphere.com/>) cubierta con Spectrafect (*Labsphere*) (figura 2).

Calibración a reflectividad en el terreno

De los datos registrados en todas las campañas se han corregido las bandas reflectivas del visible e infrarrojo próximo utilizando la herramienta de

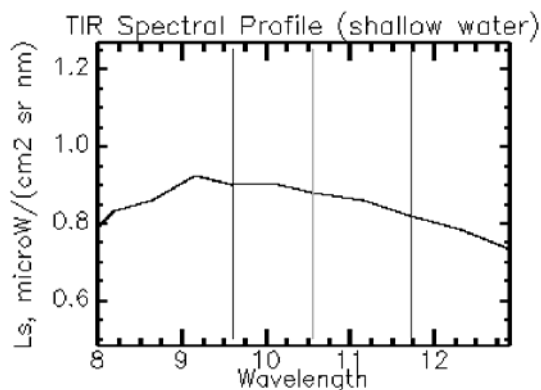


Figura 2: Radiancias en el sensor de las bandas térmicas

corrección radiométrica ATCOR4 para convertir las radiancias en el sensor en valores de reflectividad lambertiana del terreno. Posteriormente se ha aplicado el algoritmo "Empirical Line" (Smith, G. M. & Milton, E. J., 1999) mediante firmas espectrales de superficies "brillantes" y "oscuras" de la zona de estudio, adquiridas en las campañas de espectroradiometría de campo de forma simultánea a cada vuelo (figura 3). Como resultado se han eliminado los efectos atmosféricos y de iluminación diferencial entre pasadas y campañas. Se ha utilizado el espectrorradiómetro ASD FieldSpec del Laboratorio de Teledetección de Estudios Hídricos del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en las campañas de abril de 2004 y septiembre de 2005, y el GER 1500 del Servicio de Teledetección del INTA en la campaña de septiembre de 2004. Las medidas radiométricas para calibrar los datos se han registrado en varias zonas correspondientes a superficies de agua de las lagunas de Santa Olalla y La Dulce, y en las arenas de los mantos eólicos.

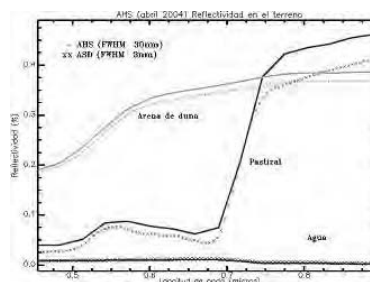


Figura 3. Calibración a reflectividad con firmas del terreno.

Georreferenciación y generación de mosaicos

El sistema inercial de navegación (modulo GPS/INS) instalado en la plataforma aérea es un *Applanix POS/AV 410* (<http://www.applanix.com/>) que proporciona parámetros de posición y actitud del sensor durante el registro de las imágenes. Esto hace posible la georreferenciación de una manera directa sin necesidad de tomar puntos de control de la zona sobrevolada. La corrección de las distorsiones sufridas por las imágenes AHS durante su adquisición debido a los movimientos de la plataforma y del sensor (figura 4), se ha abordado mediante una corrección paramétrica utilizando el software de geocodificación directa *PARGE* (<http://www.rese.ch/products.html>). La georreferenciación de las imágenes mediante este método requiere disponer de los datos de orientación externa medidos en el momento de adquisición, así como con un modelo digital del terreno (MDT) de la zona volada. Los datos de posición (x, y, z) y de alabeo, cabeceo y azimut son registrados por el sistema inercial. Los datos GPS adquiridos han sido procesados por el INTA para el cálculo de la trayectoria aplicando correcciones diferenciales en post-proceso, utilizando para ello dos estaciones de referencia GPS permanentes enmarcadas dentro del Proyecto *IBEREF* (www.iberef-gps.com). El MDT utilizado en el proceso de georreferenciación ha sido generado a partir de la altimetría de las hojas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con paso de malla de 25 metros y remuestreado a 6 metros para las pasadas de 6.5 m y 4 metros para las pasadas de 4.5 m. Una vez realizadas las correcciones radiométricas y geométricas se han generado imágenes georreferenciadas en proyección UTM,

Datum ED50, con un error medio cuadrático (RMS) estimado de 1 a 2 píxeles. Se ha efectuado la composición de los mosaicos correspondientes a partir de las pasadas registradas en cada campaña.

Cartografía de Formaciones Palustres correspondientes al ciclo hidrológico 2004-2005

El ciclo hidrológico 2003-2004 se caracterizó por una gran abundancia de precipitaciones (se alcanzaron 754,9 mm). En la estación meteorológica del Palacio de Doñana el valor de la precipitación acumulada durante el periodo octubre de 2003 - abril de 2004, alcanzó un valor de 690 mm, mientras que entre mayo y septiembre de 2004 la precipitación fue de 65,4 mm (“Datos del Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana”, <http://www-rbd.ebd.csic.es/seguimiento/mediofisico.htm>). El nivel de agua de la marisma y las lagunas adquirió durante la primavera una cota excepcional, alcanzándose el máximo de superficie inundada entre marzo y abril. Aunque este nivel se mantuvo hasta bien entrado el verano, en septiembre la lámina de agua se redujo al cordón de lagunas de Santa Olalla, y a las alimentadas artificialmente del sector de El Acebuche. El registro de dos series completas del MEL con imágenes AHS en las etapas de máxima variación interanual del año 2004 ha permitido cartografiar las fluctuaciones de la lámina de agua para este periodo.

A partir de los mosaicos compuestos con las imágenes AHS georreferenciadas se han realizado los mapas correspondientes a las superficies de lámina de agua de los sistemas lagunares y zonas de encharcamiento. Los resultados muestran que el nivel de la lámina de agua en abril de 2004 fue excepcionalmente alto, tanto en el sector oriental del MEL, correspondiente al Parque Nacional, como en el área central y occidental, correspondiente al Parque Natural, donde se ubican las lagunas temporales de El Abalario. Sin embargo, en la cartografía de las formaciones palustres realizada para esta fecha se pone de manifiesto el estado de desecación de un conjunto de lagunas situadas en el sector más occidental del Parque Natural (laguna del Río Oro, Carrizosa, Jiménez, La Vaca...), en una zona donde se realizan bombeos intensivos de agua subterránea. Así mismo, y a pesar del alto nivel de inundación de esta fecha, se han identificado niveles particularmente bajos en las lagunas del extremo occidental del cordón de lagunas peri-

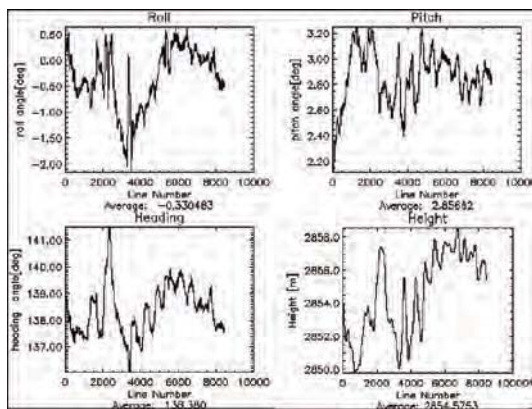


Figura 4: Ángulos de la plataforma medidos por el POS/AV 410 para la pasada central a 6.5 m.

dunares de Santa Olalla, en áreas próximas a Matalascañas. El cálculo realizado a partir de estas cartografías ha permitido establecer que en abril de 2004 la lámina de agua alcanzaba 747,68 ha, mientras que en septiembre dicha superficie se redujo a 63,82 ha. La imagen AHS registrada el 27 de septiembre de 2005, al final del ciclo hidrológico seco 2004-2005, muestra una situación muy diferente a las registradas en el año 2004. La cartografía de la lámina de agua para esta fecha muestra un descenso drástico de las lagunas temporales y permanentes, cuya superficie disminuyó a 7,17 ha.

El control de la evolución de los niveles piezométricos del acuífero Almonte-Marismas se realiza mediante una red general que depende de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en la que participan otros organismos de la administración estatal y regional. El IGME dispone de una red específica de sondeos piezométricos multitubo en el entorno del complejo lagunar de Santa Olalla-Charco del Toro (figura 5). Estos piezómetros monorejilla, con filtro a diferentes profundidades, están equipados con sensores de nivel con registro continuo para estudiar la evolución piezométrica del acuífero, en la vertical del punto, con diferente carga hidráulica. La figura 6 muestra para el periodo 2004-2005 los registros piezométricos de 6 sensores de nivel instalados por el IGME en el entorno de las lagunas. Se observa un descenso generalizado desde mayo de 2004 (final interanual húmedo) hasta septiembre de 2005 (final interanual seco) de casi 2 m debido a la escasez de lluvias. El período enero de 2004 - enero de 2005 muestra unos descensos comprendidos entre 65 cm (Raya del Corte y Toro) y 120 cm (Taraje). El efecto sierra que se pone de manifiesto en los registros de la Raya del Corte durante el periodo estival, se debe a los bombeos de Matalascañas, observándose claramente cómo dichos niveles empiezan a recuperarse desde finales de agosto debido a la disminución de dichos bombeos.

Tratamiento de datos Hiperespectrales AHS

El sensor hiperespectral AHS registra la radiación procedente del suelo en bandas espectrales continuas de manera que es posible reconstruir la curva espectral de reflectividad de las distintas cubiertas observadas una vez convertidos los valores de radiancia en reflectividad. Este tipo de información permite cuantificar determinadas propieda-



Figura 5: Situación de la red de sondeos en el sector de Santa Olalla.

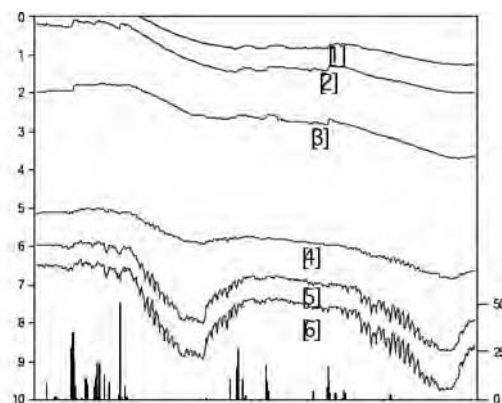
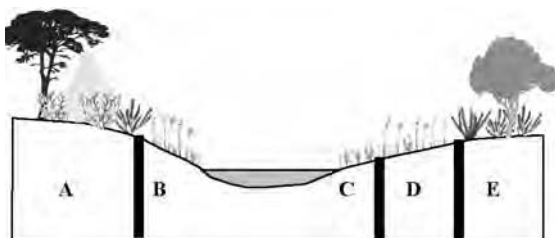


Figura 6: Precipitación y niveles del acuífero en 6 piezómetros del sector Santa Olalla durante 2004-2005.

des biofísicas de los materiales en base a las características de absorción y reflexión de sus superficies.

Las medidas de las cubiertas vegetales se han basado en la distribución horizontal de la vegetación: desde los pastizales y helófitos del borde de la laguna de Santa Olalla al matorral higrofito y al xerófito en las zonas de topografía más elevada (figura 7). Se han tomado medidas sobre helófitos (*Juncus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*) y pastizales (*Panicum repens*, *Agrostis stolonifera*, *Cynodon dactylon*) en las zonas de borde de las lagunas, en áreas de monte negro (*Erica scoparia*, *Ulex minor*, *Pteridium aquilinum*, *Pistacia lentiscus*, *Rubus ulmifolius*, *Smilax aspera*, *Ulex australis*) y en monte blanco (*Halimium halimifolium*, *Stauracanthus genistoides*, *Rosmarinus officina-*

lis). Además de la propia lectura radiométrica, se ha incluido en cada punto de medida la identificación de la especie, estado fisiológico y fenológico, fracción de cubida cubierta, así como lectura gps y fotografía digital.



- A: *Halimium halimifolium*, *Halimium commutatum*, *Cistus libanotis*, *Lavandula stoechas*, *Rosmarinus officinalis*, *Juniperus phoenicea*, *Pinus pinea*
- B: *Juncus acutus*, *Scirpus holoschoenus*, *Juncus mari-timus*, *Juncus effusus*, *Panicum repens*, *Cynodon dactylon*
- C: *Agrostis stolonifera*, *Panicum repens*, *Cynodon dactylon*, *Mentha pulegium*
- D: *Juncus acutus*, *Scirpus holoschoenus*, *Juncus mari-timus*, *Juncus effusus*, *Panicum repens*, *Cynodon dactylon*
- E: *Ulex minor*, *Erica scoparia*, *Rubus ulmifolius*, *Pistacia lentiscus*, *Phyllirea angustifolia*, *Myrtus communis*, *Smilax aspera*, *Pteridium aquilinum*, *Ulex australis*, *Quercus suber*

Figura 7. Distribución espacial de la vegetación en los mantos eólicos húmedos (de Sousa, A. 2004, modificado).

El estudio de la espectroradiometría de campo ha permitido poner de manifiesto diferencias entre las firmas espectrales registradas en abril y septiembre de 2004, en el rango correspondiente al visible e infrarrojo cercano (400-920 nm) (figura 8). Los valores de reflectividad correspondientes al brezal y al monte blanco son intermedios en el segmento visible, mientras que los helófitos muestran valores más bajos. El pastizal es el que presenta valores más altos en este segmento, especialmente en la firma correspondiente al mes de septiembre. Esto podría explicarse porque los pastizales asociados a las formaciones palustres y a los rezumes del acuífero en la Vera no se han agostado en esta fecha y presentan un mayor desarrollo foliar. En septiembre, los valores son mayores en el brezal higrofitico que en el monte blanco, mientras que en abril la situación es inversa.

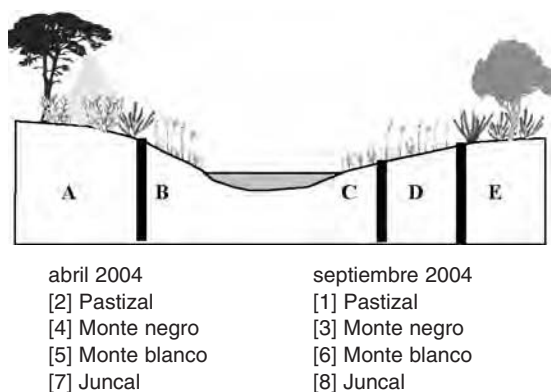
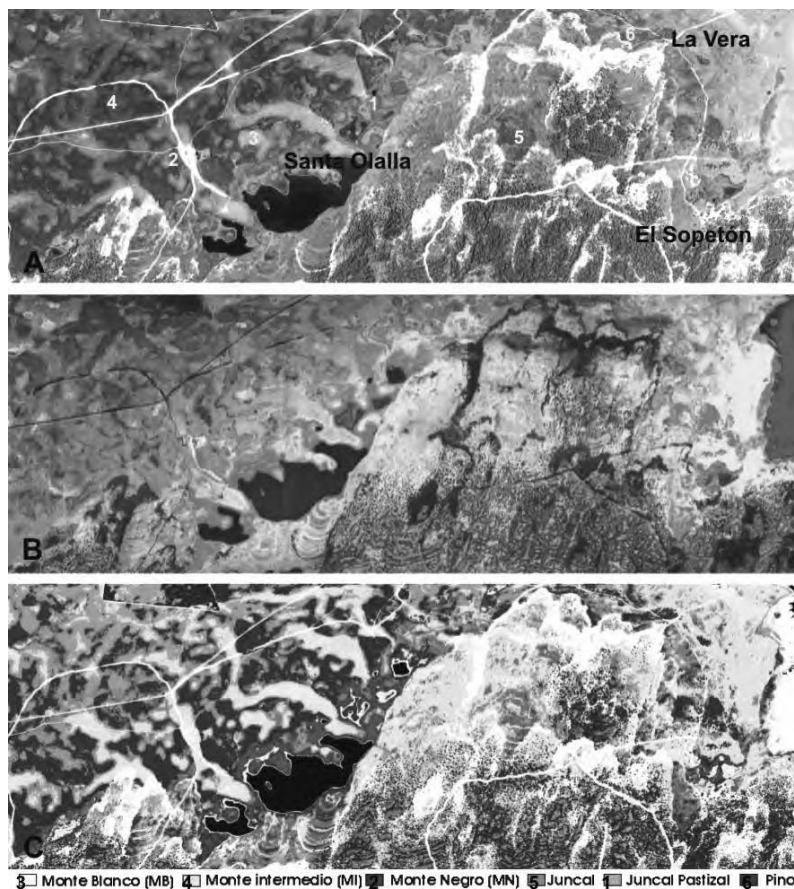


Figura 8: Firmas espectrales de las distintas comunidades vegetales en abril y septiembre de 2004.

Debido a la falta de registro en el infrarrojo SWIR por fallo del puerto 2, sólo se ha utilizado el segmento visible e infrarrojo cercano de las curvas de reflectividad para el análisis de los datos AHS. En base a la comparación de las curvas de reflectividad de las distintas cubiertas, se ha seleccionado la imagen AHS de septiembre de 2004, fecha en la que la vegetación higrofitica presenta mayores diferencias de reflectividad respecto a la vegetación xerofítica. Como zona de referencia se ha elegido el sector correspondiente a las lagunas peridunares de Doñana (Santa Olalla, Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Charco del Toro y Brezo) (figura 10 A) por ser el área en la que se han realizado un mayor número de medidas espectrales de las distintas comunidades vegetales. A los datos AHS, una vez calibrados y transformados a reflectividad, se ha aplicado el algoritmo Minimum Noise Fraction (MNF) (Green, 1988) para determinar su dimensionalidad y eliminar el ruido. Las bandas resultantes expresan bien los tipos de cubiertas existentes en la zona, tal y como se observa en la figura 10B que es una combinación en color de las bandas MNF432 (RVA).

En la etapa siguiente se ha tratado de determinar los componentes puros o *endmembers* a partir de los que se clasifica la imagen. Estos miembros puros o extremos forman las distintas mezclas de que se componen los píxeles de la escena. Para ello se han realizado tres aproximaciones; en la primera, la determinación de los *endmembers* se ha llevado a cabo aplicando el algoritmo PPI (Pixel Purity Index) sobre las diez primeras bandas resultantes de la transformación MNF. En la segunda se han utilizado las curvas registradas sobre el terreno en septiembre y en la tercera se han seleccionado las firmas sobre la propia imagen con el apoyo

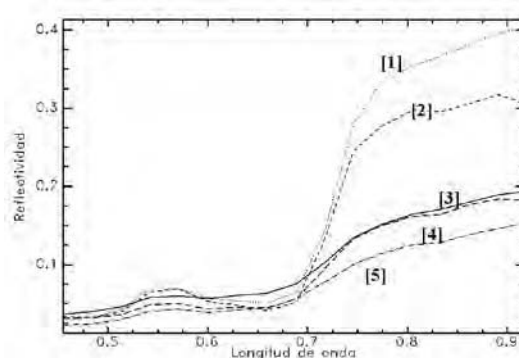


*Figura 10. A: Composición AHS falso color sector Santa Olalla. B: Minimum Noise fraction. C: Clasificación angular (SAM).

de las observaciones de campo y la ortofoto 1:10.0000. En la figura 9 aparecen los *endmembers* utilizados en la clasificación angular SAM (Spectral Angle Mapper) (Kruse et al., 1993) que corresponden a signaturas de campo y a las generadas a partir de la imagen. Este clasificador calcula la similitud del píxel y el espectro de referencia a partir de su desviación angular, de manera que se minimizan las diferencias de iluminación y albedo. El resultado aparece como un mapa temático con la distribución espacial de las comunidades vegetales de interés: monte negro, monte intermedio, monte blanco, juncal, juncal-pastizal (figura 10C).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir de las correcciones geométricas aplicadas se han generado imágenes georreferenciadas en



[1] Pasto Juncal [2] Monte negro
[3] Monte blanco [4] Monte intermedio
[5] Juncal

Figura 9. Selección de miembros puros (AHS-sept 2004).

* Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

proyección UTM, Datum ED50 con un error medio cuadrático (RMS) estimado de 1 a 2 píxeles.

El registro de dos series completas del MEL con imágenes AHS en las etapas de máxima variación interanual del año 2004, ha permitido la cartografía de la fluctuación de la lámina de agua para este período. Las imágenes registradas en abril de 2004, a pesar del alto nivel de inundación en esta fecha, ponen de manifiesto la desecación de lagunas en sectores próximos a zonas donde se realizan bombeos del acuífero. Las imágenes registradas en septiembre de 2004 reflejan la temporalidad de la mayor parte de estas formaciones palustres y ponen de manifiesto los rezumes de los mantos eólicos en el ecotono de La Vera.

La imagen AHS de septiembre de 2005 coincide con el máximo estiaje correspondiente al 2004-2005, que ha sido el ciclo hidrológico más seco del registro total histórico de la estación meteorológica del Palacio de Doñana ("Datos del Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana", <http://www-rbd.ebd.csic.es/seguimiento/mediofisico.htm>). La situación de las formaciones palustres en esta fecha es muy diferente a la del año 2004, observándose una desaparición generalizada de la lámina de agua de las lagunas. Esta sequía, junto con la presencia de varios días de helada durante el invierno de 2005 y el descenso en los niveles freáticos locales, han provocado importantes daños en la vegetación de matorral y arbórea en Doñana (Díaz-Delgado, R., 2006).

El análisis de los datos AHS, a pesar del reducido rango espectral utilizado a causa del fallo del puerto 2, ha permitido realizar una caracterización espectral de determinadas cubiertas vegetales higrófitas de marcado interés por su relevancia ecológica. Se ha podido cartografiar los principales tipos de comunidades vegetales que se desarrollan en los mantos eólicos estabilizados a partir del algoritmo de clasificación angular (SAM). La vegetación higrófitica está condicionada por la distancia de sus sistemas radicales a la capa freática, de manera que la ausencia de precipitaciones unida a las extracciones intensivas de agua subterránea puede originar la desaparición de estos humedales y de la vegetación asociada. La técnica empleada para cartografiar estos humedales y el estudio y seguimiento de su evolución es de gran ayuda para el manejo de ecotonos sometidos a una gran presión.

Dada la importancia e interés en la conservación de las lagunas turbosas de Ribetehilos, por su carác-

ter relíctico y por sus rasgos de atlanticidad, se ha planteado como línea a seguir el estudio de la cartografía de la vegetación higrófitica asociada a estas formaciones a partir de la imagen AHS y de la espectroradiometría de campo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Ramón Peña, Antonio Ruiz-Verdú y José Antonio Domínguez y del Laboratorio de Teledetección del CEDEX el registro de la radiometría de campo durante la campaña de abril.

REFERENCIAS

- ANTÓN-PACHECO, C., ROWAN, L. C., MARS, J. C. Y GUMIEL, J. C. 2002. Characterization of mine waste material and hydrothermally altered rocks in the Riotinto mining district (southwest Spain) using Hymap data. *Revista de Teledetección*, 16, pp. 65-68.
- BORJA, F. & DÍAZ DEL OLMO, F. 1996. Manto Eólico Litoral (MEL) de El Abalario (Huelva, España): episodios morfogénicos posteriores al 22.000 BP. Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios, Pérez, A. et al., (Eds). *Actas del Simposio Paleoambiente Cuaternario de la Península Ibérica*: 375-390.
- BRAVO, M. A., & MONTES, C. 1993. Inventario de las formaciones palustres del manto eólico del Parque Nacional de Doñana (SW España). *Acta VI Congreso español de Limnología*: 31-43.
- CUSTODIO, E. y PALANCAR, M. 1995. Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*, 3340: 31-53.
- DÍAZ-DELGADO, R. 2006. Evento de mortalidad en la vegetación terrestre del Parque Nacional de Doñana. Estación Biológica de Doñana. <http://www-rbd.ebd.csic.es/seguimiento/mediofisico.htm>
- GARCÍA, P. & SOUSA, A. 1999. El paisaje vegetal de la zona oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva). *Lagascalía*, 21 (1): 111-132.
- GARCÍA, F. & MARÍN, C. 2005. Doñana, Agua y Biosfera. *Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente, UNESCO*.
- GREEN, A. A., BERMAN, M., SWITZER, P. and CRAIG, M. D. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality

- with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26: 65-74.
- IGME. 1992. *Hidrogeología del Parque Natural de Doñana y su entorno*. 64 pp. 1 mapa.
- KRUSE, F.A., BOARDMAN, J. W., LEFKOFF, A. B., HEIDEBRECHT, K. B., SHAPIRO, A. T., BARLOON, P. J., and GOETZ, A. F. H. 1993. The Spectral Image Processing system (SIPS) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44:145-163.
- LOZANO, E. 2004. Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. E.T.S.I.C.C. y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña. 316 pp. más anexos.
- MANZANO, M. BORJA, F. y MONTES, C. 2002. Metodología de tipificación de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3): 313-330.
- MONTES, C., BORJA, F., BRAVO, M. A., y MOREIRA, J. M. 1998. *Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos. Doñana*. Conserjería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. 311 pp. 1 mapa.
- MORENO, M. T., ANTÓN-PACHECO, C y GUMIEL, J. C. 2004. Detección de las variaciones estacionales de las lagunas peridunares de Doñana a partir de imágenes Landsat e imágenes DS 1268 ATM. *Geo-Temas*, 6 (2): 353-356.
- REJAS, J. G., PRADO, E., JIMÉNEZ, M., FERNÁNDEZ-RENAU, A., GÓMEZ, J. A. y DE MIGUEL, E. 2004. Caracterización del sensor hiperespectral AHS para la georreferenciación directa de imágenes a partir de un sistema inercial GPS/IMU. 6 Semana Geomatica, 22-23 September 2003, Castelldefels, Spain.
- RUIZ-LABOURDETTE, D., COLETO, C., BRAVO, M. A., BORJA, F., BORJA, C., y MONTES, C. en prensa. *Mapa del Complejo Palustre de los Arenales Litorales de Doñana*. Junta de Andalucía. 1 CD
- RUIZ-VERDÚ, A., DOMÍNGUEZ, J. A. Y PEÑA, R. 2001. Teledetección aeroportada hiperespectral del embalse de Ribarroja», *Revista de Teledetección*. 16:69-72.
- SOUSA MARTÍN, A. 2004. *Evolución de la vegetación higrofitica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. 2 tomos. 935 p.
- ZUNZUNEGUI, M., DÍAZ BARRADAS, M. C., y GARCÍA NOVO, F. 1998. Vegetation fluctuation in mediterranean dune ponds in relation to rainfall variation and water extraction. *Applied Vegetation Science*, 1: 151-160.
- SMITH, G. M. and MILTON, E, J. 1999. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 26553-2662, 1999.