

**ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA
EN HUMEDALES DE AMBIENTE SEMIÁRIDO
APLICANDO TELEDETECCIÓN
(LA MANCHA, 1992-2001)**

POR

M. E. PÉREZ GONZÁLEZ*
M. P. GARCÍA RODRÍGUEZ*

Introducción y objetivos

Los humedales son espacios naturales muy frágiles por la gran variabilidad espacio temporal de la lámina de agua, siempre con una altura inferior a los seis metros. En el caso concreto del centro de la Península Ibérica todas las lagunas son muy someras y no sobrepasan, en las épocas más húmedas, el metro y medio de agua. No obstante, son áreas de gran valor ecológico y paisajístico tanto por la riqueza y diversidad de especies animales y vegetales, como por su capacidad de absorción de contaminantes y freno de inundaciones.

Pese a su gran valor medioambiental son espacios altamente antropizados, en unos casos, para favorecer o mejorar su conservación, en otros, alterando la lámina de agua y sus riberas inmediatas.

Las lagunas manchegas han sido estudiadas por diferentes especialistas (Dantín Cereceda, 1929; Plans, 1969; Cirujano, 1981; Custodio, 1987; Montes y Martino, 1987; Fornés, 1994; Peinado, 1994 y 95; Casado y Montes, 1995; Pérez, 1995; Sánchez et al., 1999; Pérez et al., 2000, etc.).

El objetivo primordial de este trabajo es detectar y cartografiar la contaminación acuática en humedales endorreicos, y conocer cuál es la

* Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid. Proyecto U.C.M. PR48-019852. meperez@ghris.ucm.es.

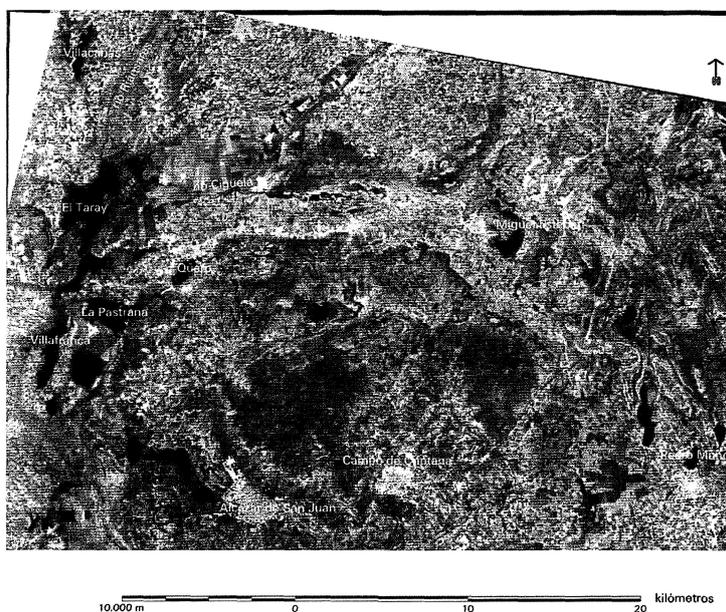
evolución reciente de algunas lagunas en la Comunidad de Castilla La Mancha. Para ello resulta de gran interés y expresividad la información aportada por las imágenes de satélites gracias al registro de los canales visibles e infrarrojos, muy sensibles a las variaciones de la actividad clorofílica.

Las lagunas analizadas en el presente estudio se localizan al noreste del Parque Natural de Las Tablas de Daimiel, humedal incluido en el convenio Ramsar. Al norte del Parque se sitúan medio centenar de lagunas, de las que hemos seleccionado aquellas que presentan problemas de contaminación, ligadas sobre todo a la presencia de núcleos urbanos y/o con contaminantes agrícolas.

La interpretación de imágenes de satélite de gran resolución espacial y espectral permite detectar las masas de agua contaminadas y cartografiar con exactitud la extensión, intensidad y variabilidad de los procesos contaminantes (Hodgson et al., 1987, Patience et al., 1993, Jong, 1994, Fraser, 1998; Sydor, 1998, García et al., 1999; Polvorinos, *et al.*, 2001; Reese et al., 2002; Ruiz-Verdú, *et al.*, 2003). La utilización de imágenes de distintas fechas permite conocer también la evolución de la contaminación y la respuesta de los humedales a las medidas de restauración y conservación. También se puede analizar la evolución de la vegetación higrófila que se sitúa en el interior o en los alrededores de la laguna.

Los objetivos concretos del estudio se sintetizan en los siguientes puntos:

- Diferenciación entre la vegetación higró-halofita y los cultivos mediante diversas mezclas de bandas.
- Discriminación del carácter hipersalino de los humedales.
- Cartografía de las llanuras de inundación de ríos y áreas inundables.
- Cartografía del estado de la vegetación natural y antrópica a partir de diversos índices de vegetación.
- Medida del estrés de la vegetación natural en años de sequía.
- Evaluación de la recuperación de la calidad de las aguas tras la puesta en funcionamiento de depuradoras de aguas.



Fuente: <http://www.jccm.es/agricul/medioambiente/mednat/mapas/mapared.htm>

FIG. 1b.—*Imagen TM de La Mancha Húmeda del 20-2-1997.*

Los humedales aquí analizados forman parte de la llamada «Mancha Húmeda» y constituyen, en parte, la cuenca de cabecera del río Guadiana. Aunque algunas de las higrocoras no se encuentran vinculadas superficialmente a dicho río (lagunas de Villacañas, Peña Hueca y Tírez), sí forman parte de acuíferos comunes, por lo que son evidentes las interconexiones entre ambos medios (aéreo y subterráneo). Las distintas lagunas estudiadas y sus características principales quedan resumidas en el Cuadro I.

Debe destacarse que varias lagunas se sitúan junto a los ríos Ciguñuela y Záncara, principales colectores de cabecera del río Guadiana, y por tanto aportan sus aguas directa o indirectamente a las Tablas de Daimiel. Por ello, ante la presencia de contaminantes claramente urbanos en este Parque Nacional desde la segunda mitad de los años noventa se exigió la depuración de las aguas de algunos municipios antes de ser evacuadas a sus lagunas más próximas, como es muy frecuente en este sector manchego (Alcázar de San Juan, Villacañas, Miguel Esteban, Pedro

CUADRO I
 CARACTERÍSTICAS DE LAS LAGUNAS ANALIZADAS

Nombre	Origen	Estacionalidad	Calidad
Larga de Villacañas	Tectónico	Baja	Salobre-salina
Chica de Villacañas	Pseudokárstica	Alta	Salobre
El Taray	Fluvial y Pseudokárstica	Baja	Dulce-salobre
El Masegar	Fluvial y Pseudokárstica	Baja	Dulce-salobre
Tírez	Reverso de cuesta	Alta	Salina
Peña Hueca	Reverso de cuesta-kárstica	Alta	Salina
Miguel Esteban	Endorreico-antrópico	Baja	Salobre

Muñoz, etc.). La construcción y puesta en funcionamiento de las depuradoras urbanas ha sido desigual en los diferentes núcleos con la consiguiente disparidad en la evolución de los contaminantes acuáticos. Por lo general, se han instalado con más celeridad en aquellos que precisan temporalmente desaguar los vasos lagunares hacia los ríos Cigüela y Zán-cara, por la frecuencia de inundaciones a las tierras de cultivo del entorno y la necesidad de incrementar el aporte de aguas superficiales al parque Nacional de Las Tablas de Daimiel. Así, Alcázar de San Juan fue el primer municipio que instaló una depuradora en el año 1996, seguida de Villacañas en 1998, mientras que otros municipios siguen vertiendo las aguas residuales sin depurar a las lagunas (Pedro Muñoz y Miguel Esteban). Dichos aportes incrementan notablemente el contenido en fosfatos, nitratos y detergentes (Peinado, 1994 y Pérez, 1995).

En la actualidad el Ministerio de Medio Ambiente ha declarado Reserva Natural el Complejo lagunar de Alcázar de San Juan en 1999 y la laguna del Salicor en el año 2000, por lo que cabe esperar actuaciones favorables que no permitan la involución en la calidad del agua de sus lagunas.

Material y métodos

En este estudio se han escogido imágenes del satélite Landsat, de los dos sensores más recientes, TM y ETM. De éstos se han seleccionado imágenes que abarcan una década y corresponden a distintas épocas y

años, con el fin de recoger la mayor variabilidad de los vasos lagunares en cuanto a contenido en agua y concentración de solutos. Todas las imágenes pertenecen a escenas de los satélites Landsat con diferentes fechas y sensores, como queda resumido en el Cuadro II.

Estas imágenes se han georreferido a coordenadas UTM utilizando ochenta y cinco puntos de control, aceptando un error medio de 0,33. El área analizada está comprendida entre las coordenadas X: 4387, Y: 471 y X:4358, Y:482. Para identificar la contaminación de las lagunas y cartografiar la superficie afectada por la misma se han realizado distintas combinaciones de bandas, creando imágenes en falso color en las que destacan las superficies acuáticas con altas densidades de vegetación, materiales en suspensión, aportes orgánicos, etc. (García *et al.* 1999 y Pérez *et al.*, 2000). Las imágenes aquí seleccionadas para su publicación corresponden a las combinaciones en color natural 3-2-1 y en falso color 4-3-2 asignándole los cañones rojo-verde-azul a cada una de las bandas respectivamente y para todas las fechas estudiadas. También se han efectuado diferentes mejoras espaciales (filtros estadísticos), espectrales (análisis en componentes principales; índices de vegetación; composición hidrotermal: banda 5/banda 7, banda 3/banda 1, banda 4/banda 3; composición mineral: banda 5/banda 7; banda 5/banda 4, banda 3/banda 1; y minerales arcillosos: banda 5/banda7) y radiométricas (ecualización del histograma y reducción de ruido, mediante la compresión del histograma). De todas ellas las que ofrecen mejores resultados visuales y espectrales son las imágenes obtenidas mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI: banda 4-banda 3/banda

CUADRO II
CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE UTILIZADAS

Fecha	Sensor	Escena
05-11-1992	TM	200
26-08-1995	TM	200
20-02-1997	TM	200
20-08-1999	ETM	201/032
06-06-2001	ETM	201/032
10-09-2001	ETM	201/032

4+banda3), habitualmente utilizado para evaluar la vegetación y su relación con las distintas variables ambientales (Gallo *et al.* 1989; Lloyd, 1989; Cihlar *et al.*, 1991; Xiao, *et al.*, 2002, etc.). Este índice se ha analizado individualmente en las distintas lagunas y se han calculado los perfiles espectrales en las mismas.

Resultados y discusión

El análisis visual de las diferentes imágenes del satélite Landsat nos muestra que algunas de estas lagunas sufren problemas de contaminación, claramente observables por la eutrofización de sus aguas. Este análisis permite delimitar las láminas de agua y conocer la respuesta de la actividad clorofílica. En color natural (combinación 3-2-1) se detecta la presencia de algas en colores verdosos; no obstante, estos tonos pueden darse también en lagunas salinas debido a los altos contenidos en materia orgánica del sapropel. La época estival resulta idónea para detectar contaminantes en los vasos lagunares, porque la mayor parte de higrocoras registran mínimos hídricos; así, los aportes urbanos destacan en las imágenes en color natural con tonos oscuros y por la forma en abanico que dejan estos vertidos. Si se introducen canales infrarrojos, la materia orgánica se discrimina perfectamente de la vegetación natural y de las áreas eutrofizadas, ya que la primera aparece en tonos azules, mientras que la vegetación muestra tonos rojizos (vegetación de ribera) o rosas (algas). Pero, por el contrario, en estos canales es difícil separar los distintos tipos de vegetación. La respuesta a la actividad clorofílica es similar en la vegetación subacuática que en la aérea, por lo que los tonos son parecidos.

Una gran ventaja de las imágenes de satélite es que permiten conjugar el análisis visual con el digital, de forma que si se delimita la extensión de la lámina de agua visualmente, se pueden discriminar los distintos tipos de vegetación por su distribución espacial y su respuesta espectral (vegetación de ribera y subacuática) (figs. 2, 3 y 4).

El análisis visual permite ver si las lagunas son someras o profundas, pudiéndose cartografiar la extensión de la lámina de agua. Cuando los humedales son someros se puede conocer también la naturaleza del sustrato sobre el que se asientan las lagunas y a partir de él, determinar el posible aporte de sales. Así, los sedimentos arcillosos (triásicos, ricos en

sales) se cartografiaban claramente en cualquier combinación de bandas en varios humedales analizados: en el sur de la laguna Larga de Villacañas (figs. 2 a, 2 b), en Peña Hueca y en Tírez, (figs. 2 c, 2 d).

La imagen que se obtiene con el NDVI (fig. 3) muestra en las lagunas muy contaminadas, tonos muy blancos, similares a los que se obtiene con vegetación en plena vigorosidad (cultivos en regadío, bosques de planifolios, vegetación de ribera, etc.). Sin embargo, al hallar los valores espectrales del algoritmo $(B4-B3)/(B4+B3)$, la diferencia de la vegetación compuesta por espermatofitos presenta valores muy bajos. Esto es debido a que la eutrofización de la laguna muestra presencia de algas y materia orgánica, pero mezclada con lodos y gran cantidad de agua.

En el cuadro III se resumen los valores máximos de NDVI en el interior de los vasos lagunares. Dichos valores no son números muy altos (excepto en lagunas muy eutrofizadas con escasos volúmenes de agua) debido a que la respuesta espectral es mixta entre la clorofila, la reflectancia del agua y el sustrato. De este cuadro se deduce que los NDVI positivos corresponden a lagunas eutrofizadas; esta contaminación no puede detectarse mediante el NDVI en las fechas en que las lagunas tienen una altura de agua superior a un metro, por lo que la estación idónea para cartografiar la distribución de la contaminación acuática es el verano. En las lagunas muy contaminadas y someras (Miguel Esteban) los NDVI son positivos en todas las imágenes analizadas. Las lagunas salinas, con alto contenido en materia orgánica y humedad edáfica (Peña Hueca y Tírez), muestran valores bajos de NDVI (entre 0,1 y -0,4), por lo que digitalmente se discriminan bien de la contaminación urbana y/o agrícola.

CUADRO III
VALORES MÁXIMOS DEL NVDI EN EL INTERIOR DE LAS LAGUNAS

Lagunas	5-11-92	26-8-95	20-2-97	20-8-99	6-6-01	10-9-01
Larga de Villacañas	-0,13	0,32	-0,18	-0,17	-0,37	-0,45
Chica de Villacañas	0,03	0,00	-0,13	-0,04	-0,10	-0,26
El Taray	-0,21	0,04	-0,22	-0,29	-0,42	-0,48
Peña Hueca	0,00	0,04	-0,38	0,10	-0,27	-0,24
Tírez	-0,03	-0,08	-0,42	-0,16	-0,18	-0,26
Miguel Esteban	0,30	0,40	0,24	0,23	0,08	0,23

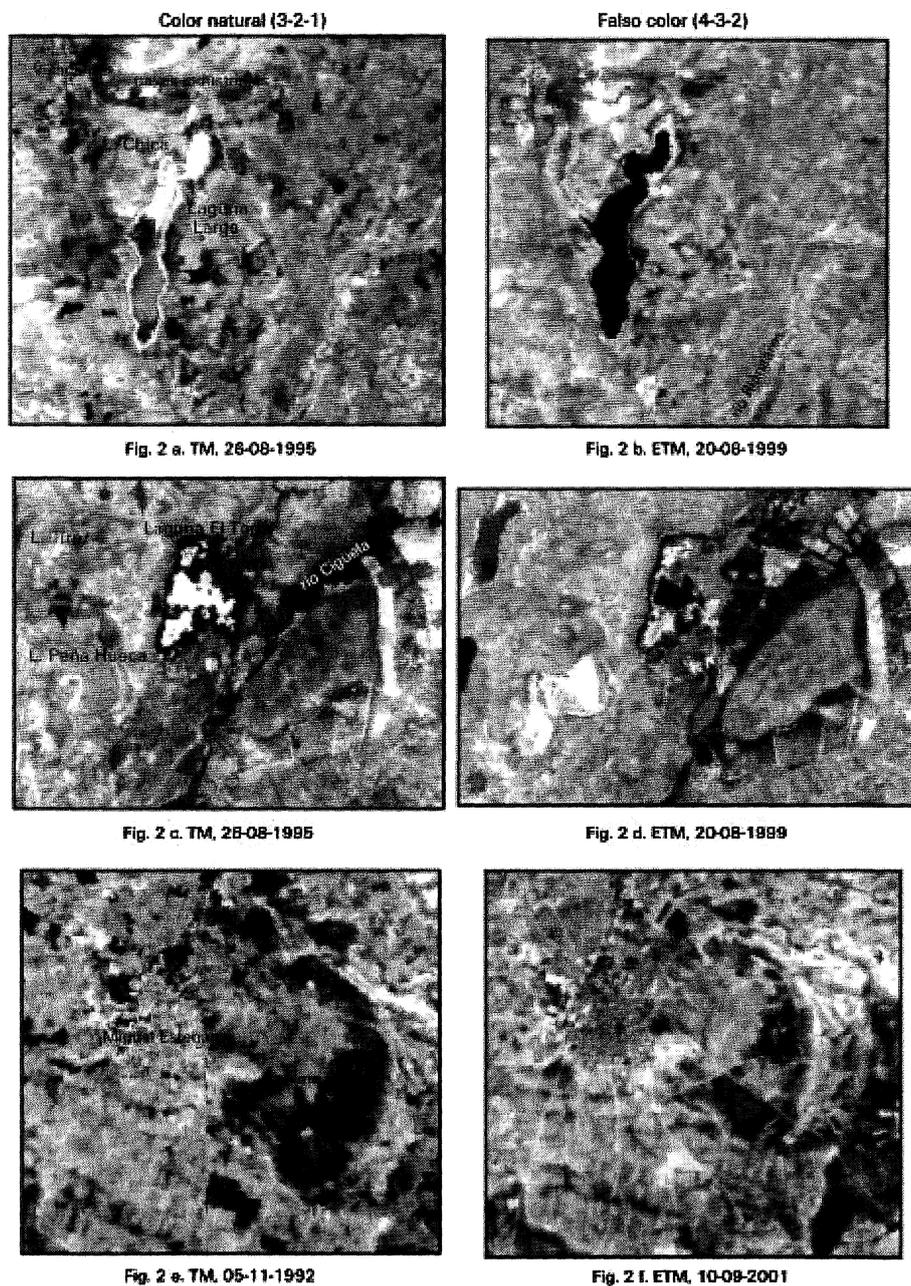


Fig. 2.—Imágenes TM y ETM de las lagunas manchegas analizadas.

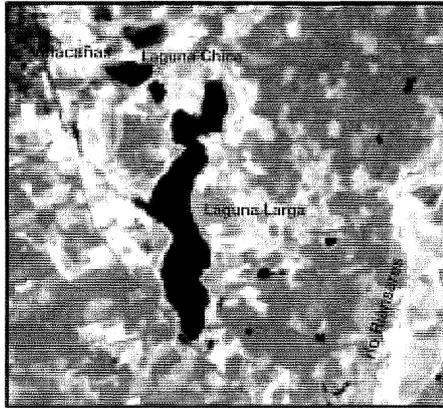


Fig. 3a. 26-08-1995

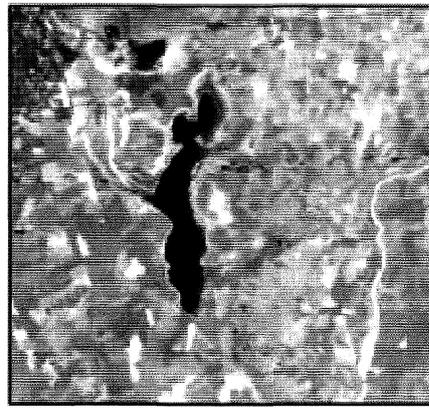


Fig. 3b. 10-09-2001

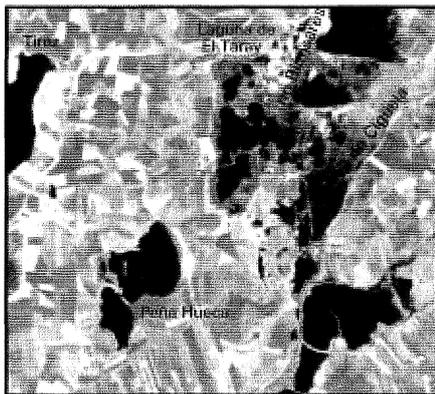


Fig. 3c. 26-08-1995



Fig. 3d. 6-06-2001

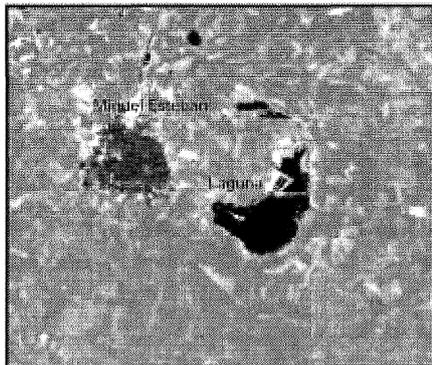


Fig. 3e. 26-08-1995

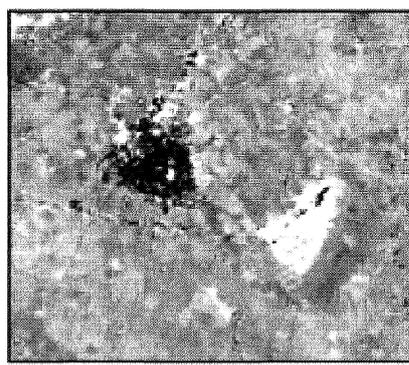


Fig. 3f. 6-06-2001

FIG. 3.—NVDI en lagunas de La Mancha.

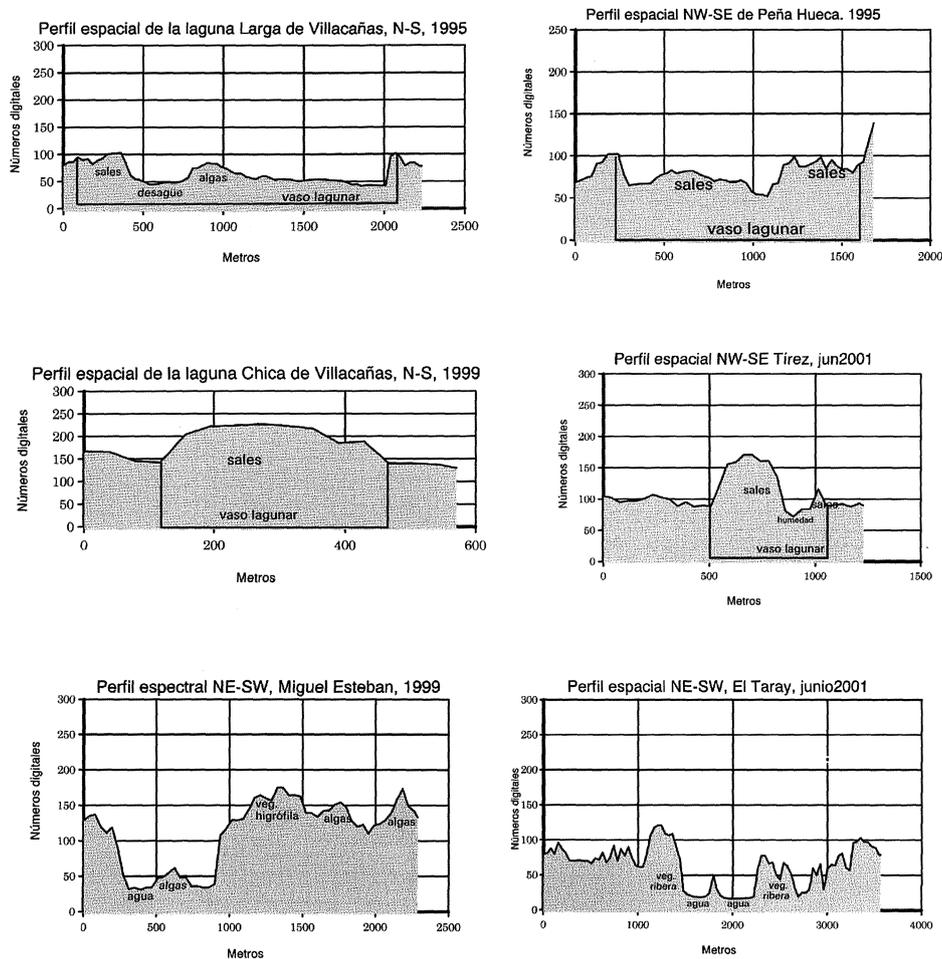


FIG. 4.—Perfiles espaciales de las lagunas, banda 4 de los sensores TM y ETM.

El estudio multitemporal de las imágenes y sus NDVI permiten conocer el ciclo fenológico de la vegetación higrohalófito y su respuesta al estrés hídrico. Analizando los datos de NDVI en la vegetación de ribera (Cuadro IV) llama la atención el valor tan bajo del mes de agosto de 1995, aún menor que en algunos meses de invierno, debido a la intensa sequía que se registró en dicho año. Pese a que esta sequía provocó daños en la vegetación, ésta se recuperó bien a partir de los últimos años

CUADRO IV
VALORES DEL NDVI DE LA VEGETACIÓN DE RIBERA DEL TARAY
(TOLEDO)

	5-11-92	26-8-95	20-2-97	20-8-99	6-6-01	10-9-01
Veg. ribera	0,2	0,08	-0,05	0,55	0,37	0,22

de la década de los noventa, de forma que en primavera de 1999 ya hay valores de NDVI elevados; esto refleja la rápida recuperación de estos espacios cuando no tienen déficit de agua. En el siguiente cuadro se ha recogido los valores del NDVI de la vegetación de la laguna del Taray, como muestra más representativa de la variabilidad interanual.

Para discriminar la vegetación natural higrohalófila de las altas concentraciones de algas desarrolladas por un exceso de nutrientes se han efectuado también análisis sobre los valores digitales en las diferentes lagunas. Se ha observado que es en la banda 4, infrarrojo próximo, en la que mejor se discrimina la eutrofización, aunque también en la región espectral del canal 2 (color verde) es posible establecer algunas diferencias entre los diferentes tipos de vegetación. Por esta razón se han realizado cortes longitudinales en los vasos lagunares para el canal 4. En la fig. 4 se han seleccionado los más representativos en distintas fechas para cada una de las lagunas. En ellos se puede observar que los valores más altos en la banda 4 corresponden a la vegetación higrófila que rodea o incluso penetra en el vaso lagunar. Pero también hay valores elevados en aquellos sectores en los que se acumulan las algas y en las lagunas con alto contenido en sales. Esto último induciría a confusión si sólo se considerara esta banda, puesto que no permitiría discriminar las áreas eutrofizadas de aquellas con alta salinidad. Sin embargo el análisis de otros canales, especialmente los correspondientes al espectro visible permite distinguir ambas, puesto que en éstos, las áreas salinas tienen siempre números digitales altos, mientras que las contaminadas tienen valores más pequeños, sobre todo en los canales 1 y 3. El conocimiento de la verdad terreno es imprescindible también para ratificar estas diferencias.

Toda la información obtenida mediante las imágenes de satélite y los estudios de campo permiten confirmar que hay una gran diversidad de

humedales con comportamientos hídricos muy dispares y diferente estado de conservación, por lo que se ha considerado necesario analizar individualmente las lagunas más representativas.

Laguna Larga de Villacañas: sólo muestra contaminación en el interior del vaso lagunar en la imagen de agosto de 1995 (fig. 2 a). Los valores del NDVI son siempre negativos, por influencia de la lámina de agua, salvo en agosto de 1995, cuando la eutrofización de la laguna fue muy alta debido al aporte continuo y sin depurar de los residuos urbanos. A partir de esta fecha se aprecia un cambio notable en la calidad de sus aguas debido principalmente a la instalación y puesta en funcionamiento de una depuradora. Junto a esto, la limpieza de buena parte del borde lagunar (retirada de escombros, basuras y vertedero) ha favorecido la recuperación de la vegetación natural higrohalófila del entorno, muy deteriorada hasta 1998. Debe comentarse que la iniciativa de recuperar la laguna no es sólo por mejorar un espacio natural, sino para poder «vaciar» sus aguas hacia el río Riánsares (principal colector del río Cigüela, y éste del Guadiana). Las imágenes más recientes (1999 y 2001) permiten reclasificar a este humedal como no eutrofizado, pues no se registran valores significativos del NDVI, ni visualmente pueden detectarse concentraciones de algas (figs. 3 a y 3 b).

Laguna Chica de Villacañas: originariamente somera y de alta estacionalidad se ha transformado en laguna permanente debido a la incorporación de vertidos industriales; con ello, se produce en la actualidad un notable incremento del volumen y altura del agua. No obstante, las imágenes no muestran una acusada contaminación acuática, al menos en las imágenes más recientes (fig. 2 b). Sí se aprecia en estas imágenes la drástica reducción de la vegetación natural y de los suelos del entorno de la laguna, en favor de la ampliación de las naves industriales más próximas (bien visible en las imágenes de 1999 y 2001). Esto conlleva directamente al alto riesgo de inundación de algunos sectores industriales. Además, los aportes industriales adicionales, que incrementan considerablemente la lámina de agua original, dan lugar a valores muy bajos del NDVI, aún cuando la laguna tiene respuesta ante la actividad clorofílica de las algas. El análisis evolutivo de este humedal parece confirmar su inmediato deterioro, que puede conducir a su desaparición en un futuro muy próximo. Resultan del todo in-

congruentes en un mismo municipio los grandes esfuerzos para recuperar la Laguna Larga y el claro abandono de la protección de la Laguna Chica, cuando tan sólo distan menos de 1 km. Es evidente el claro interés de la recuperación de la primera por la necesidad de evacuar sus aguas al río Riánsares, afluente del Cigüela y éste parte de cabecera del Guadiana.

El Taray: laguna de origen fluvial y pseudokárstico con aguas que oscilan de dulces a salobres. En las imágenes de satélite se cartografía con precisión los sectores inundables de la laguna y la extensa superficie ocupada por la vegetación higrófila. No se aprecia contaminación ni presenta altos contenidos salinos, aún cuando en las imágenes de verano (1995 y 1999) la laguna aparece en tonos muy blancos que responden al ascenso de yesos por capilaridad y a una intensa desecación del suelo. El uso del canal infrarrojo cercano en las imágenes en falso color (fig. 2c y 2d) muestra las variaciones fenológicas de la vegetación de ribera y su respuesta al estrés hídrico a lo largo de la década analizada, especialmente intenso en 1995. El perfil espacial de la banda 4 (fig. 4) recoge la alternancia de sectores inundados y de extensos carrizales y masegares, característicos de un humedal dulce y bien conservado. La dinámica de esta vegetación se observa bien en los valores altos del NDVI (fig. 3c y 3d), con una máxima respuesta entre junio y septiembre de los años más húmedos.

Peña Hueca: es una laguna salina con aportes naturales de aguas subterráneas y subsuperficiales y con un alto manejo por parte del hombre de su lámina de agua, encaminado al relleno del vaso con aguas subterráneas de pozos próximos (Sánchez *et al.*, 1999). Por ello las imágenes de satélite presentan, visualmente, un gran contraste desde tonos muy claros (tanto en color natural como en infrarrojos) —cuando se ha producido una fuerte desecación del suelo y se forman en superficie pequeñas eflorescencias salinas—, hasta tonos oscuros —cuando se forman en superficie grandes cristales de sales, aún cuando mantiene una elevada humedad edáfica (fig. 2 c y 2 d)—. Como el manejo del agua sólo es posible en aquellos años en los que hay suficiente cantidad de agua subterránea, las imágenes presentan una gran variabilidad interanual entre los años de sequía (1992 y 1995) y los más húmedos (1999 y 2001). El suelo de la laguna está formado por acumulaciones importantes de

materia orgánica (sapropel) reconocible en las imágenes en color natural. Este sapropel tiene valores de NDVI muy bajos. En el análisis espacial de la banda 4 (fig 4) se observan valores más altos en aquellos sectores dónde hay mayor recubrimiento de sales; los valores más bajos están en los puntos con mayor humedad. Llama la atención que la variedad cromática observable en diversas combinaciones de bandas se advierte especialmente en verano, cuando sobre el suelo se han formado cristales de yeso y otras sales de diferente tamaño. Los tonos más blancos se corresponden a sectores lagunares con menor humedad edáfica y por tanto, con mayor desecación. *In situ*, estas áreas muestran un suelo seco y pequeñas eflorescencias salinas. Por el contrario, los sectores con aportes de aguas subterráneas (que no llegan a emerger en superficie durante el estío) ofrecen en las imágenes tonos muy oscuros, señal de una elevada humedad edáfica, aún cuando en superficie se hayan formado grandes cristales de yeso. La disparidad de tamaños en los cristales debe ligarse a su ascenso por capilaridad, proceso en el que se requiere agua.

Tírez: a diferencia de la laguna anterior, ésta tiene una gestión mucho menor de su lámina de agua, aunque también es una laguna hipersalina con formación de extensas costras de sales en verano. Contrariamente a lo que cabría esperar este humedal salino presenta tonos muy oscuros en las imágenes de color natural y falso color. De ello se puede deducir que el sensor capta información de la capa subsuperficial rica en humedad y materia orgánica. No obstante, el perfil espacial sí recoge las variaciones en el contenido de sales y humedad dentro del vaso lagunar (fig. 4). Esta laguna presenta en las imágenes una mayor homogeneidad cromática que la de Peña Hueca debido a que tiene ciclos hídricos más naturales.

Miguel Esteban: es una laguna fuertemente antropizada ya que recibe los aportes sin depurar del pueblo del mismo nombre. Está formada por dos vasos lagunares, separados por un sector central colonizado por vegetación de ribera. El área máxima inundable le confiere una forma ameboide (fig.2 e, f). El análisis multitemporal de las imágenes permite afirmar que la laguna está fuertemente eutrofizada. En las imágenes de 1992 se aprecia el canal de desagüe (fig. 2 e) y en la combinación 4-3-2 destaca la alta respuesta al infrarrojo cercano, señal

de la presencia de abundantes masas de algas, mucho más numerosas en el año 2001, en el que colonizan casi toda la laguna. Las imágenes obtenidas mediante el NDVI destacan los altos valores de la vegetación tanto superficial como subacuática y confirman los elevados índices de eutrofización en los últimos años. En el perfil espacial de la banda 4 (fig. 4) se obtienen números digitales más altos en los sectores ricos en algas y en los que sustentan vegetación higrófila. Cabría recomendar a este municipio que llevara a cabo la depuración de sus aguas, al igual que han hecho otros pueblos de la comarca como Villacañas y Alcázar de San Juan, finalizando así con la contaminación de sus respectivos humedales.

Conclusiones

La contaminación y eutrofización de las aguas de los humedales se detecta con nitidez mediante teledetección en lagunas someras (con una altura del agua inferior al medio metro aproximadamente), espesor que tienen la casi totalidad de lagunas manchegas, a excepción de los meses de invierno. Con niveles más altos (en torno a un metro) la contaminación queda enmascarada por la gran absorción de energía por parte del agua. Por lo tanto, las imágenes de invierno, idóneas para cartografiar la extensión superficial máxima de las diferentes higrócoras, no resultan adecuadas para el control de la contaminación acuática.

Para diferenciar la vegetación higrófila de la subacuática resulta muy útil la combinación de los canales visibles, 3-2-1 (que ofrece imágenes en color natural), ya que las algas presentan tonos verdosos y la vegetación de ribera muy oscuros. Sin embargo, en esta combinación los sectores eutrofizados se pueden confundir, en lagunas salinas, con acumulaciones de materia orgánica (sapropel). Por ello, es imprescindible conocer la respuesta espectral de los canales infrarrojos y la verdad terreno.

El análisis comparativo de NDVI a lo largo de una década ha permitido conocer el ciclo fenológico de la vegetación natural y detectar la evolución de la contaminación acuática. Las imágenes obtenidas mediante el NDVI detectan aquellas áreas donde hay más vegetación higrófila y los humedales eutrofizados, ya que en ambos casos se obtienen tonos muy blancos. Sin embargo, utilizando sólo la imagen del NDVI no

es posible distinguir a cuál de las dos causas responden estos tonos, por lo que es preciso obtener los valores numéricos de este índice. El valor del NDVI en el caso de la vegetación de ribera es mucho más alto que en los sectores de la laguna donde son abundantes las algas, ya que en la respuesta espectral de éstas interfiere el valor del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- CASADO, S. y MONTES, C. (1995): *Guía de los lagos y humedales españoles*, Ed. J. M. Reyero, 25 pp.
- CIHLAR, J.; ST. LAURENT, L. and DYER, J. A. (1991): «Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables», *Remote Sensing environment* 35; 279-298.
- CIRUJANO, S. (1981): *Estudio florístico, ecológico y sintaxonómico de la vegetación higrófila de la Submeseta Sur*. Tesis Doctoral. Madrid, Fac. Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid.
- CUSTODIO, E. (1987): *Peculiaridades de la hidrología de los complejos palustres españoles. Seminario sobre las bases científicas para la protección de los humedales en España*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 43-64.
- DANTIN CERECEDA, J. (1929): «Localización de las zonas endorreicas de España», *Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, T. XV, 829-836.
- FORNÉS, J. M. (1994): *Hidrología de algunas lagunas de Castilla-La Mancha*. Tesis Doctoral, U.C.M, Tomo I: 315, pp. Tomo II: Anejos.
- FRASER, R. N. (1998): «Multispectral remote sensing of turbidity among Nebraska Sand Hills lakes», *Int. Jour. Remote Sensing*, NO 19: 3011-3016.
- GALLO, K. P., HEDDINGHAUS, T. R. (1989): «The use of satellite derived vegetation index as indicators of climatic variability», *Amer. Meteorol. Soc. Sp` sixth conference on applied climatology*. Charleston S.C.
- 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.
- HODGSON, M. E.; JENSEN, J. R.; MACKAY, H. E. Jr., and COULTER, M. C. (1987): «Remote sensing of wetland habitat: a wood stork example», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53: 1075-1080.
- JONG, S. M. (1994): «Applications of Reflective Remote Sensing for Land Degradation Studies and Mediterranean Environment», *Netherland Geo Geographical Studies* 177. Thesis, Fac. Geographical Sciences. Utrecht Univ. 237 pp.
- LLOYD, D. (1989): «A phenological description of Iberian vegetation using short wave vegetation index imagery», *Int. Journal Remote sensing*, 10: 827-833.
- MONTES, C. y MARTINO, P. (1987): *Las lagunas salinas españolas*. En Seminario sobre las bases científicas para la protección de los humedales en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 95-145.
- PATIENCE, N. and KLEMAS, V. V. (1993): «Wetland funtional health assessment using remote sensing and otrer techniques: literature search», *NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-319*, 114 p.
- PEINADO MARTÍN MONTALVO, M. (1994): *Funcionamiento y variabilidad de los geosistemas de los humedales manchegos*. Tesis doctoral, Dpto. A.G.R. y Geografía Física, Universidad Complutense de Madrid, 296 pág. con mapas y anexos. (CD, UCM).

- (1995): *The endorheic complex of La Mancha's lagoons, Spain*. En Morillo, C. y González, J. L. (Edit.) (Management of mediterranean wetlands). Min. De Medio Ambiente, vol. 2; 129-142.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.^a E. (1995): *Humedales de la confluencia de los ríos Riánsares y Cigüela: estudio de ciertas funciones relevantes en Geografía Física*. Tesis doctoral, inédita. Dpto. A.G.R. y Geografía Física, Universidad Complutense de Madrid, 271 pág. y 3 mapas DNA A0. (CD, UCM).
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.^a E.; 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 Álvarez*, Ed. Complutense, Vol. II, 1655-1666.
- PLANS, P. (1969): «Problemas del endorreísmo español», *Rev. de la Real Academia de Ciencias*, 271-309.
- POLVORINOS, A. J.; FORTEZA, M; HERNÁNDEZ, M. J. (2001): «Monitorización de parámetros hídricos del embalse de Aracena mediante imágenes landsat», en *Teledetección y Cambio Global* (Coord. Rosell J. y Martínez-Casasnovas, J. A. Ed. Milenio, págs. 334-337.
- REESE, H. M.; LILLESAND, T. M.; NAGEL, D. E.; STEWART, J. S.; GOLDMANN, R. A.; SIMMONS, T. E.; CHIPMAN, J. W. and TESSAR, P.A. (2002): «Statewide land cover derived from multiseasonal Landsat TM data. A retrospective of the WISCLAND project», *Remote sensing of Environment*, vol. 82, 2-3, 224-237.
- RUIZ VERDÚ, A.; DOMÍNGUEZ, J. A., HOYOS, C. y PEÑA, R. (2003): «Teledetección del fitoplacton en aguas continentales», en *Teledetección y Desarrollo Regional* (coords. Pérez R. y Martínez P.). Ed. X Congreso Nacional de teledetección, Cáceres, págs. 77-80.
- SÁNCHEZ PÉREZ DE EVORA, A.; GARCÍA RODRÍGUEZ, M.^a y PÉREZ GONZÁLEZ, M.^a E. (1999): «Cambios paisajísticos en la llanura de inundación del río Cigüela (Toledo)». En: Castaño, S y Quintanilla, A, (Edits): *Teledetección, Avances y Aplicaciones*, Papeles de la Diputación de Albacete: 41-44.
- SYDOR, M. (1998): «Remote-sensing technique for determination of the volume absorption coefficient of turbid water», *Applied Optics*, 37: NO 21: 4944-4950.
- XIAO, X; BOLES, S.; FROLKING, W.; SALAS, B. & MOORE III, C. LI. (2002): «Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using Vegetation sensor data», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, 15: 3009-3022.

OTRAS FUENTES:

<http://www.jccm.es/agricul/medioambiente/mednat/alcazar/mapa.htm>

RESUMEN: En este trabajo se establece una metodología para determinar la contaminación acuática de humedales interiores utilizando imágenes del satélite Landsat. La información conjunta de la verdad terreno y del análisis visual y digital de las imágenes, permite detectar las superficies acuáticas más eutrofizadas. El empleo del Índice de Vegetación de diferencia Normalizada (NDVI), muy común para el estudio de la vegetación natural y de los cultivos, resulta muy útil para cartografiar los sectores lagunares más contaminados. Por último, la serie temporal de imágenes de los sensores TM y ETM posibilita el estudio evolutivo reciente de los contaminantes.

PALABRAS CLAVE: Teledetección, humedales, contaminación, eutrofización, La Mancha.

ABSTRACT: This paper establishes a methodology to determine the hydric contamination of inner wetlands, using Landsat satellite remote sensing images. The information gat-

hered and joined from field prospection and visual and digital imagery analysis, allows to detect the aquatic surfaces with higher contamination. The use of Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), commonly used in natural vegetation and crops studies, results highly useful for mapping the areas with the highest contamination levels. Finally, the availability of multitemporal TM and ETM imagery series allows recent and evolutive studies on algae pollution.

KEY WORDS: Remote sensing, wetlands, contamination, eutrophytation, La Mancha.

RÈSUMÉ: Dans cet article nous avons établi une méthodologie pour déterminer la contamination des zones humides de l'intérieur avec l'aide du satellite Landsat. Le information du champ et l'analyses des images permettent détecter les surfaces aquatiques plus contaminées. Le NDVI, très utile pour l'étude de la végétation et des cultures, est aussi utile dans l'étude des lagunes plus contaminées. Les séries multitemporals des images des senseurs TM et ETM rendent possible les analyses de la récente évolution des contaminants.

MOTS CLÉS: zones humides, teledetection , contamination, La Mancha.