

Evaluación del estado trófico de los embalses mediante imágenes digitales

RAMON PEÑA MARTINEZ (*)
MARIA LUISA SERRANO PEREZ (*)

RESUMEN. Como consecuencia de la cada vez mayor preocupación por la conservación de la calidad del agua, ha surgido un gran interés por la búsqueda de tecnologías que resulten útiles para evaluar de forma global y rápida el Estado Trófico de los embalses. Dentro de estas tecnologías destaca el empleo de sensores a bordo de aviones o satélites artificiales, técnica denominada Teledetección (Remote Sensing). El sensor Thematic Mapper (TM) situado a bordo del satélite Landsat 5 se utiliza para cartografía temática de embalses. La metodología empleada consiste en establecer unas relaciones empíricas a partir de los datos de conteo radiométrico proporcionados por el sensor y datos «in situ» de variables limnológicas tomados simultáneamente. Se analizan diferentes aspectos de esta aplicación.

ASSESSMENT OF THE TROPHIC STATE OF RESERVOIRS USING DIGITAL IMAGES

ABSTRACT. *As a result of an ever-increasing concern for the preservation of water quality, great interest has been aroused in the search for useful technologies which can provide an overall and rapid assessment of the Trophic State of reservoirs. Such technologies include the use of sensors installed on aeroplanes or artificial satellites, this technique being referred to as Remote Sensing. The Thematic Mapper (TM) sensor on board the Landsat 5 satellite, is used for the thematic mapping of reservoirs. The methodology used, consists of establishing a series of empirical relationships on the basis of radiometric counting data provided by the sensor, together with «in situ» data concerning the limnological variables which is taken simultaneously. Different aspects of this application are analyzed.*

CALIDAD DE AGUA Y EUTROFIZACION

El desarrollo de los acontecimientos a nivel planetario ha ido produciendo efectos negativos sobre el medio ambiente de la Tierra, debido al desequilibrio entre el incremento de la actividad humana y las necesarias precauciones defensoras de las condiciones naturales que tal actividad requiere, tanto por sus características como por el ritmo, a veces incontrolado, con que a menudo se produce.

Esta situación mundial ha venido generando también, de forma paralela, una progresiva preocupación por el deterioro que el medio natural sufre.

La necesidad de conservar los recursos naturales, y en particular el agua, en buenas condiciones para su utilización y disfrute por la población y en equilibrio ecológico con el resto de los recursos, ha determinado que se haya venido fijando la atención en procesos naturales que, más o menos recientemente se han agudizado

y extremado, como es el caso de la eutrofización de los ecosistemas acuáticos.

Aunque el término «eutrófico» (del griego «eu» = bien y «trofe» = alimentado) se ha venido utilizando desde 1907 (Wheler), su significado, es decir, el sentido de su aplicación, ha sufrido ciertas matizaciones hasta nuestros días por numerosos especialistas en Limnología. En 1976 el profesor Margalef se refería a la eutrofización como «la fertilización paulatina de las aguas naturales, que va aumentando su producción en materia orgánica, con la considerable pérdida de calidad de agua».

La eutrofización natural es un proceso lento e irreversible, en estrecha relación con las condiciones externas del ecosistema acuático.

La eutrofización debida a la actividad humana, por el contrario, puede ser muy rápida, pero reversible, en función de la reducción de las fuentes de nutrientes anormalmente incrementadas.

EFFECTOS DE LA EUTROFIZACION

El proceso de eutrofización determina un aumento de la biomasa tanto del fitoplancton como de macrófitas y

(*) Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPT).

perifiton, generalmente acompañada de la disminución de la diversidad de especies del ecosistema.

Se producen variaciones cualitativas y cuantitativas en la biomasa planctónica (se pueden producir desarrollos superficiales o floraciones), béntica y litoral, así como en la población piscícola, en la que se producen desplazamientos de las especies superiores por otras inferiores.

Disminuye también la transparencia del agua y se altera el color azulado natural. Se modifica el perfil vertical de concentración en oxígeno disuelto y, en época de estratificación, dicho oxígeno se va agotando progresivamente en la zona inferior. Igualmente se produce un aumento del nivel de nutrientes (fósforo y nitrógeno) con aparición, como consecuencia de los profundos cambios que se van produciendo, de otros compuestos como ácido sulfúrico, amonio, hierro y manganeso, formación de gas metano en sedimentos, etc.

Debido a todo ello se modifican las características organolépticas del agua (olor, color, sabor, etc.) empeorando la calidad para muchos de sus usos.

MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO

La preocupación por estos procesos genera inmediatamente la necesidad de localizar y cuantificar, en cuanto sea posible, la aparición de niveles de aviso o de alarma, así como su evolución en el tiempo y la predicción de su tendencia.

El diagnóstico y seguimiento de la eutrofización requiere estudios tecnológicos convencionales de múltiples parámetros (oxígeno disuelto, pH, anhídrido carbónico, amonio, nitratos, fósforo soluble, fósforo total, hierro ferroso y férrico, manganeso, potencial redox, sulfato, ácido sulfhídrico, sílice, etc.), así como la evaluación de la producción primaria, biomasa bacteriana y otros. Estas determinaciones deben referirse a algunos puntos representativos de la superficie y a diversos niveles de profundidad en la columna de agua.

Una solución alternativa, aunque no sustitutiva, es la utilización de medios de percepción remota para identificar y evaluar algunos aspectos representativos del proceso de eutrofización. Esta es la línea que se pretende desarrollar mediante la teledetección utilizando imágenes digitales de la superficie terrestre.

TELEDETECCION DE RECURSOS NATURALES

En los últimos años, con el gran desarrollo tecnológico que se ha producido en los sistemas informáticos y también con la aparición de los satélites artificiales de observación de la Tierra, se han puesto a disposición de la comunidad científica unas nuevas herramientas de trabajo que permiten analizar las condiciones naturales con más elementos de discriminación y técnicas de tratamiento informático cada vez más sofisticadas.

La teledetección es una técnica aplicada sujeta, por tanto, a una constante evolución progresiva, adaptándose a los nuevos medios disponibles, tanto de vehículos portadores, como al desarrollo de sensores más preci-

sos, más perfectos o que cubren otras zonas del espectro de radiaciones electromagnéticas.

Los vehículos portadores pueden ser de muchos tipos: helicópteros o avionetas, que vuelan a pocos centenares de metros del suelo; aviones, que pueden navegar a varias alturas pero con un techo limitado; satélites artificiales, que circulan por el espacio en órbitas a centenares o miles de kilómetros de altitud sobre la Tierra.

Los sensores son igualmente de muchas clases, ya que pueden ser monocanales, pancromáticos, infrarrojos o multicanales como los sensores multispectrales, que cubren diferentes ventanas o intervalos de longitud de onda a lo largo del espectro de radiaciones electromagnéticas, pudiendo extenderse por el espectro visible, infrarrojo cercano, medio o térmico, o incluso hasta las microondas, con los sensores de ondas de radar. También se han realizado experiencias con fotografía de alta resolución con cámara métrica y la de gran formato, así como con emisores-sensores de rayos láser.

SELECCION DEL SISTEMA ADECUADO

En el planteamiento de los proyectos que se han de llevar a cabo por teledetección ha de tenerse muy en cuenta el objetivo a alcanzar y la expansión territorial a la que afectan para elegir el sensor adecuado en cada caso. Se puede centrar el estudio en un embalse determinado, realizando un seguimiento temporal de la evolución del estado trófico, y en concreto de las variables indicativas seleccionadas, y a partir de ahí extraer conclusiones sobre posibles factores que puedan influir en dicha evolución; en este caso es muy importante la periodicidad o frecuencia de paso del satélite. En contraposición al enfoque anterior se puede fijar como objetivo abarcar zonas extensas con numerosas masas de agua para estimar, de forma general, el estado de la calidad en una fecha concreta de los embalses de una cuenca hidrográfica, provincia, comunidad autónoma, etc. Este último tipo de planteamiento supone el máximo aprovechamiento de la teledetección ya que la obtención de la misma información a través de un estudio limnológico convencional resultaría una tarea extraordinariamente costosa.

El sensor más utilizado actualmente para la cartografía temática de embalses es el Thematic Mapper (TM) situado a bordo del Landsat 5 del programa de satélites Landsat diseñados para la observación de recursos naturales. El explorador de barrido «Multispectral Scanner» (MSS) instalado en los Landsat desde el principio, ha sido empleado en numerosos estudios de calidad de agua, pero el TM, que se incorporó a partir del Landsat 4 ha supuesto un notable impulso en el programa Landsat. Es un equipo de barrido multispectral al igual que su predecesor MSS pero bastante más sofisticado. Se considera que su alta resolución espectral, capaz de discriminar siete bandas de longitud de onda desde el visible hasta el infrarrojo térmico, permite obtener amplia información, y su resolución espa-

cial, en la que el pixel corresponde a un cuadrado de 30×30 m, es adecuada para diferenciar masas de agua importantes. Su resolución temporal nos proporciona una imagen de la misma zona cada 16 días. Cada órbita abarca una superficie aproximada de 185 km de lado. Todas estas características hacen de este sensor una herramienta de gran utilidad ya que supera la resolución espectral, espacial y radiométrica del sensor MSS (4 bandas, pixel de 79 m).

Existen también otros satélites diseñados para el estudio de los recursos naturales: El satélite SPOT (resolución 10 m en el canal pancromático y 20 m en el multibanda); el satélite MOS-1 con un sensor de menor resolución que el TM (50×50 m); el ERS-1, primer satélite de observación terrestre desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), que incorpora un radar de apertura sintética; la familia Tiros-NOAA (con el sensor AVHRR) de 1,1 Km de resolución), etc. Estos satélites, debido a sus características, han sido utilizados para diversas aplicaciones en teledetección, pero apenas se han aplicado en el estudio de las aguas continentales.

TELEDETECCION PARA EL DIAGNOSTICO DE EMBALSES

La interacción entre la energía electromagnética y el agua químicamente pura ha sido estudiada por numerosos investigadores. La transmisión de dicha energía electromagnética a través de cualquier medio va siempre acompañada por la pérdida de parte de la energía radiante por absorción. La mayor parte de la energía que penetra en el agua de un lago o embalse es atenuada, por tanto, debido al proceso de absorción. Aunque sólo un pequeño porcentaje de la energía incidente es reflejada (menos del 3 %), esta radiación es el principal foco de interés en las investigaciones de la calidad de agua por teledetección. Las características espectrales del agua se ven modificadas por la presencia de materiales en suspensión, como sólidos inorgánicos, plancton, macrófitas e incluso en algunos casos debido a la percepción de los materiales del fondo. Por tanto, la exactitud en la interpretación de la superficie del agua es función del tipo de sensor empleado en la adquisición de los datos espectrales.

SELECCION DE VARIABLES

Los sensores remotos pasivos como el TM de Landsat no son capaces de detectar todos los indicadores tróficos que interesan en limnología como, por ejemplo, los nutrientes fósforo y nitrógeno. Sin embargo, dichos nutrientes estimulan la producción de algas cuyos efectos en la masa de agua son medibles en términos de reflectancia. De ahí se deduce que las variables indicadoras elegidas deben ser tales que produzcan una modificación de las propiedades ópticas del agua cuando su valor se vea alterado.

Tres parámetros limnológicos asociados con el fenómeno de la eutrofización se evalúan preferentemente: la

clorofila a (mg/m^3) como indicadora de la biomasa de algas, la transparencia del agua medida con el disco de Secchi (m) y la temperatura superficial del agua ($^{\circ}\text{C}$). El valor de estas variables es susceptible de cambiar en función del mayor o menor grado de eutrofización de la masa de agua. La variación de estos parámetros se traduce en cambios en la radiancia espectral detectada por el satélite en las diferentes «ventanas» de longitud de onda de los sensores.

La concentración de clorofila a determina que el contenido en pigmentos se manifieste en un nivel de intensidad en el color verde del agua, en términos generales. En realidad el pico de máxima absorbancia de la clorofila se sitúa alrededor de los 665 nm ($0,655 \mu\text{m}$) que se encuentra en la ventana espectral de la banda 3 TM, pero es la relación entre las reflectancias en el infrarrojo cercano (banda 4) y el rojo del espectro visible (banda 3) lo que representa el vigor de la biomasa que contiene pigmentos, es decir, el fitoplancton de un embalse. La influencia de otros factores hace que tengan que intervenir, aunque en menor proporción, otras bandas, como la del azul (banda 1) o la del verde (banda 2).

El objetivo fundamental puede ser, aprovechando las buenas correlaciones que existen entre los valores de clorofila a y de transparencia, medidas «in situ» a lo largo de la superficie del embalse, con los valores de conteo radiométrico detectados por el sensor para los mismos puntos, obtener unas ecuaciones que sean capaces de predecir la clorofila y la transparencia y extrapolar esa relación a otras masas de agua pertenecientes a la misma imagen.

Para determinar las relaciones estadísticas entre los datos detectados por los sensores y los parámetros, se realizan análisis de correlación y regresión. En general la transparencia de Secchi suele variar de forma inversa a la clorofila, es decir, concentraciones de clorofila altas se corresponden con bajas transparencias aunque existen factores externos que pueden alterar esta correlación inversa dificultando la obtención de buenos resultados en las ecuaciones de regresión, como es la presencia de turbiedad inorgánica.

Se han utilizado también sensores remotos para la estimación de la concentración de sólidos en suspensión en embalses. Se estudia la posibilidad de incorporar esta variable a las estimadas actualmente, no sólo como otro parámetro más, sino como un factor de corrección de las ecuaciones predictivas de la concentración de clorofila.

METODOLOGIA DE TRABAJO

1. TOMA DE MUESTRAS

Se han de realizar campañas de toma de muestras con el fin de obtener los datos de apoyo necesarios para cartografiar los valores de las variables limnológicas.

Es necesaria una toma de datos de superficie coincidiendo con el paso del satélite. Para ello hay que tener en cuenta una serie de consideraciones:

— Estimar las órbitas de Landsat necesarias para

abarcar la zona de estudio, así como las correspondientes fechas, horas de pasadas y zonas de solape.

- Elegir los puntos de muestreo en número global significativo para cada fecha, bien distribuidos a lo largo de la superficie, desde la presa hasta la cola, abarcando todas las zonas de posible variación de los parámetros. Se debe evitar en lo posible la toma de muestras demasiado cerca de la orilla (a menos de 90 m) y en zonas poco profundas, para evitar interferencias del terreno circundante y del fondo en la radiancia registrada por el sensor. La situación de estos puntos de muestreo debe estar registrada con la mayor exactitud posible puesto que dichos puntos han de identificarse también en la imagen digital. Para ello se dispone de mapas topográficos y batimétricos.
- La toma de muestras se debe realizar en varios embalses para aumentar la variabilidad de la población estadística de los datos. El criterio elegido a la hora de seleccionar los embalses es el de abarcar el mayor rango de valores indicativos del grado de eutrofia.
- Es requisito imprescindible que a la hora de paso del satélite (10:30 hora solar, aproximadamente) exista una total ausencia de nubes para considerar la imagen de esa fecha como válida. De ahí que la época estival sea la más indicada para realizar el estudio ya que es generalmente mayor el número de fechas disponibles. De la estrategia de toma de muestras depende en gran parte el éxito en la obtención de las ecuaciones de regresión.

2. PROCESO DE DATOS

El conjunto global de proceso de datos lo podríamos separar en dos fases: por un lado el tratamiento de las imágenes y por otro el análisis estadístico de regresión múltiple entre datos TM y datos de campo. La primera fase mencionada se realiza a través del módulo de Tratamiento Digital de Imágenes del Sistema de Información Geográfica (SIG), GRASS 4.0. Los Sistemas de Información Geográfica se definen como un conjunto de herramientas informáticas mediante las que se pueden almacenar, procesar, analizar y editar datos numéricos y espaciales. El paquete GRASS 4.0 posee todas las utilidades necesarias para poder obtener información de las imágenes Landsat y procesarla, así como para la elaboración de los mapas temáticos finales. El desarrollo del proceso de datos puede esquematizarse de la siguiente manera:

a) Preparación de los datos:

- Adquisición de las imágenes de Landsat TM en cintas magnéticas compatibles con ordenador (CCT), soporte de acceso universal, barato, y con una gran capacidad de almacenamiento.
- Identificación de la zona de trabajo y determinación de coordenadas de los embalses. La localización de las masas de agua en la imagen se realiza visualizando la banda 4 TM (0,76-0,90 μm) correspondiente al infrarrojo cercano.

La signatura espectral que caracteriza cualquier cubierta viene expresada por una curva que relaciona las distintas longitudes de onda con los valores de reflectancia o emitancia, que constituye el patrón o modelo de respuesta espectral.

El agua se caracteriza por absorber la mayor parte de la energía que recibe, tanto más cuanto mayor es la longitud de onda. Su signatura espectral se caracteriza por tener unos valores moderados en la banda 1 (0,45-0,52 μm) que van disminuyendo gradualmente en las bandas 2 (0,52-0,60 μm) y 3 (0,63-0,69 μm), y a partir de la banda 4 la reflectividad es apenas perceptible. De ahí que en esta zona de longitud de onda haya una destacada diferencia entre la reflectividad del agua y las zonas de terreno (figuras 1 y 2).

- Localización en la imagen de los píxeles correspondientes a los puntos de muestreo y extracción de los valores de conteo radiométrico en esos puntos, de las bandas utilizadas en la regresión estadística posterior. Para minimizar los posibles errores en la localización de los píxeles, se estima la media de los valores radiométricos de la matriz 3×3 que rodea al píxel correspondiente a cada punto.

b) Análisis estadístico. El objeto de este análisis es llegar a obtener una extrapolación válida de los datos de campo obtenidos para unos píxeles determinados, a toda la superficie de los embalses incluidos en la imagen. Es, por tanto, una etapa fundamental en el proceso de datos.

Se realiza mediante un tratamiento estadístico de los datos en que, partiendo de valores de clorofila y transparencia de los puntos de muestreo como variables dependientes y por otro lado los valores de los niveles digitales registrados en cada banda espectral TM como variables independientes, se lleva a cabo un análisis estadístico selectivo de regresiones múltiples, en el que se llega a la combinación de bandas que mejor refleja el comportamiento de las variables.

Una regresión ideal se obtendría con un coeficiente de determinación R^2 de 100 % y un error estándar de la estima igual a cero. En realidad las ecuaciones empíricas resultantes se consideran aceptables con valores de R^2 menores (0,8-0,9) y errores de la estima superiores (10-20 % de la media). Esto no es sorprendente ya que el área de estudio suele tener gran variabilidad de datos. La pérdida de exactitud también puede deberse a factores como ruidos del sensor o un rango relativamente bajo de niveles digitales en comparación con el de los parámetros medidos.

Un factor que interfiere notablemente en la ecuación de regresión se presenta cuando un embalse posee una concentración elevada de sólidos en suspensión. La existencia de esta turbiedad inorgánica hace aumentar de forma general la reflectividad del agua y provoca una mala correlación estadística entre los valores de clorofila y Secchi. En esta situación de alta reflectividad, es difícil discernir qué porcentaje se debe a turbiedad inor-

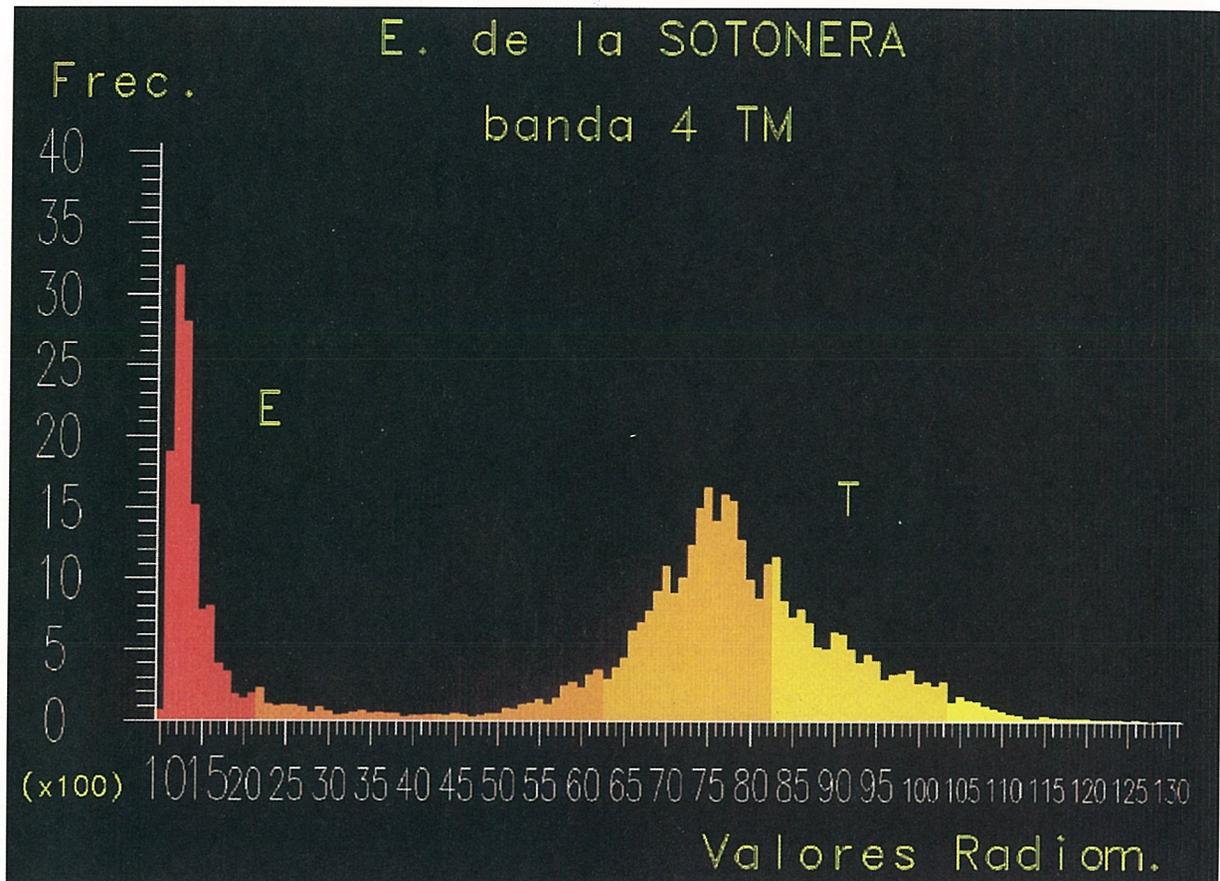


FIGURA 1. Histograma de la banda 4 TM (Infrarrojo Cercano: 0,76-0,90 μm) del embalse de La Sotonera (Huesca). Se observan dos picos claramente diferenciados. «E» corresponde a la zona de agua y «T» al terreno circundante.

gánica y qué parte a una concentración alta de colorofila consecuencia de un elevado grado de eutrofia.

Si debido a estas causas, o por otros diversos motivos, no se obtiene un ajuste satisfactorio en el proceso estadístico entre los datos de campo y la información del satélite se pueden realizar «normalizaciones», en las que se relacionan imágenes de distintas fechas mediante ecuaciones de regresión para las que se han seleccionado valores de conteo radiométrico de zonas de solape entre las dos fechas. De esta forma se puede realizar una extrapolación temporal de los datos con el fin de utilizar ecuaciones de regresión aceptadas para otras fechas.

Para la evaluación y cartografía de la temperatura de superficie de los embalses el proceso de datos es más sencillo ya que la temperatura se relaciona directamente con la radiación emitida por la superficie de la Tierra en el infrarrojo térmico (banda 6 TM). Existen unas ecuaciones que relacionan los valores radiométricos detectados en la banda térmica con las temperaturas debido a una calibración de los conteos. El único tratamiento que debe realizarse es la corrección del efecto

atmosférico (humedad relativa, temperatura, presión) con los datos de radiosondeos de la estación meteorológica más próxima a la zona de estudio.

c) Elaboración de mapas-resultado. Una vez obtenidas las ecuaciones para clorofila, transparencia y temperatura, para la elaboración de las imágenes temáticas se utilizan los módulos aritméticos de GRASS 4.0 y se calculan los valores de los parámetros, pixel a pixel, a lo largo de toda la superficie del embalse.

Para delimitar la zona del tratamiento a la masa de agua exclusivamente se realiza una «máscara» del terreno a partir de un valor «umbral agua-tierra» estimado en la banda 4.

El rango de valores de los parámetros en el mapa se subdivide en una serie de intervalos estableciendo un número de categorías que variará en función del nivel de desagregación que se estime adecuado. A esas categorías se les asignará una leyenda o código de colores identificativo del parámetro en cuestión (figura 6).

Para la representación final se superpone la imagen de terreno que rodea a cada embalse en tonos de gris quedando resaltada en colores la información del agua

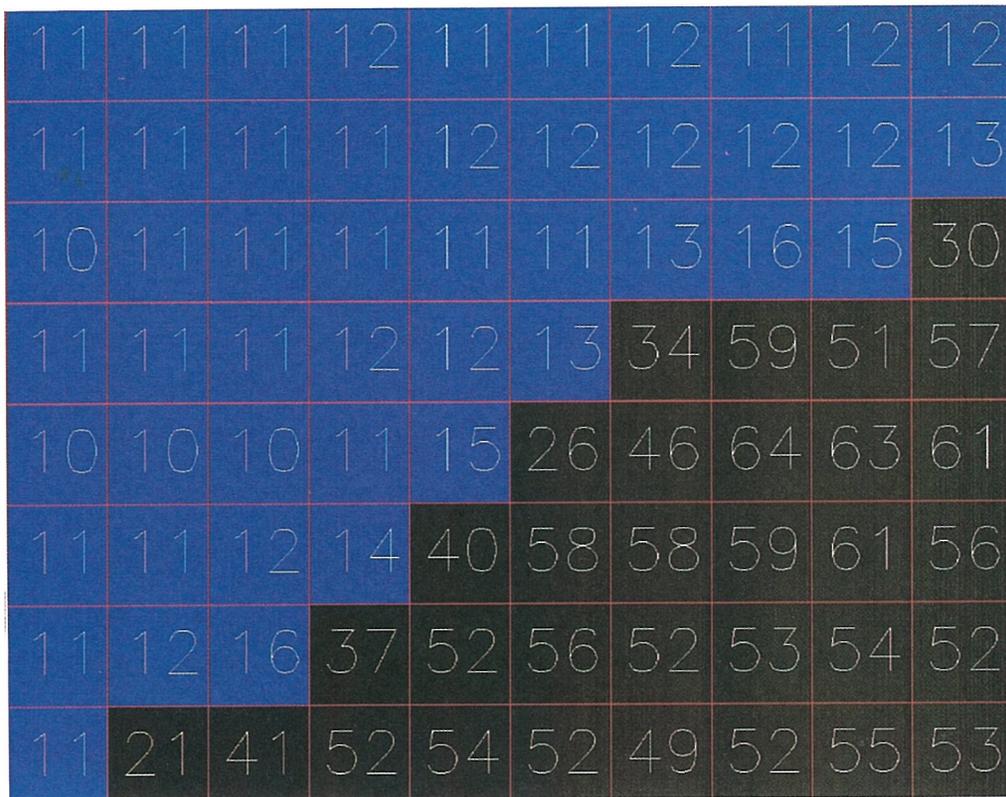


FIGURA 2. Valores radiométricos correspondientes a los píxeles de la banda 4 TM (IC: 0,76-0,90 μm). Los píxeles de color azul identifican zonas de agua y los píxeles de color negro zonas de tierra. Es destacable la diferencia en los valores de ambas superficies en esta banda.

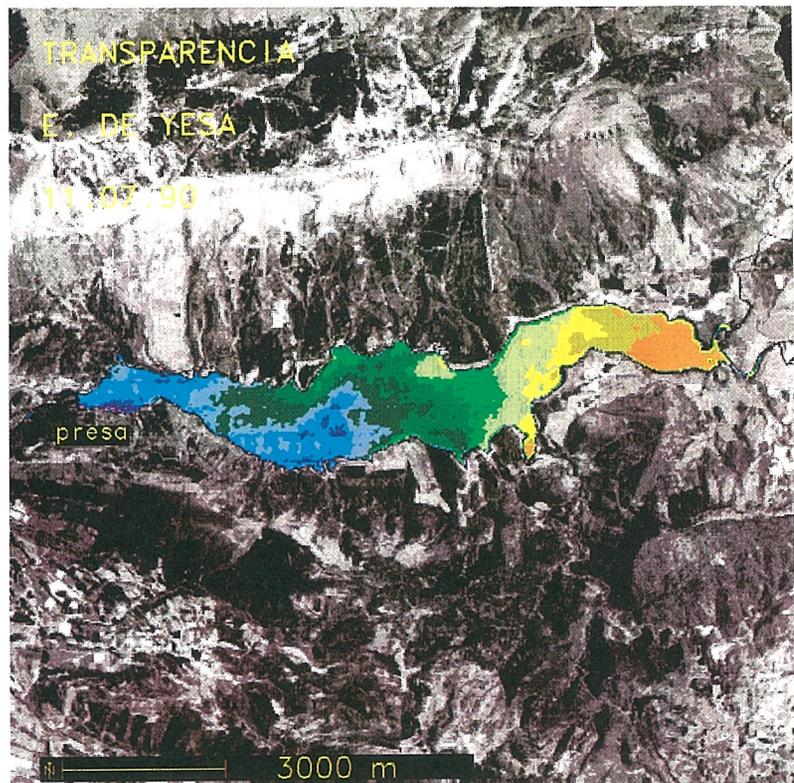


FIGURA 3. Mapa temático de transparencia de Secchi del embalse de Yesa (Navarra).

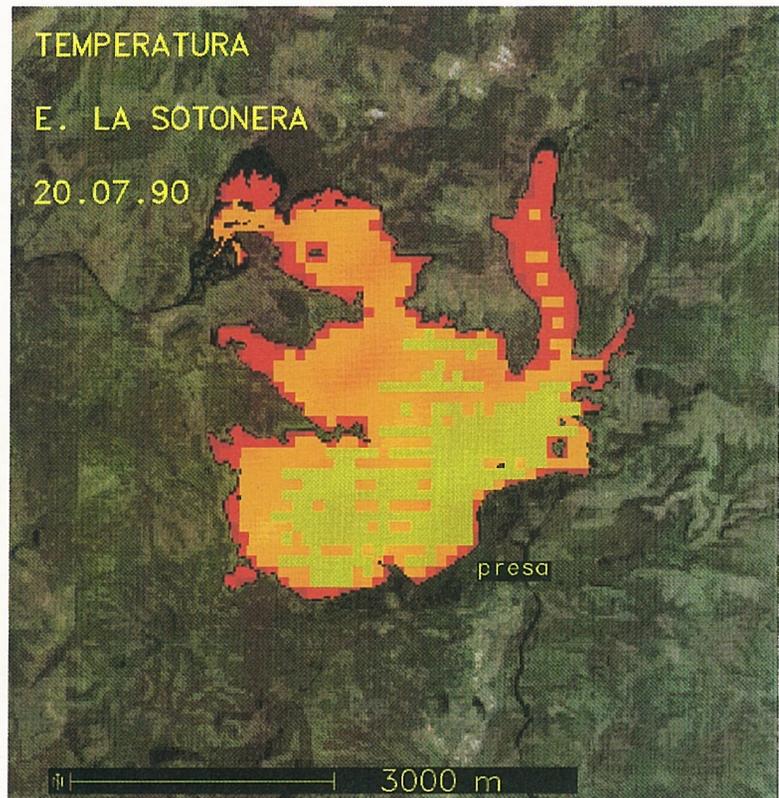


FIGURA 4. Mapa temático de temperatura del embalse de La Sotonera (Huesca).

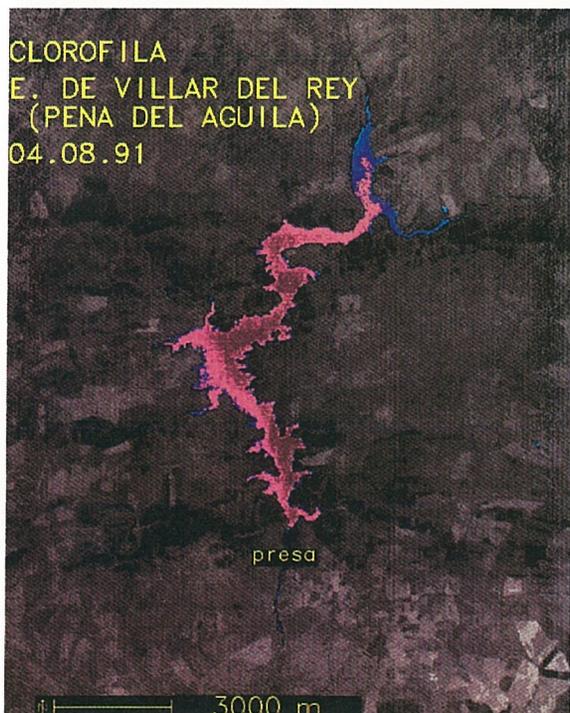


FIGURA 5. Mapa temático de clorofila del embalse de Villar del Rey (Badajoz).

en el mapa temático que es la que realmente interesa en esta aplicación (figuras 3, 4 y 5).

CONCLUSIONES

Se ha comprobado la operatividad de la aplicación en estudios de ámbito regional para el diagnóstico superficial y puntual del estado trófico de los embalses.

En la actualidad se está desarrollando la investigación de la influencia de la turbiedad a nivel espectral en las ecuaciones de clorofila.

Asimismo se estudia el esquema óptimo de los programas de muestreo, tanto en la selección de puntos, por criterios geográficos y cualitativos, como en el tipo de muestra a tomar, superficial o integrada, o en función de la transparencia actual. De igual modo se utilizarán sistemas de posicionamiento geográfico por satélite para la referenciación de los puntos de muestreo.

En el horizonte cercano se perfila la ampliación de la aplicación en sentido de más área cubierta, y sobre todo en su operatividad, con plazos de realización más cortos para que su utilidad sea inmediata, en la misma época del estudio.

BIBLIOGRAFIA

BLACKWELL, R. J., y BOLAND, D. H. (1979): Trophic classification of selected Colorado lakes. *Jet. Prop. Lab., Publication 78-100, EPA. 600/4-79-005.*

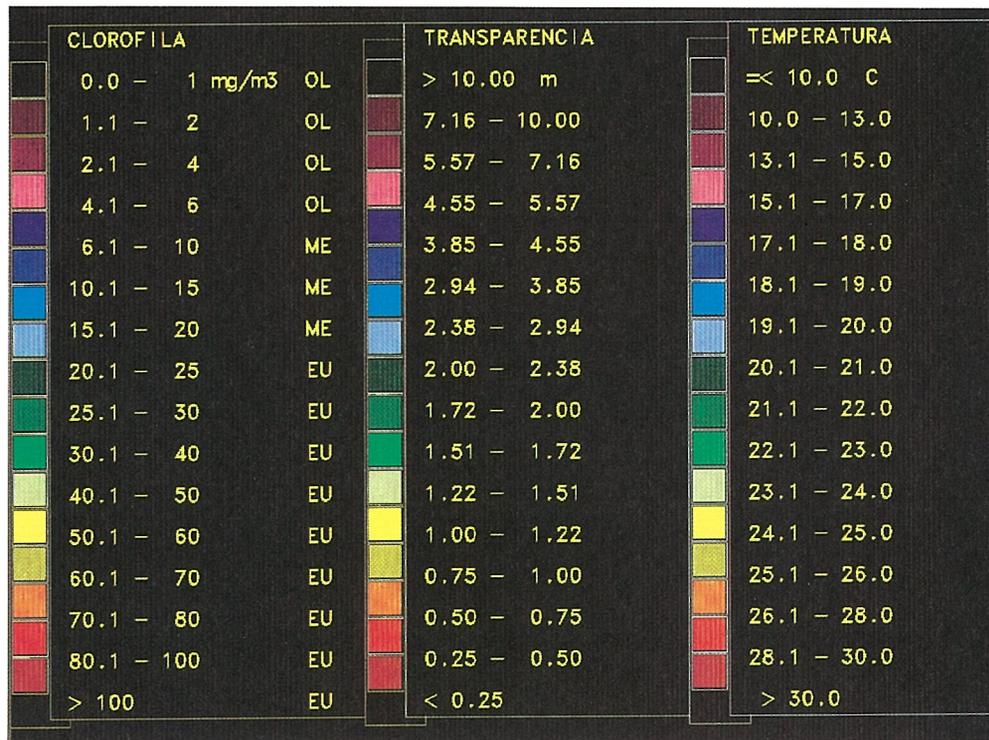


FIGURA 6. Leyenda de categorías de los mapas temáticos y sus correspondientes valores de clorofila, transparencia y temperatura asociados a cada categoría.

CARLSON, R. E. (1977): A trophic state index for lakes. *Limnology & Oceanography*, mar, V. 22 (2).

ECKHARDT, D. (1988): A method of Landsat 5-TM imagery normalization for reservoir multidade studies. Comunicación personal.

LATHROP, R. G., Jr., y LILLESAND, T. M. (1986). Utility of Thematic Mapper data to assess water quality in southern Green Bay and west-central Lake Michigan. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 671-680.

LILLESAND, T. M. (1979). Remote sensing and image interpretation. *John Wiley & Sons, Inc.*, 612 p.

LILLESAND, T. M., et al. (1983): Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota lakes. *Photogr. and Rem. Sensing*, 49: 219-22.

MARTIN, R. H.; BOEBEL, E. O.; DUNST, R. C.; WILLIAMS, O. D.; OLSEN, R. V.; MEREDITH, R. W. Jr., y SCARPACE, F. L. (1983): Wisconsin's Lakes-A Trophic Assessment Using Landsat Digital Data. WI DNR Report S00536601, Madison, Wisconsin, 124 p.

ORTIZ, J. L., y PEÑA, R. (1987): Remote sensing of limnological parameters in reservoirs, Workshop on «Landsat Thematic Mapper Applications», Frascati, Italia, Dic. ESA SP-1102.

ORTIZ, J. L., y PEÑA, R. (1989): Water quality monitoring in Spanish Reservoirs by satellite remote sensing.

PEÑA, R., y ORTIZ, J. L. (1987). Cartografía temática de

embalses: aplicaciones limnológicas de las imágenes Landsat. In: *Comunicaciones de la I Reunión Científica del Grupo de Trabajo de Teledetección*. Inst. Inv. Geol. Jaume Almera. Barcelona, 10-11 dic. 1986, pp. 403-423.

LATHROP, R. G. (1992): Landsat Thematic Mapper monitoring of turbid inland water quality. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 58, n.º 4, pp. 465-470.

SCHIEBE, F. R.; HARRINGTON, J. A., Jr., y RITCHIE, J. C. (1987). Remote sensing of suspended sediments of Lake Chicot. Arkansas. U. S. Army Corps of Engineers, Sixth Remote Sensing Symposium, n.º 2-4, 1987. Galveston, Tx. 77-85.

SCARPACE, F. L.; HOLMQUIST, K. W., y FISHER, L. I. (1979): Landsat analysis of lake quality. *Photogr. Eng. and Rem. Sensing*, 45 (5): 623-633.

VERDIN, J. P. (1984): Limnological applications of multispectral remote sensing. *USBR Report N.º REC-ERC-85-2*, 51 p.

VERDIN, J. P. (1985a): Monitoring water quality conditions in a large Western reservoir with Landsat Imagery. *Photogram. Eng. and Rem. Sensing* 51 (3): 343-353.

VERDIN, J. P. (1985b): Multidade Landsat water quality models. Comunicación personal.

VERDIN, J. P. (1985c): Mapping surface water quality patterns of Lake Havasu with Thematic Mapper imagery. *Appl. Sci. Refej. Memo. No. Ap. 85-4-2*, USBR.