

## ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HÍDRICOS EN EL PANTANO DE GERGAL (SEVILLA) MEDIANTE TELEDETECCIÓN

A.J. POLVORINOS, M.J. HERNÁNDEZ y M. FORTEZA

arnedo@cica.es

Dept. Cristalografía y Mineralogía. C/Prf. García González, s/n, 41005 Sevilla.

**RESUMEN:** A partir del análisis de las imágenes multispectrales del satélite Landsat 5 se han obtenido los modelos de estimación de parámetros relativos a la calidad de las aguas –clorofila “a”, turbidez y sólidos en suspensión- en el pantano de Gergal (Sevilla). Además de la información espectral de las bandas TM1 a TM4, se han considerado diversas combinaciones entre las bandas TM1 y TM2 que mejoran significativamente dichos modelos, principalmente para los sólidos en suspensión. Esta variable define el comportamiento óptico de las aguas en la época prospectada.

**ABSTRACT:** Estimation models were obtained from Landsat 5 multispectral images in order to predict water quality parameters –chlorophyll “a”, turbidity and suspended solids- in Gergal pond (Seville). An empirical approach from TM1 and TM2 bands significantly improve the prediction models, being suspended solids the most predictive variable for the prospecting season.

**Palabras clave:** teledetección, modelos de estimación, calidad de aguas, embalse, Gergal.

### INTRODUCCIÓN

La calidad de las aguas naturales hace referencia a un conjunto de propiedades químicas, biológicas y físicas de las mismas, entre las que destacan, por su carácter más integrador, la cantidad de clorofila “a”, los sólidos en suspensión y la turbidez. Estas variables presentan, generalmente, una importante variación espacial, para cuya determinación los métodos clásicos de muestreo y análisis se muestran insuficientes. Sin embargo, las técnicas de teledetección a partir de imágenes obtenidas con sensores multispectrales a bordo de satélites (tipo Landsat, Spot, etc.) constituyen una herramienta ideal para la realización de análisis espaciales y temporales.

La estrecha relación existente entre los parámetros sólidos en suspensión, clorofila “a” y turbidez, y su respuesta espectral ha sido ampliamente demostrada por diversos autores en lagos de distinto grado de eutrofización (Baban, 1993; Dekker *et al.*, 1993; Fraser, 1998; Gitelson *et alii*, 1993; Ramsey III *et alii*, 1992; Tassan, 1998). En este trabajo se propone la determinación de dichos parámetros en el embalse de Gergal, perteneciente a la cuenca del Guadalquivir, a partir de imágenes Landsat 5. El estudio de la calidad de las aguas en esta cuenca es un objetivo prioritario debido a las

grandes irregularidades pluviométricas que padece la región, con prolongados períodos secos, y la frecuente eutrofización que sufren sus pantanos.

### DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El embalse se sitúa en el curso bajo del Rivera de Huelva, cerca de su confluencia con el Guadalquivir, y forma parte de las obras de regulación de dicho río para el abastecimiento de Sevilla y su zona de influencia.

Geológicamente se encuentra situado en el límite de los afloramientos paleozoicos del borde S del Macizo Ibérico, prácticamente en contacto con los materiales terciarios de la Depresión del Guadalquivir. El substrato del pantano está constituido por gneis, probablemente formados por metamorfismo de contacto debido a la importante presencia de rocas ígneas como granitoides, gabros y dioritas del Carbonífero. Los materiales sedimentarios son principalmente pizarras con nódulos calcáreos y cuarcitas del Famenense Superior.

Gergal presenta ciclos de mezcla y estratificación con diferencias sustanciales de un año a otro dependiendo de la pluviometría, y una baja reserva alcalina, favorecida por la naturaleza de los materiales atravesados (Toja, 1884)

## METODOLOGÍA

La metodología seguida incluye la recogida de muestras, su análisis en laboratorio y su integración con la información espectral.

La toma de muestras de aguas superficiales se realizó el 16 junio de 1999 coincidiendo con la fecha de paso del satélite Landsat 5. La malla de muestreo tiene una separación aproximada de 200 m, e incluye 28 puntos de observación cuya localización se ha determinado con su sistema GPS con corrección diferencial y un error en la posición inferior a 10 m (Figura 1).

En cada punto se midió "in situ" la turbidez del agua (medida en Unidades Nefelométricas de Turbidez), mediante un turbidímetro portátil Hach 2100P. La determinación de clorofila *a* se realizó mediante técnicas espectrofotométricas, a partir de 500 ml de agua previamente filtrada utilizando metanol para su extracción. Los espectros de absorción registrados permitieron determinar su concentración partir de la fórmula de Talling y Driver (Vollenweider 1969) Otra fracción de 500 ml. se utilizó para determinar por gravimetría la cantidad de sólidos en suspensión retenidos por un filtro Millipore (Durapore®) de 0,45µ de tamaño de poro.

El estudio de las variables prospectadas se realiza a partir del análisis de su distribución espacial y de la estructura de sus matrices de correlación puntual.

La información espectral considerada incluye las tres bandas del espectro visible TM1 (0.45-0.52µ), TM2 (0.52-0.60µ), TM3 (0.63-0.69µ) y el infrarrojo próximo TM4 (0.76-0.90µ) Para integrar esta información espectral con los puntos de muestreo se ha realizado la corrección geométrica de la subescena correspondiente al pantano. La georreferenciación se realizó utilizando un conjunto de puntos de control, verificándose con un conjunto de puntos suplementario que los errores de posición son del mismo orden de valor que los de muestreo.

Así mismo, se ha delimitado el contorno del embalse, usando una máscara, al objeto de excluir puntos de la imagen que presentan respuestas espectrales mezcla de agua y suelo.

A partir de los valores de radianza de cada banda espectral correspondientes a los puntos de muestreo, obtenidos sin efectuar corrección atmosférica, se ha desarrollado un modelo de estimación del contenido en clorofila, sólidos en suspensión, y turbidez, mediante procedimientos de regresión simple y múltiple. Por último, teniendo en cuenta dichos modelos, se han obtenido las imágenes de la distribución espacial de cada variable estudiada con la misma resolución espacial que las de satélite.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

La tabla 1 muestra los datos estadísticos de las variables hídricas y de las respuestas espectrales de cada banda, mientras que en la Tabla 2 se presenta la matriz de correlación entre dichas variables.

Se puede observar en la tabla 1 como el pantano de Gergal presenta en esta época bajos valores de turbidez y sólidos en suspensión, situación característica durante los períodos de estratificación. La clorofila muestra mayor variabilidad, situándose los valores máximos en la zona de la cola principal del pantano.

	N	Med.	Min.	Max.	D. Est.
Clor. *	28	5.95	3.04	11.53	2.56
Turbidez**	28	3.27	2.05	5.99	0.99
Sol. Susp.***	28	2.03	1.00	3.6	0.72
TM1		44.41	40.67	49.70	2.05
TM2		33.62	30.10	39.5	2.39
TM3		19.70	16.53	25.39	2.35
TM4		11.74	8.27	19.68	2.77

\* mg/m<sup>3</sup> \*\* UNT \*\*\*mg/l

Tabla 1. Parámetros estadísticos de las variables estudiadas.

	Cl	SS	Tb	TM1	TM2	TM3	TM4
Cl.	1	<b>0.60</b>	<b>0.79</b>	0.06	0.34	0.30	0.25
SS		1	<b>0.77</b>	0.30	<b>0.67</b>	<b>0.52</b>	<b>0.50</b>
Tb			1	0.08	0.44	0.26	0.23
TM1				1	0.83	0.81	0.77
TM2					1	0.87	0.87
TM3						1	0.91
TM4							1

Tabla 2. Matriz de correlación de las variables.

El análisis de la matriz de correlación pone de manifiesto la elevada correlación entre las variables físicas y biológica. Por otra parte, se observa que la clorofila y la turbidez no presentan una buena relación con ninguna banda espectral ( $r < 0.44$ ), mientras que los sólidos en suspensión se correlacionan mejor con las bandas TM2, TM3 y TM4, siendo el parámetro que contribuye mayoritariamente al comportamiento óptico de las aguas en esta época.

Diversos autores (Baban, 1993; George, 1997) han puesto de manifiesto que determinados algoritmos, basados en la combinación de bandas simples, mejoran los modelos de estimación de parámetros hídricos obtenidos por regresión lineal.

Por un procedimiento empírico se han realizado distintas combinaciones seleccionándose aquellas en las que el factor de correlación  $r$ , para todas las variables, es mayor de 0.5, con un nivel de confianza superior al 99%. Este procedimiento puso de manifiesto que las combinaciones entre las bandas TM1 y TM2 son las únicas que mejoran los resultados. La relación de los parámetros hídricos con las combinaciones seleccionadas se presenta en la tabla 3.

	TM2/TM1	TM2-TM1	(TM1+TM2)/(TM1-TM2)
Cl.	0.50	0.51	0.53
Tb	0.65	0.66	0.68
Ss	0.80	0.73	0.82

**Tabla 3.** Coeficientes de correlación de los parámetros hídricos y las combinaciones entre bandas.

Se puede comprobar que la cantidad de sólidos en suspensión es la variable más significativa en el comportamiento óptico de las aguas del pantano de Gergal durante la época considerada, observándose también un incremento del coeficiente de correlación para clorofila y turbidez.

A partir de estos datos se han obtenido los modelos de estimación por correlación simple y múltiple que se presentan en la tabla 4.

Modelos de estimación	R <sup>2</sup>
Cl (mg/m <sup>3</sup> ) = - 2.93 + 0.531 (TM1+TM2)/(TM1-TM2)	0.28**
Cl (mg/m <sup>3</sup> ) = 89.84 - 1.704 (TM2/TM1) + 0.437 (TM2 - TM1) + 1.817 (TM1+TM2)/(TM1-TM2)	0.33**
Tb (UNT) = -1.175 + 0.683 (TM1+TM2)/(TM1-TM2)	0.46*
Tb (UNT) = 37.36 - 1.8 TM2/TM1 + 0.508 (TM2 - TM1) + 1.99 (TM1+TM2)/(TM1-TM2)	0.52*
SS (mg/l) = - 1.83 + 0.824 (TM1+TM2)/(TM1-TM2)	0.68*
SS (mg/l) = 8.64 + 1.64 (TM1+TM2)/(TM1-TM2) - 0.83 (TM2/TM1)	0.69*

\*  $p < 0.0001$       \*\* $p < 0.01$

**Tabla 4.** Modelos de estimación de variables a partir de la combinación de bandas espectrales.

En el caso de los sólidos en suspensión el modelo de estimación queda definido por la combinación (TM1+TM2)/(TM1-TM2); la utilización de las demás bandas no mejora sustancialmente la regresión. Para la

turbidez, sin embargo, el modelo de regresión múltiple a partir de las tres nuevas combinaciones aumenta el valor del coeficiente R<sup>2</sup>.

Destaca la baja capacidad de predicción de los modelos obtenidos para la clorofila. Es probable que el cálculo de otras capas de información por un procedimiento de análisis local mejore los modelos de estimación de esta variable.

La distribución espacial de las variables turbidez y sólidos en suspensión, obtenidas a partir de los modelos considerados (Tabla 4), se presentan en las figuras 2 y 3. Ambas imágenes muestran la elevada correlación que existe entre estos parámetros en esta época del año.

## CONCLUSIONES

La baja correlación de las variables estudiadas "in situ" y las bandas TM1 a TM4, no permite el desarrollo de modelos de estimación fiables. Sin embargo, las combinaciones desarrolladas a partir de las bandas TM1 y TM2, mejoran sustancialmente dichos modelos, particularmente para las variables sólidos en suspensión y turbidez, parámetros que definen la calidad del agua en Gergal en la época prospectada.

En consecuencia, el análisis de las imágenes multiespectrales de Landsat 5 es una herramienta de gran utilidad para el estudio de la calidad de las aguas de cualquier embalse, dada su relativa simplicidad, la rápida disponibilidad de los resultados, y la posibilidad de llevar a cabo análisis multitemporales.

## BIBLIOGRAFÍA

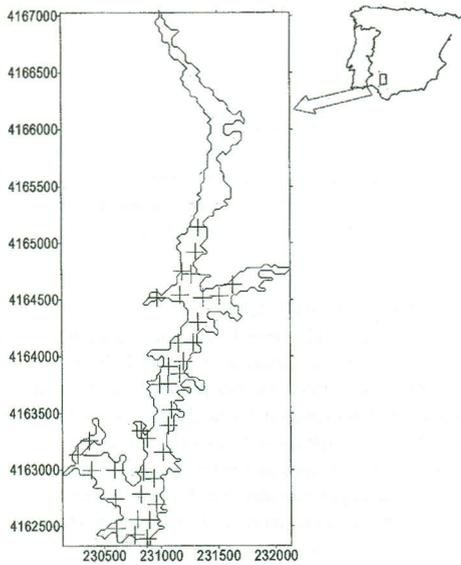
- BABAN, S.M.J. (1993). Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K., using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1247-1267.
- DEKKER, A. G. and PETERS, S.W.M. (1993). The use of Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: A case study in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 799-822.
- FRASER, R. N. (1998). Multispectral remote sensing of turbidity among Nebraska Sand Hills lakes. *Int. J. Remote Sensing*, 19, 3011-3016.
- GEORGE, D.G. (1997). The airborne remote sensing of phytoplankton chlorophyll in the lakes and tarns of the English Lake District. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1961-1975.
- GITELSON, A., GARBUZOV, G., SZILAGYI, F., MITTENZWEY, K. H., KARNIELI, A. and KAISER, A. (1993). Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *Int. J. Remote Sensing*, 14, 1269-1295.

- RAMSEY III, E. W., JENSEN, J. R., MACKEY, H. and GLADDEN, J. (1992). Remote sensing quality in active to inactive cooling water reservoirs. *Int. J. Remote Sensing*, 13, 3465-3488.
- TASSAN, S. (1998). A procedure to determine the particulate content of shallow water from Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sensing*, 19, 557-562.
- TOJA, J. (1984). Limnología de los embalses de abastecimiento de agua a Sevilla. Publ. de CEDES. M.O.P.U. Madrid, 159 +30 pp.
- WOLLENWEIDER, R.A. (1969). "Primary production in aquatic environments" in I.B.P. Handbook n°12, Blackwell Sci. Publ., Oxford.

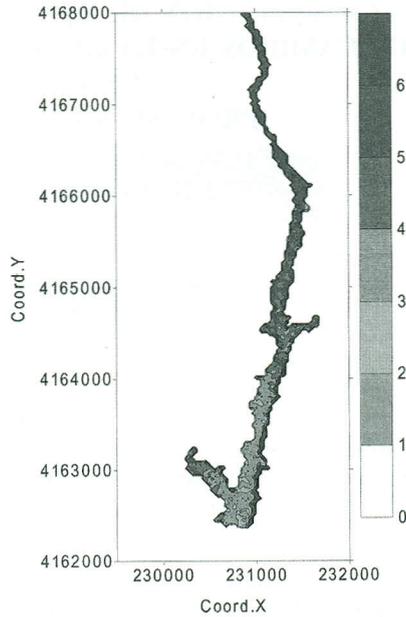
**AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se ha realizado a través de un proyecto financiado por el Plan Propio de la Universidad de Sevilla.

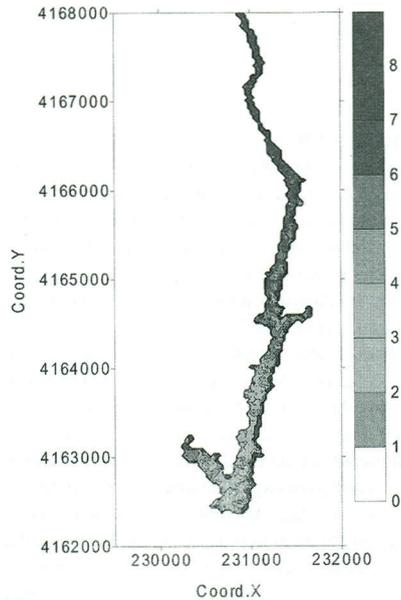
Los autores quieren agradecer la colaboración de EMASESA, D<sup>a</sup>. Julia Toja, D. Antonio Pérez y D. Andrés Calderón.



**Figura 1.** Puntos de muestreo en Gergal (coordenadas UTM).



**Figura 2.** Sólidos en suspensión (mg/ml) obtenidos por regresión.



**Figura 3.** Turbidez (UNT) obtenida por regresión.