

EVOLUCION DEL ESTADO TROFICO DE TRES EMBALSES DEL JUCAR POR TELEDETECCION

M. L. Serrano Pérez, R. Peña Martínez y O.M. Escayola Calvo
Centro de Estudios Hidrográficos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). P^o Bajo de la Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid. Tel: 335 80 11 - 335 80 12. Fax: 335 79 94. E-mail: Maria.L.Serrano@cedex.es, Ramon.Pena@cedex.es

RESUMEN.- Durante el verano de 1994 el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) realizó un trabajo de seguimiento del estado trófico de los embalses de Beniarrés, Amadorio y Guadalest, pertenecientes a la cuenca del Júcar, mediante imágenes de satélite (Landsat 5-TM). Se evaluaron cuatro parámetros en cada embalse: clorofila *a*, transparencia, temperatura y sólidos en suspensión (toma de muestras de apoyo: TM Consult-Universitat de Valencia). Con los datos de campo y la información radiométrica se establece una relación de los parámetros fisicoquímicos con las bandas TM que permiten la elaboración de mapas temáticos que muestran la variación superficial de las variables de estudio. Se llevó a cabo la adquisición y procesado de las imágenes de tres fechas: 22 de junio, 8 de julio y 24 de julio. Con los resultados obtenidos se llevó a cabo un análisis de la evolución temporal de los parámetros de estudio.

ABSTRACT.- In the summer of 1994, the Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) carried out a remote sensing (Landsat TM) study of the trophic state at the Beniarrés, Amadorio y Guadalest reservoirs, which belong to the Júcar basin. Four parameters were evaluated at each reservoir: Chlorophyll *a*, Secchi transparency, suspended solids and temperature. (The collection of water samples was carried out by "TM-Consult and Universitat de Valencia). It was established an empirical relationship between the radiometric counting data provided by the sensor TM and "in situ" data to enable the elaboration of thematic maps showing the studied variables surface variation. The image taking and processing was made on three dates: June 22th, July 8th, and July 24th. Finally, temporal evolution analysis was accomplished.

1.- INTRODUCCION

La necesidad de conservar los recursos naturales y en particular el agua, en buenas condiciones para su equilibrio ecológico con el resto de los recursos, y disfrute por la población, ha determinado que se haya fijado la atención en procesos naturales que, recientemente se han agudizado y extremado, como es el caso de la eutrofización de los ecosistemas acuáticos. La eutrofización se define como un proceso de "fertilización de las aguas naturales, que va aumentando su producción en materia orgánica, con la considerable pérdida de calidad de agua" (Margalef, 1983). El fenómeno de eutrofización es un proceso natural que ocurre de forma lenta en los ecosistemas acuáticos pero que la intervención humana acelera debido al aporte excesivo de nutrientes.

El diagnóstico y seguimiento de la eutrofización requiere estudios 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.).

Una solución alternativa, es la utilización de la teledetección para identificar y evaluar

algunos aspectos representativos del proceso de eutrofización (Lillesand, 1979, Scarpace, 1979, Martin et al, 1983, Verdin, 1984, Verdin 1985, Lathrop y Lillesand, 1986, Ortiz y Peña, 1987, Peña y Ortiz, 1987, Ortiz y Peña, 1989, Peña y Serrano, 1992)

La mayor parte de la energía solar que penetra en un lago o un embalse, es atenuada debido al proceso de absorción. Aunque solo un pequeño porcentaje de energía incidente es reflejada, esta radiación es el principal foco de interés en las investigaciones de calidad de agua por teledetección.

Cuatro parámetros limnológicos asociados con el fenómeno de la eutrofización se evalúan preferentemente a través de los sensores remotos: la clorofila *a* (mg/m³) como indicadora de la biomasa de algas, la transparencia del agua medida con el disco de Secchi (m), sólidos en suspensión (mg/l) (Shiebe et al., 1987, Lathrop, 1992) y la temperatura superficial del agua (°C). El valor de estas variables es susceptible de cambiar en función del mayor o menor grado de eutrofización de la masa de agua.

El objetivo del trabajo es, aprovechando las correlaciones entre los valores de clorofila *a*, de transparencia y sólidos en suspensión, medidas "in situ" a lo largo de la superficie del embalse, con los valores de ND detectados por el sensor TM para los mismos puntos, obtener unas ecuaciones que sean capaces de predecir estos parámetros. Posteriormente se elaboran unos mapas temáticos que muestran la variación superficial de dichos parámetros. Los mapas de temperatura se obtienen a partir del infrarrojo térmico, banda 6 del sensor TM de Landsat.

Si esto se realiza en varias fechas, la introducción de los mapas resultantes obtenidos en un sistema de información geográfica permite la realización de un estudio multitemporal en el que se analiza la evolución del grado de eutrofización durante todo el período de estudio.

2.- METODOLOGIA

2.1.- Determinaciones directas de apoyo

Es necesario contar con un apoyo de datos de campo consistente en tomas de muestras de agua y determinaciones directas. Los muestreos y determinaciones en el campo han de efectuarse coincidiendo con las fechas del calendario de pasadas del satélite Landsat 5 sobre la zona. Las fechas válidas en que el cielo estuvo desprovisto de nubes sobre la zona de estudio fueron: 22 de junio, 8 de julio y 24 de julio. Los parámetros analizados fueron clorofila *a* en superficie, transparencia (profundidad del disco de Secchi), temperatura y sólidos en suspensión.

2.2.- Adquisición de la imagen

Se ha seleccionado una miniescena flotante dentro de la escena 198/033 de Landsat TM. Dicha miniescena comprende una zona de 68 km en sentido Este_Oeste y 55 km en sentido Norte-Sur (2284 x 1835 píxeles de imagen), con unas coordenadas de centro de imagen de N 38° 40' y O 0° 15' (longitud del meridiano de Greenwich).

2.3.- Proceso de datos

En el conjunto global del proceso de datos, hay que distinguir dos tareas básicas: de un lado, el tratamiento y manejo de las imágenes Landsat TM; de otro, el análisis estadístico de regresión múltiple entre datos TM y datos de campo (Figura 1).

La primera se ha realizado con el programa GRASS 4.1, (Geographical Resources Analysis

Support System). El análisis estadístico se ha realizado mediante el paquete estadístico STATPRO. En el proceso de datos podemos distinguir las siguientes etapas:

1) Carga de imágenes digitales en la base de datos del sistema de información geográfica GRASS.

2) Identificación en la imagen de los píxeles correspondientes a los puntos de muestreo y extracción de los valores radiométricos multiespectrales correspondientes a los píxeles de los puntos de muestreo y a los ocho píxeles circundantes.

3) Análisis estadístico de regresiones lineales múltiples mediante un procedimiento de iteración selectiva. Como variables independientes figuran los ND registrados en las bandas espectrales TM, mientras que la variable dependiente es la concentración de clorofila, profundidad de Secchi o sólidos en suspensión.

4) Cartografía de la temperatura relacionando directamente con la radiación emitida por la superficie de la tierra en el infrarrojo térmico (banda 6 TM) con la temperatura (Bartolucci, 1985) y corrección de la look up table con datos reales de campo.

5) Realización en la imagen de una máscara tierra-agua utilizando un "valor umbral" de la banda 4 (infrarrojo cercano).

6) Cálculo de imágenes resultado, aplicando las ecuaciones de regresión para clorofila a, transparencia, y sólidos en suspensión.

7) Reclassificación del mapa resultado en diez categorías para facilitar su interpretación y atribución de un código de colores a dichas categorías. Debido a las condiciones muy diferentes del embalse de Beniarrés, en todos los parámetros salvo la temperatura, se han señalado unos rangos distintos para este embalse.

8) superposición a la cartografía temática de cada embalse de la imagen del terreno que le rodea, eligiéndose para ella tonos de gris. (Figura 2: ejemplo de mapa temático resultante)

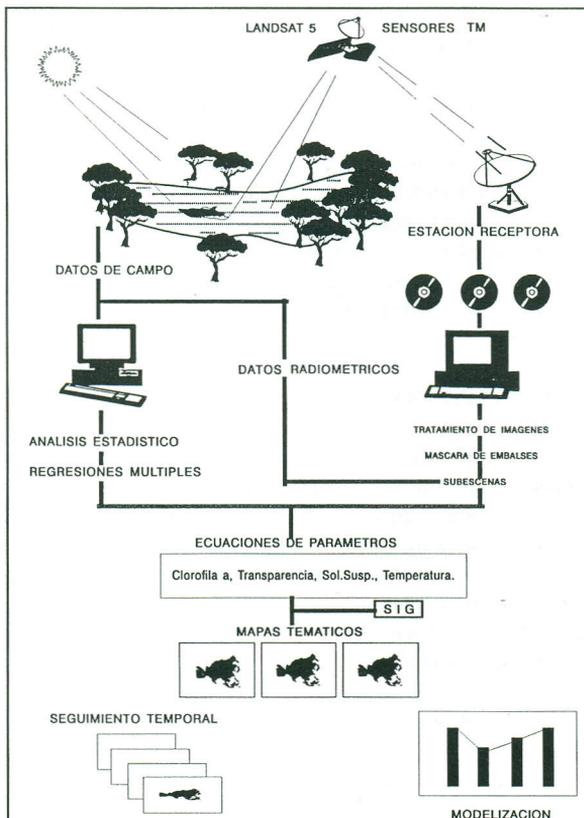


Figura 1.- Esquema resumen de la metodología

2.4.- Normalización de imágenes

Debido a la ausencia de datos de campo; en la fecha del 22 de junio se normalizaron las imágenes tomando como referencia las del 24 de julio. Las bandas normalizadas se han utilizado para aplicar la ecuaciones obtenidas el 24 de julio. La normalización se ha realizado

siguiendo el método del investigador estadounidense David Eckhardt del US Bureau of Reclamation, (Eckhardt, 1988)

2.5.- Estudio de la evolución temporal

Una vez obtenidas las imágenes resultado, se lleva a cabo el estudio de la evolución temporal de los parámetros estudiados en cada fecha (Peña y Serrano, 1994). Para ello se georreferencian todas las fechas a una de ellas para hacer "superponibles" todos los mapas. Se utilizan herramientas de análisis del sistema de información geográfica que permiten calcular mapas de aumento o disminución de cada parámetro. Esto se realizó entre fechas sucesivas y entre la primera y la última. (Figura 3: ejemplo de imagen de evolución temporal)

3.- RESULTADOS

El tratamiento de las bandas de cada una de las fechas del estudio ha permitido llegar en todos los casos a ecuaciones muy satisfactorias, lo que en principio resulta lógico si se tiene en cuenta que cada fecha de pasada tiene abundante información sobre los parámetros. Un ejemplo lo tenemos en la tabla I.

Conviene subrayar que la información obtenida para cada embalse responde a las condiciones que el mismo presentaba en una fecha determinada (indicada en cada mapa), de tal modo que los resultados numéricos de concentración de clorofila, de transparencia del agua y de sólidos en suspensión pueden diferir de los valores medios estivales. Un embalse puede, en efecto, presentar diferencias en biomasa de algas entre distintas fechas a lo largo del verano. Se han obtenido los valores medios de los embalses en las distintas fechas. Los resultados se presentan en la Tabla II

4.- CONCLUSIONES

Una primera conclusión es la aplicabilidad de esta metodología, utilizando imágenes de satélite, al diagnóstico y seguimiento del estado trófico de embalses.

Esta experiencia piloto pone de manifiesto que, mediante la adquisición de una imagen reducida, adaptada a la zona geográfica del estudio, es posible optimizar costes para la obtención de mapas temáticos de temperatura, transparencia sólidos en suspensión y concentración de clorofila a cada una de las masas de agua. Asimismo se puede realizar el seguimiento de la evolución de los embalses a través de un período de estudio.

Esta herramienta, como es evidente, es tanto más útil cuanto mayor es la zona de estudio, por ejemplo una cuenca hidrográfica, y por tanto mayor número de masas de agua, pero siempre debe ser complementada con estudios de detalle sobre la columna de agua en diversos puntos para conocer más profundamente el proceso de eutrofización que experimenta un embalse determinado.

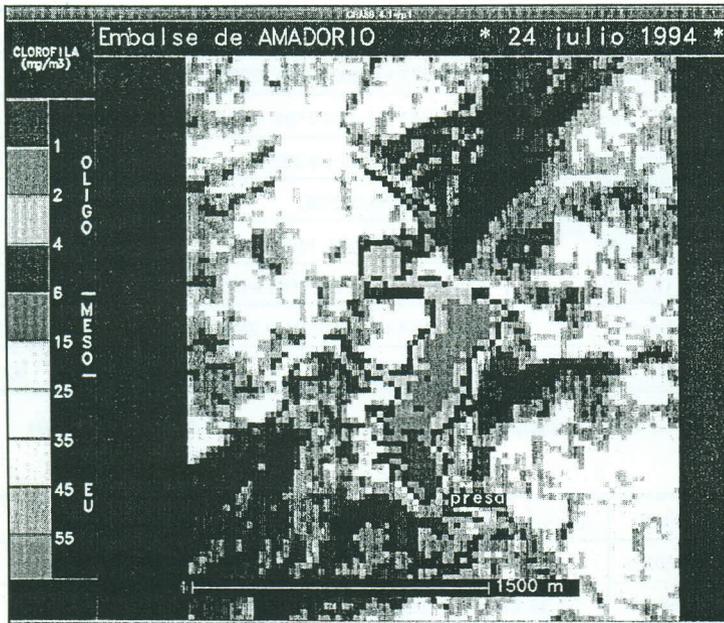


Figura 2.- Mapa resultante de concentración de clorofila. (Landsat TM) (C. 31)

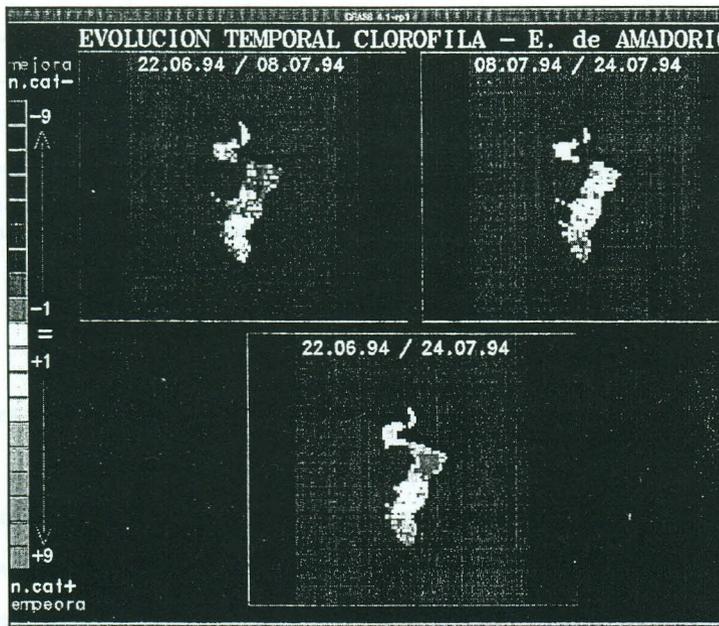


Figura 3.- Evolución temporal de la clorofila de tres fechas del verano de 1994. (Landsat TM) (C. 32)

Amadorio	Clorofila	$Clf=0.446*B2-15.4086$	$R2=0.720$
	Secchi	$Se=9.477+0.103*B4-0.224*B2$	$R2=0.955$
	Sol.Susp.	$Ss=1.043*B1-1.272*B4-4.326$	$R2=0.670$
Beniarrés	Clorofila	$Ln(clf)=-18.315+0.332*B1$	$R2=0.861$
	Secchi	$Se=4.8952-0.063*B1$	$R2=7861$
	Sol.susp	$Ln(Ss)=0.257*B1-14.874$	$R2=0.908$
Guadalest	Clorofila	$Clf=11.179+0.2675*B2+0.579*B3-0.3434*B1$	$R2=0.717$
	Secchi	$Se=4.899+0.0886*B1-0.282*B2$	$R2=0.789$
	Sol.Susp.	$Ss=0.332*B3-5.588$	$R2=0.497$

Tabla I.- Ecuaciones de clorofila transparencia y sólidos en suspensión del 24 de julio de 1994

Embalse	Fecha	Superficie	Clorofila	Secchi	Sol.Susp	Temp.	Estado
AMADORIO	220694	46.44	2.62	2.31	4	-	O
	80794	35.82	1.73	2.24	3	27.2	O
	240794	38.52	2.35	2.40	5	28.2	O
BENIARRRES	220694	160.11	233.90	0.43	35	-	HE
	80794	141.21	155.45	0.58	21	27.3	HE
	240794	134.55	258.11	0.44	37	28.4	HE
GUADALEST	220694	38.7	1.27	2.94	2	-	O
	80794	34.29	1.79	3.08	2	26.9	O
	240794	35.73	2.36	3.15	2	28.2	O

Tabla II.- Valores medios de los parámetros estimados mediante teledetección correspondientes a las fechas indicadas en la tabla. O=Oligotrófico, HE=Hipereutrófico. Estado trófico está basado en la concentración media de clorofila

5.- REFERENCIAS

- Bartolucci, L.A. *Proceedings of the 1st National Symposium R.S.* Bagdad, Iraq. Oct 26-28, 1985. Pp. 1-25. vol.1.
- Blackwell, R.J., and D.H. Boland, 1979. Trophic classification of selected Colorado lakes. *Jet. Prop. Lab. Publication* 78-100, EPA_600/4-79-005.
- Eckhardt, D. 1988. A method of Landsat 5-TM imagery normalization for reservoir multirate studies. Comunicación personal.
- Lathrop, R.G.Jr., 1992. Landsat Thematic Mapper monitoring of turbid inland water quality. *Photogr. Engin & Rem. Sens.*, 52: 671_680.
- Lathrop, R.G., Jr, and T.M. Lillesand, 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.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona 1019 p.
- Martin, R.H., E. O. Boebel, R.C. Dunst, O.D. Williams, M.V. Olsen, R.W. Merideth, Jr., and F.L. Scarpace, 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*. CEDEX.
- 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, p. 403-42
- Scarpace, F.L., K.W. Holmquist, and L.I. Fisher. 1979. Landsat analysis of lake quality. *Photogr. Eng. and Rem. Sensing*. 45 (5) : 623-633.
- Schiebe, F. R., J.A. Harrington. Jr., and J.C. Ritchie. 1987. Remote sensing of suspended sediments of Lake Chicot. Arkansas. U.S. Army Corps of Engineers. *Sixth Remote Sensing Symposium*. No. 2-4. 1987. Galveston. Tx. 77-85.
- Verdin, J.P., 1984. *Limnological applications of multispectral remote sensing*. USBR Report No. REC-ERC-85-2. 51 P.
- Verdin, J.P., 1985 a. Monitoring water quality conditions in a large Western reservoir with Landsat Imagery. *Photogram. Eng. and Rem. Sensing* 51 (3): 343-353.
- Verdin, J.P., 1985 b. *Multidate Landsat water quality models*. Comunicación personal.
- Verdin, J.P., 1985 c. Mapping surface water quality patterns of Lake Havasu with Thematic Mapper imagery. *Appl. Sci. Refer. Memo*. No. AP. 85-4-2. USBR.