

Variabilidad hídrica y edáfica de humedales peninsulares interiores a partir de imágenes Landsat (TM y ETM)

MARÍA PILAR GARCÍA RODRÍGUEZ,
MARÍA EUGENIA PÉREZ GONZÁLEZ Y JUAN JOSÉ SANZ DONAIRE*

INTRODUCCIÓN

Los humedales, independientemente de los diversos criterios de apreciación, son considerados áreas de interés internacional desde 1962 (Conferencia Mar); esto fue ratificado en 1972 por el Convenio Ramsar.

Los humedales analizados en el presente trabajo, todos ellos situados en áreas endorreicas y en algunos casos con aportes de aguas subterráneas, muestran una alta variabilidad espacio-temporal, en relación a los diferentes aportes hídricos de las lagunas; normalmente no superan los dos metros de profundidad, con notables variaciones interanuales e intranuales y están caracterizados por la presencia de vegetación higro-halófito. Tradicionalmente, se han estudiado mediante fotointerpretación y trabajo de campo, pero las imágenes de satélite ofrecen información adicional a partir de otros canales del espectro electromagnético. Así se obtiene una valiosa información de las características subsuperficiales (humedad, temperatura, presencia de materia orgánica, etc.), no perceptibles en las fotografías aéreas convencionales. Sin embargo, para conocer bien la evolución de las lagunas se han realizado estudios y muestreos de campo que complementan la información obtenida por los satélites.

* Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid. Proyecto CICYT AGL 2002-02294, mpgarcia@ghis.ucm.es.

Las lagunas estudiadas pertenecen a diferentes Comunidades Autónomas, muestran variaciones considerables en el contenido y calidad del agua y tienen diversas fuentes de alimentación hídrica: pluvial, fluvial, kárstica y/o pseudokárstica. Estos humedales, de acuerdo con el régimen termo-pluviométrico de la Península Ibérica (con sequía estival) pierden su lámina de agua, precipitándose las sales que llegan a ocupar diferentes extensiones superficiales, conforme a las características hídricas de cada uno (Gracia Prieto, 1990 y 1993; Sanz y Díaz, 1992; Fornés, 1994; Peinado, 1994; Pérez, 1995; Sánchez, 1997 y García y Pérez, 2001).

En el presente estudio se comparan las imágenes TM y ETM de los satélites Landsat 5 y 7 con el fin de analizar los valores digitales en diferentes humedales del interior peninsular español. Ambos sensores permiten efectuar análisis multitemporales, a lo largo de una década, ya que tienen los mismos canales espectrales en las bandas visibles e infrarrojas próximas y medias. El sensor ETM tiene además una mayor resolución en los canales térmicos y una banda pancromática con resolución de 15 metros.

OBJETIVOS

Como objetivo primordial del estudio se pretende conocer si los cambios en el contenido en sales de las lagunas afectan a los valores espectrales registrados por los sensores y cómo quedan éstos reflejados en las imágenes de los satélites. Numerosos autores han analizado mediante imágenes de satélite la presencia de sales en suelos (Mulders, 1987; Mougenot, 1993; Taylor *et al.* 1994; Qingxi *et al.* 1997; García y Pérez, 1999; Koch *et al.*, 2001; Gumuzzio *et al.*, 2001; Castañeda *et al.* 2001; Metternicht y Zinck, 2003, Schmid, 2004, etc.), señalando la dificultad de identificar la composición de las mismas mediante los sensores tradicionales. No es objetivo de este trabajo determinar la composición de las sales mediante sensores remotos, sino conocer si éstos son capaces de discriminar los humedales salinos de los que no lo son y analizar qué lagunas tienen aportes de aguas subterráneas.

Los procesos de salinización son mecanismos complejos unidos a variaciones estacionales en el contenido de agua. Estas variaciones son debidas a la meteorología y climatología local, al uso del suelo y de las lagunas y a las oscilaciones de los niveles piezométricos. Algunos de estos humedales están fuertemente antropizados (Taray y Peña Hueca, provincia de Toledo), por lo que se alteran los volúmenes de agua.

Este trabajo pretende exponer cuáles son las respuestas espectrales y visuales, a partir de los datos de los satélites, de los humedales con diferente contenido en sales. El análisis multitemporal de un contrastado conjunto de lagunas interiores en ambiente semiárido mediterráneo, tanto *in situ* con medidas de cantidad y calidad del agua, clasificación de suelos, análisis de la vegetación higrohalófito, descripción de formas salinas (Fornés, 1994; Peinado, 1994; Pérez, 1995 y Sánchez, 1997), como mediante interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas, ha permitido comprobar que la relación salinidad-reflectividad no es siempre proporcional, sino que está sujeta a otros factores (humedad, extensión superficial de la costra salina, tamaño de los cristales, sustrato subyacente, temperatura del suelo, etc.). Por otro lado, no es posible calcular el contenido de sales disueltas en el agua, por lo que cuando las lagunas tienen agua (imágenes de invierno), todos los humedales muestran valores espectrales similares, diferenciándose solamente por la altura del agua y las características del sustrato; debido a esto, es necesario seleccionar imágenes de verano, cuándo las lagunas carecen de lámina de agua y se aprecian las formaciones salinas en superficie.

ÁREAS DE ESTUDIO

Se han seleccionado varios humedales de diferente origen, cantidad y calidad de agua, tipo de sustrato, tipo de vegetación hidro-halófito, aportes hídricos y utilización antrópica, situados en las Comunidades Autónomas de Madrid, Castilla-La Mancha y Aragón (fig.1).



Figura 1. Localización de los humedales

Por esta razón es necesario explicar las características físicas de cada una de ellas. Un resumen de las mismas está recogido en los cuadros 1 y 2.

CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES

Humedal	Origen	Características hídricas	Sustrato
El Taray (Toledo)	Pseudokárstico-fluvial	Dulce-salobre	Cuaternario
Peña Hueca (Toledo)	Karstico	Hipersalina	Triásico
Tirez (Toledo)	Reverso de cuesta	Hipersalina	Triásico
Las Esteras (Madrid)	Endorreica	Salobre	Terciario
Gallocanta (Zaragoza -Teruel)	Tectónico	Salina	Triásico y Cuaternario

CUADRO 2. ALTURA Y ESTACIONALIDAD DE LA LÁMINA DE AGUA DE LAS LAGUNAS.

ELABORACIÓN PROPIA

Nombre	Mínimo (m)	Máximo (m)	Estacionalidad
El Taray (TO)	0	2, 0	Sep.-Julio
Peña Hueca (TO)	0	0, 5	Sep/Nov- May/Jun
Tirez (TO)	0	0, 4	Sep/Nov- May/Jun
Las Esteras (M)	0	0, 3	Sep/Nov- May/Jun
Gallocanta (Z -TE)	0	0, 2	Nov.- Jun/Julio

En el interior peninsular, al sudeste la provincia de Toledo (La Mancha), se dan cita varios humedales de distinto origen, profundidad de la lámina de agua, estacionalidad de la misma y contenido en sales en un área aproximada de 5360 ha. Se han escogido tres lagunas representativas de estas características y definidas por sus diferentes respuestas espectrales: El Taray, Peña Hueca y Tirez.

Este sector de La Mancha se localiza en el contacto entre el paleozoico y la cuenca sedimentaria mesozoica y cenozoica. La presencia de materiales triásicos ricos en carbonatos y sulfatos cálcicos y magnésicos, y sedimentos terciarios, constituidos por margas y yesos, son las principales fuentes de aportes de sales a las aguas superficiales. La fuerte evaporación unida a las escasas precipitaciones llevan a su acumulación en la superficie de las lagunas.

La laguna del Taray está localizada en la llanura de inundación de la confluencia de dos ríos (Riánsares y Cigüela). Además de su origen fluvial, tiene aportes de aguas subterráneas y subsuperficiales a través de numerosas torcas o dolinas pseudokásticas, formadas a partir de la disolución de los yesos. El conjunto de aportes hídricos, junto a la modificación topográfica

del vaso lagunar por parte del hombre, dan lugar a que esta laguna presente el mayor volumen de agua de todos estos humedales. No obstante, la lámina de agua está condicionada por la climatología y meteorología local, con máximos en la altura de agua a finales del invierno (en torno a 2 m en años muy húmedos) y mínimos estivales (< 20 cm), llegando a su desecación los años de mayor sequía (1992-1995, 2005). Los distintos aportes hídricos y su escasa estacionalidad le confieren a la laguna un carácter entre dulce y salobre.

Las lagunas de Tirez y Peña Hueca están situadas sobre materiales mesozoicos, arcillas del Triásico y calizas jurásicas, que le aportan sales a las lagunas (cloruro sódico y sulfato magnésico principalmente). Los vasos lagunares se rellenan con aportes de agua de lluvia y ocasionalmente con aguas subterráneas, por lo que la lámina de agua tiene una elevada estacionalidad anual, con una altura que no suele superar los 50 cm, debido a que las dos lagunas tienen un fondo muy plano, las precipitaciones anuales son escasas (unos 400 mm) y las aguas subterráneas están sobrexplotadas. Además, la laguna de Peña Hueca ha tenido aportes adicionales de pozos próximos hasta hace apenas dos años, aguas que se mantenían en el vaso lagunar hasta su saturación, momento que se extraía la salmuera para su uso en el proceso de obtención del azúcar de la remolacha. La adquisición de la laguna por parte de la "Fundación Global Nature" ha frenado su explotación y le ha devuelto, de momento, sus ciclos hídricos "naturales". Frente a la esperada recuperación de esta laguna, muy próxima a ella, la laguna hipersalina de Tirez, está sufriendo un proceso inverso: se ha mantenido hasta el inicio del siglo XXI sin explotación antrópica reciente, con una elevada estacionalidad "natural", pero en los últimos años se han empezado a construir pozos a su alrededor y a parcelar muy tímidamente.

En la cuenca del río Tajo, en el sudeste de la provincia de Madrid, se localiza la laguna de Las Esteras, a unos 40 km de la capital en el término municipal de Colmenar de Oreja. Este humedal forma parte de un Espacio protegido por la Comunidad Autónoma de Madrid. Se ha originado por antiguos procesos fluviales, en una cuenca cerrada. Se sitúa sobre sedimentos terciarios y cuaternarios, ricos en yesos y margas, que aportan sulfatos a las aguas de la laguna. En sus proximidades se encuentra una fábrica que explota estos sulfatos cálcicos. La laguna es pequeña, con una extensión del vaso lagunar de 12 ha y el agua es ligeramente salina. Es estacional con una lámina de agua somera entre los meses de septiembre y mayo (Tabla 2). En este área la ETP es muy superior a las precipitaciones (700-770 mm frente a 440-490 mm, con una temperatura media anual de 14° C y una media esti-

val de 22° C). Los suelos son pobres y poco evolucionados correspondiendo a unidades de leptosoles y gipsisoles. La vegetación es muy pobre, xerófila, constituida por matorrales gipsícolas con dominio de los géneros *Spartum* y *Gypsophila*.

Por último, se ha escogido también una laguna enclavada en la cuenca del río Ebro, representativa de los humedales de origen tectónico, de gran dimensión (más de 7 km de largo y un máximo de 2 km de ancho), siendo la laguna endorreica más grande de la Península Ibérica. La laguna de Gallocanta, situada entre las provincias de Zaragoza y Teruel, constituye uno de los espacios de paso e invernada más importante para las grullas (*Grus grus*). Está localizada en una fosa tectónica entre la sierra paleozoica de Santa Cruz (al NE) y relieves cretácicos (al SW). Aunque en publicaciones anteriores se citan alturas de la lámina de agua en torno a los 2 m (Gracia Prieto, 1990 y 1993), en la actualidad esta laguna no alcanza más que una somera lámina de agua, con alta estacionalidad (Pérez *et al.*, 2001). Junto a los aportes pluviales, la alimentación hídrica es también debida a aportes de origen kárstico, por lo que uno de los puntos más representativos de la misma lo constituyen los denominados "Ojos", surgencias de aguas subterráneas; esta expresión "ojos" se emplea en otras muchas lenguas del área mediterránea, como en el lenguaje bereber de Marruecos, en los que se los llama "titawen" de donde proviene *Tetuan*, o en Arabia donde se emplea el término "ain", cuyo plural es "aioun" de donde deriva *Aaiún*, ciudad del Sahara.

Los sedimentos sobre los que se asienta la laguna corresponden a materiales triásicos y cuaternarios, de tamaño fino, mezclados con cantidades significativas de materia orgánica aportada por las algas; los materiales mesozoicos aportan las sales que, al secarse la lámina de agua, forman eflorescencias de tamaño milimétrico. El área salina, en las épocas estivales (julio 1999) alcanza una extensión de 850 ha.

MATERIAL Y MÉTODOS

El análisis de los humedales se ha realizado a partir de fotografías aéreas, imágenes de satélite y trabajo de campo. Se han utilizado todas las fotografías aéreas existentes, que abarcan escalas y fechas contrastadas (cuadro 3). Las fotografías aéreas pancromáticas sólo diferencian la presencia y extensión de la lámina de agua, y la presencia/ausencia de sales en superficie durante el estío. Sin embargo, la localización de algunas lagunas hipersalinas (salmueras) están

vinculadas a aportes de aguas subterráneas, que permiten el lavado y posterior precipitación de los materiales triásicos que conforman los vasos lagunares y su cuenca de avenamiento. La distribución espacial de estos materiales y la presencia de humedad en el suelo pueden ser obtenidas a partir de la información de las imágenes de satélite, que ofrece información visual y digital tanto en los canales visibles como en los infrarrojos. La información obtenida ha sido contrastada con el trabajo de campo.

CUADRO 3. FOTOGRAFÍAS AÉREAS PANCRÓMICAS ESTUDIADAS

Nombre de la laguna	Mapa topográfico	Escala	Fecha
El Taray, Peña Hueca y Tirez (TO)	687	1:40 000	Abril- 1991
	687	1:30 000	Oct-1984
	687	1:18 000	Ago-1984
Las Esteras (M)	606	1: 5 000	Jun- 1991
Gallocanta (Z -TE)	464, 490 y 491	1:30 000	Jul- 1984

Para analizar la variabilidad hídrica y edáfica de las lagunas se han escogido diferentes imágenes del satélite Landsat, de los sensores TM y ETM. Atendiendo a la características abióticas de las lagunas y a la climatología y meteorología de las diferentes comarcas españolas se han seleccionado distintas fechas. Para los humedales manchegos se escoge una imagen de invierno de un año muy húmedo (1997) y otra de un año húmedo (1999), en los que las distintas lagunas registran los máximos volúmenes de agua; e imágenes de verano, de un año extremadamente seco (1995). Las características intermedias de estos humedales, entre inundación y desecación parcial o total, quedan recogidas en las imágenes de otoño (1992), en la que el sustrato queda bien reflejado. En el caso de la laguna de Gallocanta se ha seleccionado un año pluviométricamente normal, del que se disponen además datos de campo (García y Pérez, 2001), en el que se analizan diferencias estacionales. Por último, de la Comunidad de Madrid se dispone de dos imágenes de verano con características pluviométricas contrastadas (1987, año húmedo, especialmente durante la estación estival, y 1999, seco), en los que los procesos de salinización alcanzan diferente desarrollo. Así, de todas las lagunas se tiene al menos una imagen de verano, época en la que el volumen de sales superficiales es más elevado. Las fechas seleccionadas de los diferentes humedales y su localización geográfica quedan recogidas en la Tabla 4.

Además de los datos aportados por los satélites disponemos de numerosos datos recogidos en campo a los largo de más de una década de estudio sobre el funcionamiento y variabilidad de los humedales, calidad del agua,

estudio edáfico, geomorfológico, microclimático y cambios de usos del suelo (Peinado, 1994, Morillo y González, 1997, Pérez, 1995 y Pérez *et al.*, 2000).

CUADRO 4. IMÁGENES SELECCIONADAS

Satélite y sensor	Escena	Fecha	Localización
Landsat 5-TM	201-32	11-8-1987	Madrid
Landsat 5-TM	201-33	5-11-1992	Toledo
Landsat 5-TM	201-33	26-8-1995	Toledo
Landsat 5- TM	201-33	20-2-1997	Toledo
Landsat 5- TM	200- 31/32 (flotante)	30-3-1999	Zaragoza y Teruel
Landsat 5- TM	200- 31/32 (flotante)	4-7-1999	Zaragoza y Teruel
Landsat 5- TM	200- 31/32 (flotante)	9-11-1999	Zaragoza y Teruel
Landsat 7-ETM	201-32	20-8-1999	Madrid y Toledo

Para el tratamiento visual y digital de las imágenes TM y ETM se ha utilizado el programa ERDAS Imagine 8.3.1 para Windows. Las imágenes originales han sido corregidas geométricamente a coordenadas UTM mediante numerosos puntos de control para cada imagen; estos puntos han sido tomados a partir de los mapas topográficos escala 1:50.000 con coordenadas UTM editados por el Servicio Geográfico del Ejército.

Con el fin de mejorar el análisis visual se han realizado mejoras radiométricas, espaciales y espectrales. Las mejoras radiométricas son: ecualización del histograma y reducción de ruido. Las mejoras espaciales son: filtros estadísticos (mediana y medias con tamaño de ventana de 5 x 5 y 7 x 7), y filtros no direccionales. En cuanto a las mejoras espectrales se han escogido las que ofrecen mayor discriminación: Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI), composición hidrotermal (bandas 5/7; 3/1; 4/3) y color natural. De todas ellas se han seleccionado las imágenes en color natural (bandas 3-2-1, asignándole los cañones de color R-G-B) y las imágenes en falso color (4-3-2), por ser las que mejor reflejan las variaciones en el estado de las sales en las diferentes lagunas. Para el estudio digital se han realizado perfiles espectrales de todos los canales de los sensores TM y ETM, excluyendo las bandas térmicas, pues ya han sido objeto de otros trabajos (Pérez y García, 1999 y 2000).

RESULTADOS

El motivo principal del análisis visual y digital de estos humedales es tratar de resolver la aparente contradicción entre el carácter hipersalino de

algunas lagunas que, en la época estival, forman depósitos salinos superficiales de gran extensión y que, sin embargo, en las imágenes de satélite no quedan reflejadas. *A priori*, cabría esperar que la máxima reflectividad (números digitales elevados) se produzca en las lagunas más salinas y en los meses y años más secos, cuando la costra de sal adquiere mayor espesor y extensión superficial, con cristales bien desarrollados. Esta hipótesis se confirma al observar lagunas salobres (con una salinidad intermedia entre las dulces y las salinas) en distintas fechas del año, ofreciendo valores altos de reflectividad en todas las bandas de los sensores en los meses de verano; esta reflectividad es mayor en los años más secos. Pero, contrariamente a lo que podría esperarse, las imágenes de las lagunas hipersalinas reflejan, en años muy secos, altos contenidos de humedad, por lo que los valores digitales son bajos y, en años húmedos, con escasa superficie de sales, muestra valores digitales muy altos y tonos blancos. En estas lagunas la formación de costras salinas en superficie impide o retrasa la evaporación del agua de todo el perfil del suelo; así las imágenes de satélite presentan valores digitales bajos en todos los canales, indicando la presencia de una alta humedad edáfica, no visible en superficie. La humedad edáfica se ve favorecida por la presencia de aguas subterráneas o subsuperficiales, que sin aflorar a la superficie durante el verano, impiden la evaporación total del agua del suelo. Por el contrario, durante los años muy húmedos, (en los que se produce una intensa extracción de las aguas subterráneas), los humedales salinos presentan en verano escaso desarrollo de depósitos salinos y las imágenes de satélite muestran las lagunas con tonos muy blancos. Así, la adición de aguas a la laguna por parte del hombre produce un lavado vertical de las sales. En este caso, durante el periodo estival, sólo se forman en superficie pequeñas eflorescencias salinas y la intensa evapotranspiración (unos 750 mm) deseca todo el suelo, por lo que las imágenes de satélite ofrecen valores de reflectancia muy altos.

Las fotografías aéreas convencionales, con información sólo del espectro visible, únicamente permiten diferenciar lagunas con o sin agua y con o sin depósitos salinos en superficie. Sin embargo, no es posible diferenciar las que tienen aportes de aguas subterráneas o subsuperficiales y cómo influyen éstas en el desarrollo de los depósitos salinos. El mismo problema se observa con las fotografías oblicuas de campo (figura 2). Las fotografías aéreas muestran la laguna de El Taray, de origen fluvial y pseudokártico, pues posee numerosas dolinas originadas por el lavado y colapso de los yesos neógenos subyacentes. También permiten observar la lámina de agua en el centro del vaso lagunar y



Figura 2 a. Costas salinas y suelos poligonales en la laguna de Tirez, 20-8-1995.



Figura 2 b. Laguna de Gallocanta con una somera lámina de agua, 30-3-1999.



Figura 2 c. Laguna de Gallocanta casi seca, 9-11-1995.

un entorno con vegetación higrófila muy densa (*Cladium mariscus* y *Phragmites australis* principalmente), que enmascara buena parte de la lámina real de agua. Las pocas fotografías aéreas existentes de esta área impiden conocer bien la variabilidad de las lagunas.

Así, en las figuras 3 a, b, c y d puede apreciarse la laguna del Taray en las cuatro fechas estudiadas, mostrando grandes oscilaciones en la lámina de agua y en la cantidad de sales precipitadas. En las imágenes de 1992 y 1997 la laguna adquiere tonos oscuros en cualquier combinación de bandas, característica de aguas profundas (superior al metro). Por el contrario, las imágenes de verano (1995 y 99) muestran un vaso lagunar desecado parcial o totalmente, en el que destacan los tonos blancos debidos a la alta reflectividad de los carbonatos. Así, al realizar el análisis espectral, la laguna pseudokárstica del Taray (figura 4), en agosto de 1995, tiene números digitales próximos a 200 en los canales 1 (azul) y 5 (IR próximo), lo que indica que el suelo está seco. Además, esta reflectividad es normalmente más alta en los bordes de las lagunas estacionales, conforme se va produciendo la desecación del vaso lagunar, hecho que se confirma con nitidez en la laguna de Gallocanta. Al tener estas lagunas valores muy altos en la banda 1, canal azul del espectro visible, la salinidad se aprecia claramente en las fotografías aéreas convencionales y en la combinación en color natural (figura 3 b), de los sensores TM y ETM, mostrando tonos muy claros. La curva espectral de esta laguna en agosto de 1995, muestra un perfil similar a la de los campos de cultivo desnudos, en los que también se reflejan los sulfatos, lo que da idea de la intensa sequía acaecida ese año. Por el contrario, en el mismo mes de agosto, de 1999, la curva es diferente, mostrando El Taray la presencia de humedad. Incluso en la imagen de 1999 (figura 3 d) se observa que la parte central del vaso tiene una somera lámina de agua.

Por el contrario el hecho observado en El Taray en el que, a mayor sequedad y por consiguiente concentración de sales, mayor reflectividad, no se cumple en las lagunas hipersalinas. En ninguna fecha salvo en 1999 muestran valores digitales muy altos, ni visualmente adquieren tonos muy blancos, a pesar de la gran extensión superficial de las sales precipitadas en la época estival. Estas sales constituyen en los humedales del centro peninsular español las típicas estructuras salinas de áreas endorreicas superficiales, con suelos poligonales y crestas salinas, características de las sebkhas. Existe por tanto un gran contraste visual entre lo que se observa directamente en el campo (figura 2 a) o en la fotografía aérea de agosto de 1984 (con tonos también muy claros), y en la imagen de satélite.

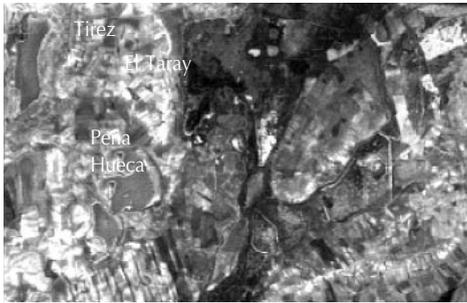


Figura 3 a. 5-11-1992

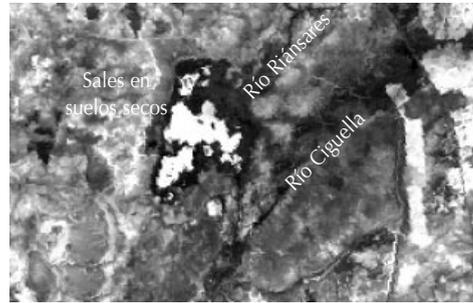


Figura 3 b. 26-8-1995



Figura 3 c. 20-2-1997

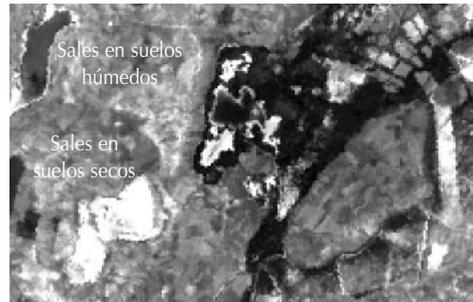
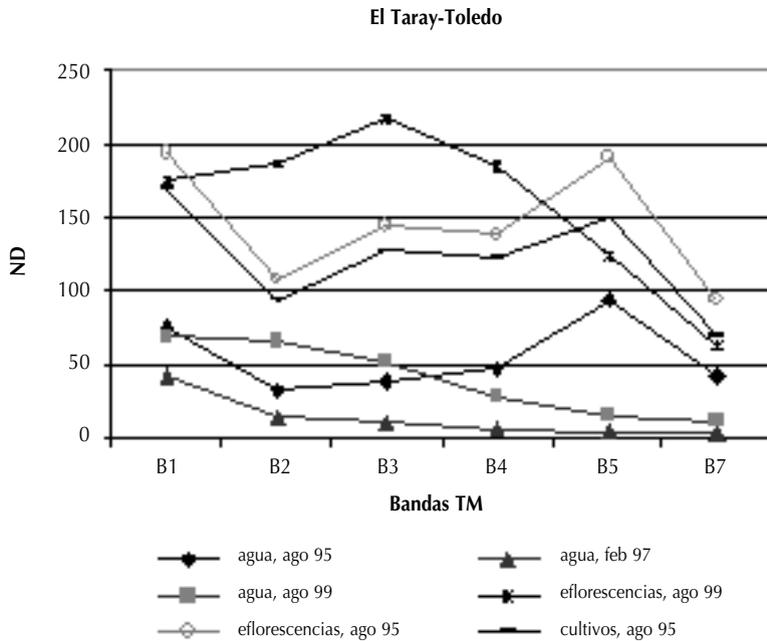


Figura 3 d. 20-8-1999

Figura 3. Imágenes Landsat TM y ETM en color natural (3-2-1) de humedales manchegos. Estas figuras muestran humedales de aguas dulces, salobres e hipersalinas con gran variabilidad interanual. Las figs. 3 a, y 3 c reflejan tonos oscuros debido a la presencia de agua; la mayor extensión y profundidad de la lámina de agua se recoge en la figura 3 c. Las figuras correspondientes al verano: 3 b y 3 d muestran los mismos humedales parcial o completamente desecados, con tonos muy claros correspondientes a suelos muy secos con eflorescencias salinas, mientras que los tonos grisáceos de los vasos lagunares son debidos a la costra salina sobre suelos muy húmedos.

Al analizar las lagunas hipersalinas, tanto visual como digitalmente (figs. 3, 5 y 6), se advierten diferencias notables entre los resultados obtenidos en las imágenes del sensor TM y las del ETM, observando mayor reflectividad en estas últimas. Dichas diferencias podrían responder a una diferente sensibilidad entre los dos sensores. Pero la comparación de imágenes estivales de los dos sensores en diferentes años en humedales hipersalinos muy próximos, ha demostrado que la causa de esta disparidad no es debida al sensor, sino a factores meteorológicos y usos de las lagunas y de las aguas subsuperficiales y subterráneas. La imagen del TM fue tomada en agosto de 1995 (figura 3 b), año extremadamente seco, por lo que las lagunas desarrollaron grandes formaciones salinas superficiales. La imagen del ETM (figura 3 d) corresponde a agosto de 1999, año húmedo, por lo que la superficie salina fue menor. La composición de las sales está constituida fundamentalmente por sulfatos hidratados, por lo que a mayor tamaño de los cristales, hay más contenido de humedad,

FIGURA 4. PERFIL ESPECTRAL EN UNA LAGUNA DULCE Y SEMIPERMANENTE



que no es posible apreciar visualmente, pero que sí recogen los sensores. Estas lagunas, además, mantienen una gran humedad en la capa subsiguiente a la lámina de sales, ya que están constituidas por lodos muy ricos en materia orgánica (sapropel) de colores muy oscuros, saturados en agua, lo que en el análisis visual en color natural le da tonalidades verdosas en la imagen de febrero del 97 (figura 3 c, grisáceas en la impresión en blanco y negro) cuando la laguna tiene una altura de agua en torno a 25 cm.

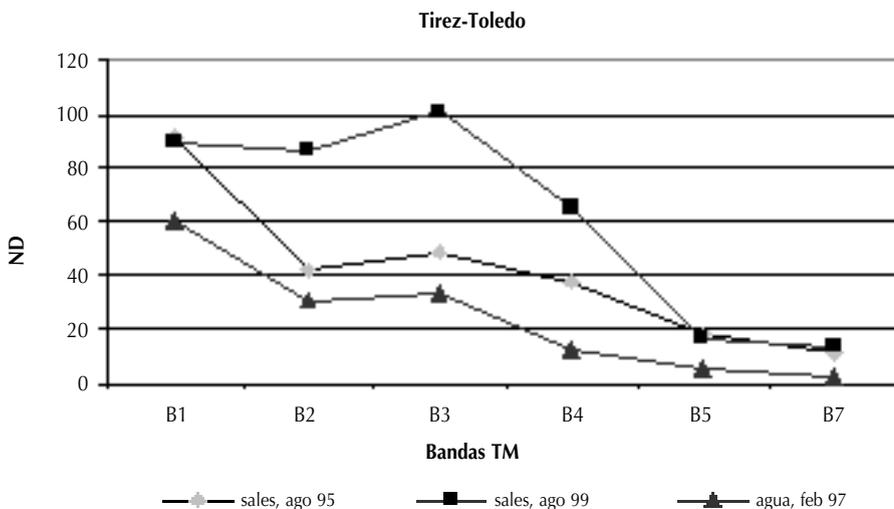
Independientemente de la presencia de sales en superficie, las imágenes de satélite permiten detectar la humedad subsuperficial, asociada al aporte de aguas subterráneas y retenida por la materia orgánica. Por tanto, la combinación de estos dos factores contrarresta los valores altos de reflectancia debidos a las sales en superficie, por lo que la respuesta espectral es más baja, ofreciendo las imágenes tonalidades más oscuras. A diferencia de lo que se observa "in situ" o mediante fotografía tradicional, las imágenes de satélite permiten diferenciar lagunas con aportes de aguas subterráneas y alta acumulación de materia orgánica.

No obstante, la imagen de La Mancha de agosto de 1999 (figura 3 d) incluye dos lagunas hipersalinas con una respuesta espectral muy contrastada:

la laguna de Tirez, con tonos oscuros y números digitales bajos y la laguna de Peña Hueca con tonos muy claros y números digitales elevados. Esto debe explicarse por el diferente uso de estos humedales:

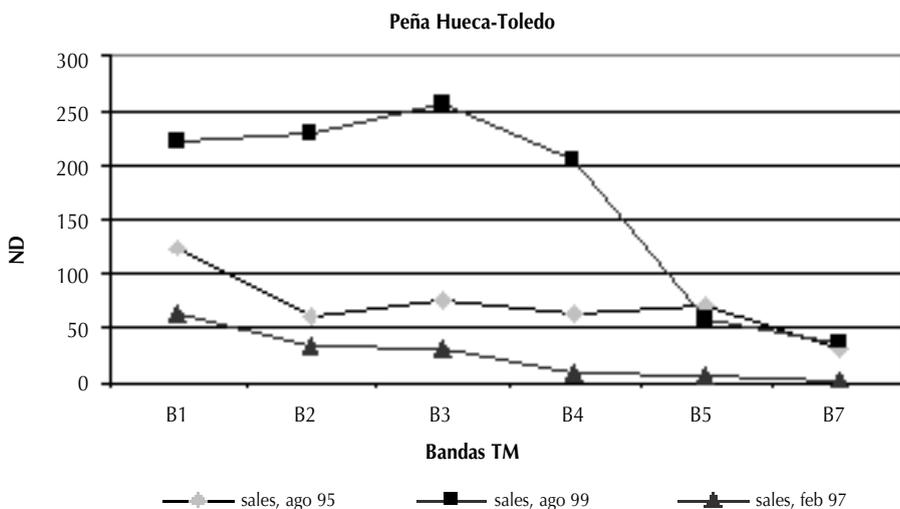
- laguna hipersalina con ciclos hídricos “naturales” (al menos hasta fechas muy recientes) –laguna de Tirez–, sin explotación actual de sales, dan lugar a una buena formación de cristales salinos, reteniendo la humedad edáfica en las capas subsuperficiales, con baja reflectividad, lo que se traduce en tonos oscuros en cualquier combinación de bandas y en cualquier fecha. Esto se puede observar en los perfiles espectrales correspondientes al mes de agosto de cualquier año (figura 5), mostrando un perfil próximo al de los meses de invierno en los que tiene agua (altura de la lámina de unos 30 cm). Los valores digitales son similares en las distintas fechas en los canales infrarrojos y en la banda azul, característicos de la signature del agua. No obstante en los canales visibles del verde y rojo, hay más variación entre invierno y verano, denotando los perfiles de agosto un mayor reflejo de las sales y el sustrato. Por tanto, la laguna de Tirez, hipersalina, ofrece valores muy bajos en todas las bandas y especialmente en los canales 5 y 7, más propios de la signature espectral del agua que de las sales. Únicamente el contenido de humedad del yeso y del sustrato puede explicar estos valores aparentemente erróneos.

FIGURA 5. PERFIL ESPECTRAL DE UNA LAGUNA HIPERSALINA CON CICLOS HÍDRICOS NATURALES



- laguna hipersalina con ciclos hídricos alterados por el hombre –laguna de Peña Hueca–, que mantienen en explotación las salmueras, de forma que se rellenan artificialmente con agua subterránea. Esta explotación no es posible en los humedales interiores de la Península Ibérica en años de intensa sequía en los que el nivel freático desciende considerablemente. Por esta razón, en el verano del 1999 esta laguna sólo llegó a construir cristales milimétricos que facilitaron la evaporación del agua del suelo, lo que se refleja en los perfiles espectrales con valores digitales más altos que en la laguna anterior, si bien la forma de la signatura espectral es similar. Así en agosto de 1995 el perfil espectral tiene valores más bajos que en el 99, especialmente en los canales del visible; llama la atención la respuesta espectral de los canales 2 y 3 que, en el año 95, parecen reflejar una gran humedad, con influencia del sapropel, mientras que en el 99 es más característico de signaturas salinas. Comparando los espectros entre las lagunas secas e inundadas, se observa que difieren, fundamentalmente, en las bandas 2 y 3; en los canales infrarrojos la respuesta de las sales es mínima, influyendo sobre todo la respuesta de la humedad edáfica. Además, visualmente, en la figura 3 se puede observar el contraste de salinidad en dos sectores de la laguna de Peña Hueca: la mitad NE acumula mayor cantidad de agua, frente al sector SW en el que hay un mayor desarrollo de cristales.

FIGURA 6. PERFIL ESPECTRAL DE UNA LAGUNA HIPERSALINA CON CICLOS HÍDRICOS ANTROPIZADOS



Asimismo, en la Comunidad de Madrid, la laguna de Las Esteras, analizada en dos fechas del mes de agosto (1987, 1999), muestra una gran variabilidad. Debido al pequeño tamaño del vaso lagunar es difícil de discriminar mediante el análisis visual (figs. 7 a y b), especialmente en el año 99, más seco en Madrid que en 1987, en el que las sales se confunden con los yesos de los campos de alrededor. En el año 87 tiene, aún en verano, una somera lámina de agua que facilita su análisis visual (figura 7 a); en esta fecha, la presencia de algas hace que, en color natural, presente un tono verdoso. El perfil espectral (figura 8) muestra valores digitales inferiores a 100 en todas las bandas y una signatura característica de aguas muy someras con reflejo del sustrato. Por el contrario en el año 99 la signatura muestra la presencia de sales, con valores muy altos en las bandas del espectro visible, comportamiento espectral característico de estas superficies.

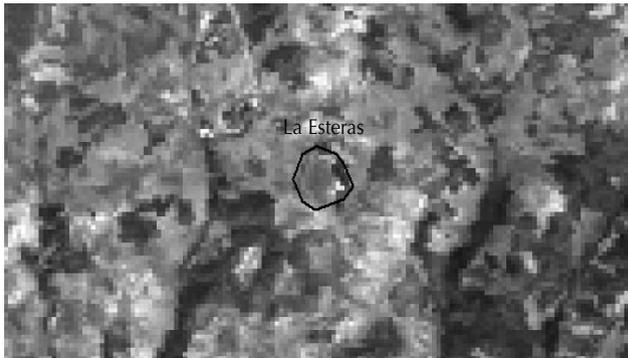


Figura 7 a. 11-8-1987

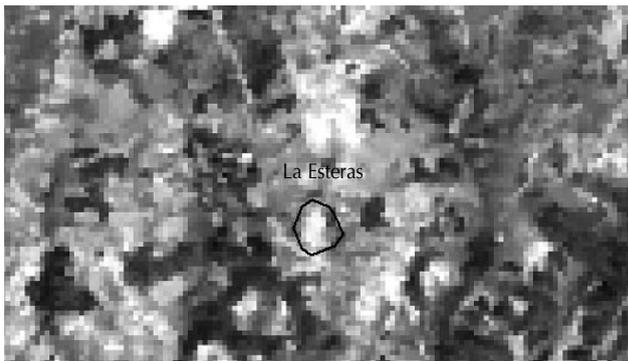
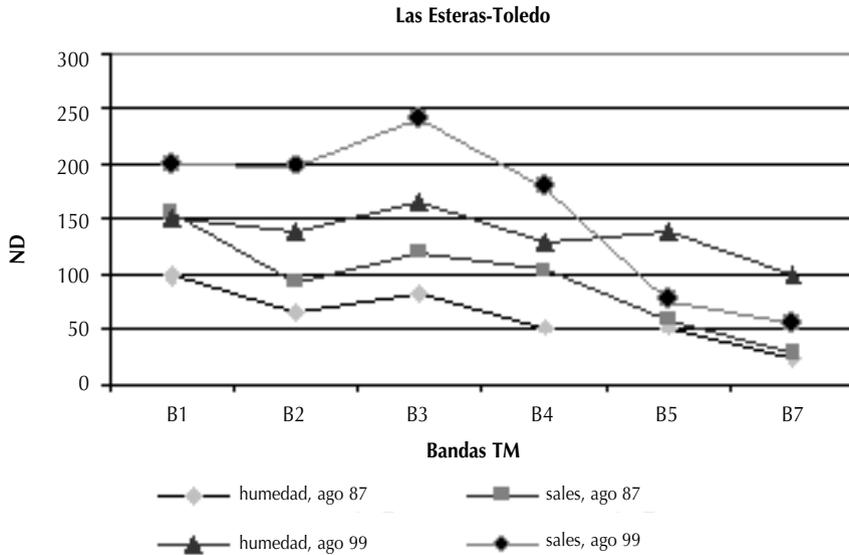


Figura 7 b. 20-8-1999

Figura 7. Imágenes Landsat ETM en falso color (4-3-2) de la laguna de las Esteras (Madrid). Esta pequeña laguna salina es difícilmente detectable en las imágenes de satélite, por lo que puede confundirse con facilidad con los depósitos de yesos circundantes. La figura 7 a muestra una somera lámina de agua, mientras que la figura 7 b registra la laguna totalmente seca con sales en superficie.

FIGURA 8. PERFIL ESPECTRAL DE UNA LAGUNA SALINA DEL SUR DE MADRID



En contraste con todos estos humedales de las cuencas de los ríos Tajo y Guadiana, la laguna del Gallocanta enclavada en la cuenca del Ebro tiene una signatura típica de las lagunas salobres estacionales, que en verano pierden su lámina de agua. Visualmente esta laguna, de gran tamaño, se define perfectamente, mostrando una gran variabilidad en el contenido en sales y cantidad de agua dentro del vaso lagunar (figuras 2 y 9). En la imagen de marzo (figura 9 a) presenta una pequeña lámina de agua, siendo la única fecha en la que, en falso color presenta tonos azulados en todo el vaso; por el contrario, en color natural se percibe la presencia de algas (*Lamprothamniun papulosum* y *Chara galoide*), mezcladas con lodos. Analizando los perfiles espectrales (figura 10) de diferentes meses del año 99 se observa que en el mes de marzo el perfil espectral es característico del agua, aún con una lámina que sólo tiene escasos centímetros de altura. En el mes de julio (figura 9 b) la laguna está seca, por lo que la curva espectral alcanza valores muy altos en las bandas 1 y 5, signatura propia de las sales, lo que contrasta con las lagunas anteriormente citadas. En este perfil la relación entre las bandas 2, 3 y 4 es similar a la de estas lagunas. Durante el mes de noviembre (figura 9 c) la laguna continúa seca, pero las curvas correspondientes a sectores salinos y húmedos son poco contrastadas y tienen valores más bajos por la menor inclinación



Figura 9 a. 30-3-1999



Figura 9 b. 4-7-1999

Figura 9 c. 9-11-1999



Figura 9. Las imágenes del satélite Landsat TM en color natural (3-2-1), muestran las variaciones en la humedad del suelo y en la extensión de la superficie salina en la laguna de Gallocanta. La fig. 9 a muestra una somera lámina de agua y acumulación de algas dentro del vaso lagunar. La fig. 9 b refleja mayor humedad al principio del verano, así como el inicio de su desecación en forma concéntrica; en la fig 9 c la laguna de Gallocanta está seca y cubierta totalmente por eflorescencias salinas.

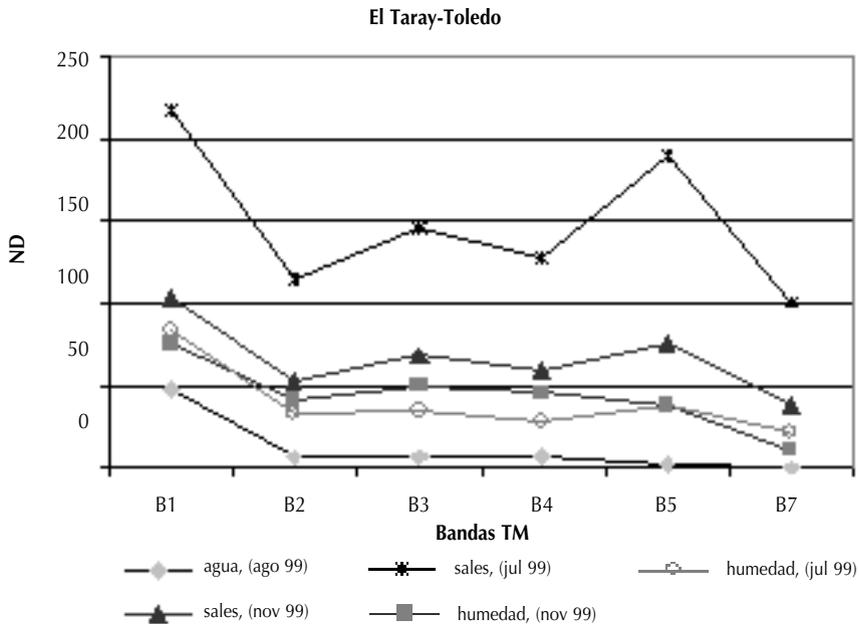
de los rayos solares. No obstante, la banda 5 muestra valores más altos en el perfil de las sales y visualmente es la imagen que presenta los tonos más claros en cualquier combinación de bandas.

CONCLUSIONES

Al analizar los humedales se observa una aparente contradicción, en los meses de verano, entre las superficies salinas observadas en el campo y la respuesta espectral obtenida mediante las imágenes de satélite.

Las imágenes y datos obtenidos por los satélites muestran valores espectrales más bajos de los que *a priori* cabría esperar en las superficies salinas, debido a que los sensores captan la humedad edáfica subyacente lo que altera dichos valores. En cualquier caso, las imágenes ofrecen

FIGURA 10. PERFILES ESPECTRALES DE GALLOCANTA



valores correspondientes a un volumen, que no a una superficie. Al ganar en profundidad, la respuesta espectral denota la humedad edáfica que también es responsable de la acumulación de la materia orgánica en condiciones anaerobias, constituyendo un sapropel de tono oscuro. Esta sería la causa principal de las tonalidades azuladas y en general oscuras que se oponen al brillo y alta reflectividad superficial.

En cuanto a la procedencia de esta humedad no se descarta un afloramiento de aguas subterráneas, pues es precisamente en los años más secos, cuando mejor se pone de manifiesto el color oscuro. En estos años la anomalía hídrica de los humedales es tanto más notable. El retraso en el afloramiento del agua hasta la superficie, se explicaría por el camino recorrido, en todo caso muy superior al de la escorrentía superficial.

Con la única herramienta de la teledetección no es posible hacer una correcta cartografía de las zonas húmedas salinas del centro peninsular ibérico. Se hace preciso el concurso del tradicional trabajo de campo. No obstante, mediante esta técnica, se obtiene una valiosa información sobre aportes de aguas subterráneas a los humedales y sobre la evolución de los mismos.

Recibido 22.06.05

Aceptado: 31.03.06

BIBLIOGRAFÍA

- CASTAÑEDA, C.; CASTERAD, M.A. y HERRERO, J. (2001): "Una metodología para el estudio de las saladas de Monegros Sur mediante imágenes Landsat TM". En: ROSELL URRUTIA, J. Y MARTÍNEZ CASASNOVAS, J.A. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, Universidad de Lleida, 306-309
- Fornés, J. (1994). *Hidrología de algunas lagunas de Castilla La Mancha*. Tesis Doctoral de la Univ. Complutense de Madrid; 315 pp.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M^a P. Y PÉREZ GONZÁLEZ, M^a E. (1999): "Estudio mediante imágenes TM del entorno de Villacañas (Toledo)" *Revista de Teledetección*, 11: 13-22.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M^a P. PÉREZ GONZÁLEZ, M^a E. (2001): "Variación estacional de los niveles de agua en la llanura de Gallocanta (Zaragoza-Teruel)". En: ROSELL URRUTIA, J. Y MARTÍNEZ CASASNOVAS, J.A. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, Universidad de Lleida, 338-340.
- GRACIA PRIETO, F.J. (1990): "Evolución morfológica reciente de la laguna de Gallocanta (Cordillera Ibérica Central)". *I Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel: 277-287.
- Gracia Prieto, F.J. (1993): "Fisiografía de la laguna de Gallocanta y su cuenca". *Xiloca*, 11: 177-204.
- GUMUZZIO, J.; KOCH, M. Y SCHMID, T.F. (2001): *Synergetic use of multispectral and hyperspectral data in characterising change in semiarid wetlands in Spain. Hysens proyect report HS-2000ES2: "Hyperspectral sensors (DAIS 7915, ROSIS)"*, DLR- German Remote Sensing Data Centre.
- KOCH, M.; SCHMID, T. Y GUMUZZIO, J. (2001): "The study of anthropogenic affected wetlands in semiarid environments applying airborne hyperspectral data". En: ROSELL URRUTIA, J. Y MARTÍNEZ CASASNOVAS, J.A. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, Universidad de Lleida, 297-301.
- METTERNICHT, G. Y ZINCK, J.A. (2003): "Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints". *Remote Sensing of Environment*, vol. 85; 1-20.
- MORILLO, C. y GONZÁLEZ, J.L. (1997) (eds.): *Management of mediterranean wetlands. (proyect MedWet)*. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Conservación de la naturaleza y European Union.
- MOUGENOT, B. (1993): "Effects des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés". *Cahiers ORSTOM, Serie Pedologie* 28; 45-54.
- MULDERS, M. (1987): *Remote Sensing in Soil Science*. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands. 379 pp.
- PEINADO MARTÍN MONTALVO, M. (1994): *Funcionamiento y variabilidad de los geosistemas de los humedales manchegos*. Univ. Complutense. Tesis Doctoral. Madrid. 296 pp.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.E. (1995): *Los humedales de la confluencia de los ríos Riánsares y Cigüela*. Univ. Complutense. Tesis Doctoral. Madrid. 293 pp.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M^aE. y GARCÍA RODRÍGUEZ, M^a P. (1999): *Análisis de la banda térmica del sensor TM del Landsat-5 de La Mancha (provincias de Toledo, Ciudad Real y Cuenca)*. En: RASO, J.M. Y MARTÍN-VIDE, J. (eds.), Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A, nº 1: 391-398.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M^aE. Y GARCÍA RODRÍGUEZ, M^a P. (2000): "Estudio microclimático de la laguna de Gallocanta". En: AGUADO, I. Y GÓMEZ, M: *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*", CD, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M^aE.; SÁNCHEZ PÉREZ DE EVORA, A; García Rodríguez, M^a P y SANZ DONAIRE, J.J. (2000): "Análisis mediante imágenes de satélite de la salinización en la laguna Larga de Villacañas (Toledo)". En: *Lecturas geográficas, Homenaje a José Estébanez Alvarez*, Ed. Complutense, Vol. II, 1655-1666.

- PÉREZ GONZÁLEZ, M^a E. y GARCÍA RODRÍGUEZ, M^a P. y Sanz Donaire, J.J. (2001). "Estudio de la depresión intraibérica Guialguerrero-Gallocanta mediante el sensor TM". *Revista de Teledetección*, 15: 27-37.
- QINGXI, T.; LANFEN, Z.; JINNAN, W. Y BING, Z. (1997): "Study on the wetland environment by airborne hyperspectral remote sensing". *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, vol. 1: 67-74.
- SÁNCHEZ PÉREZ DE EVORA (1997): *Humedales manchegos: factores ambientales y su repercusión en los suelos*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense. Madrid. 405 pp.
- SANZ DONAIRE, J.J. y DÍAZ ÁLVAREZ, M^a D. (1992): "Génesis y funcionalidad geomorfológica de los humedales". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 12: 93-103.
- SCHMID, T.F. (2004). *Integrated Remote Sensing approach to detect changes in semi-arid wetland areas in Central Spain*. Tesis Doctoral. Univ. Autónoma de Madrid; 193 pp.
- TAYLOR, G.R.; BENNETT, B.A.; MAH, A.H. Y HEWSON, R.D. (1994): "Spectral properties of salinised land and implications for interpretation of 24 channel imaging spectrometry". *First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France.

Resumen

En el presente trabajo se han analizado varios humedales del centro de España. Se han observado grandes diferencias entre los datos obtenidos en el trabajo de campo y la información suministrada por algunos satélites medio ambientales. Normalmente, en verano, cuando las lagunas están secas, los humedales estacionales muestran una superficie blanquecina debida a la precipitación de las sales, que contrasta con el color azulado de estos humedales en las imágenes de satélite. Se sugiere que esta aparente paradoja puede ser debida al hecho de que el sensor capta información tridimensional y no sólo la superficie de las lagunas. A veces, en las regiones mediterráneas semiáridas las imágenes de satélite se pueden utilizar para diferenciar los humedales alimentados con aguas subterráneas de aquellos que no tienen contribución de aguas subsuperficiales.

Palabras clave: humedales interiores, teledetección, salinización, aguas subterráneas.

Abstract

Some wetlands from the central part of Spain have been here studied. There are big differences between field work and images taken by some sensors of environmental satellites. Usually, on summer, when these ponds dry up, the seasonal wetlands exhibit a whitish surface due to salt precipitation, contrasting with the bluish colour displayed in images. It has been suggested that this apparent paradox results from the fact that sensor records data from an three-dimensional earth and not only from a simple surface. Therefore, in Mediterranean semiarid region satellite images can be used to discriminate wetlands fed by groundwater from other ones having a non sub-surface water contribution.

Key words: inner wetlands, remote sensing, salinization, groundwater.

Resume

Dans ce travail on a analysé quelques zones humides de la partie central de l'Espagne. On a observé grandes différences entre les données du travail en champagne et l'information apportée par quelques satellites environnementals. Habituellement pendant l'été avec des zones humides sèches, la surfaces des lagunes sont blanchâtres due à la précipitation chimique des sels,

mais cette couleur fait contraste avec le blue des images satellitaires. On fait cette suggestion pour comprendre la paradoxe: les senseurs des satellites prennent une information à trois dimensions, mais l'oeil nu seulement la surface des zones humides. On peut aussi aux régions méditerranéennes semi-arides distinguer les lagunes avec alimentation par des eaux souterraines des autres qui n'ont que contribution de surface.

Mots clés: zones humides intérieures, télédétection, salinization, eaux souterraines