

MONITORIZACIÓN DE PARÁMETROS HÍDRICOS DEL EMBALSE DE ARACENA MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT

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

arnedo@cica.es

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

RESUMEN: El presente trabajo demuestra la elevada correlación existente entre las medidas de radianza obtenidas a partir de imágenes del Landsat 5 y los parámetros hídricos turbidez, clorofila *a*, sólidos en suspensión y disco Sechii. Se han obtenido correlaciones significativas ($r^2 0.64$) entre las bandas TM2, TM3 y TM4 y las variables analizadas. Con el fin de establecer modelos de predicción de calidad de las aguas, en el embalse de Aracena, se han aplicado métodos de regresión, simple y múltiple, resultando ser la turbidez la variable más discriminante altamente relacionada con la clorofila *a*.

ABSTRACT: This study presents good correlations of multispectral radiance data from Landsat 5 images with hydric parameters turbidity, chlorophyll-*a*, suspended solids and Sechii disc. Correlations were highly significant between TM2, TM3 and TM4 bands ($r^2 0.64$) and all sampled variables. In order to provide a useful methodology to related measured water quality parameters and reflectances for Aracena pond, simple and multiple regression analysis were used, turbidity being the most significant parameter highly related with chlorophyll-*a*.

Palabras clave: teledetección, parámetros hídricos, monitorización, embalse, Aracena.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de teledetección a partir de imágenes obtenidas con sensores multispectrales a bordo de satélites (tipo Landsat, Spot... etc.), han sido ampliamente utilizadas en la determinación de parámetros de calidad de las aguas de lagos y embalses.

La integración de los datos obtenidos a partir de la respuesta espectral, con las medidas de los parámetros de calidad hídrica más significativos —sólidos en suspensión, clorofila *a*, turbidez y disco Sechii— permiten establecer modelos de predicción para las distintas variables (Baban, 1993; Dekker and Peters, 1993; Fraser, 1998; Gitelson *et alii*, 1993; Han *et alii*, 1994; Ramsey III *et alii*, 1992; Tassan, 1998).

Bajo estos criterios se aborda el estudio del pantano de Aracena situado en la Sierra Norte de la provincia de Sevilla, que junto con los de Zufre, la Minilla y Gergal, forma parte de la red de abastecimiento de agua de Sevilla capital y su área metropolitana.

MATERIALES Y MÉTODOS

La red hidrográfica del pantano está constituida por el Rivera del Huelva, el Rivera de Hinojales y el Rivera de Montemayor como aportes principales; todos ellos,

con un marcado régimen estacional, condicionan la dinámica del embalse con ciclos de estratificación que pueden alcanzar hasta nueve meses (Toja, 1984). El substrato del embalse lo constituyen principalmente pizarras y grauwacas del Devónico – Carbonífero y pizarras y esquistos del Ordovícico. En todos los materiales de la zona, se observa un metamorfismo regional de grado bajo o muy bajo.

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 300 m, e incluye 80 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 midieron “in situ” la profundidad del disco Sechii y la turbidez del agua medida en unidades nefelométricas de turbidez. 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 \hat{a}) de 0,45m de tamaño de poro.

El análisis de la distribución espacial de cada una de las variables prospectadas, así como la estructura de sus matrices correlación puntual, han permitido estudiar el comportamiento de las propiedades físico-químicas y biológicas del embalse.

A partir de las imágenes captadas por el sensor TM (Thematic Mapper), y con objeto de integrar la información espectral con las medidas realizadas "in situ", se ha realizado la corrección geométrica de la subescena correspondiente al pantano y su entorno. La georreferenciación se efectuó utilizando un conjunto de puntos de control verificándose, con un conjunto de puntos suplementario, que los errores de posición son del mismo orden que los de muestreo.

La información espectral considerada incluye las tres bandas del espectro visible TM1 (0.45-0.52 μ), TM2 (0.52-0.60 μ), TM3 (0.63-0.69 μ) y el infrarrojo próximo TM4 (0.76-0.90 μ) por su significativa contribución a la caracterización del comportamiento óptico de las aguas, empleándose los valores de radianza sin realizar corrección atmosférica.

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

A partir de los valores de radianza de cada banda espectral, correspondientes a los puntos de muestreo, y mediante procedimientos de regresión simple y múltiple se han elaborado los modelos de estimación de las variables contenido en clorofila *a*, turbidez, sólidos en suspensión y profundidad del disco Secchi. Estos modelos han permitido obtener las imágenes de la distribución espacial de las variables estudiadas, con la misma resolución espacial que las de satélite.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis descriptivo de las variables hídricas y de las respuestas espectrales de cada banda, se ha simplificado en sus estadísticas (Tabla 1).

El análisis de la matriz de correlación entre las variables (Tabla 2) pone de manifiesto una clara correlación lineal entre los parámetros hídricos analizados, contenido en clorofila *a*, turbidez, sólidos en suspensión y profundidad de disco Secchi, y de éstos con los valores de radianza obtenidos para cada punto de muestreo.

	N	Med.	Min.	Max.	D. Est.
Cl (mg/m ³)	80	4.6	0.3	13.1	1.9
Tb (UNT)	80	3.5	1.8	12.1	1.8
SS (mg/l)	80	4.1	0.4	12.6	2.1
DS (m.)	80	1.5	0.5	2.2	0.3
TM1	80	42.3	38.3	48.5	1.9
TM2	80	29.5	23.0	38.3	2.6
TM3	80	17.6	13.3	29.4	2.9
TM4	80	9.3	6.6	19.7	2.0

Tabla 1. Parámetros estadísticos de las variables estudiadas.

	Cl.	DS	SS	Tb	TM1	TM2	TM3	TM4
Cl.	1	-0.63	0.58	0.81	0.48	0.64	0.75	0.74
DS		1	-0.61	-0.84	-0.65	-0.73	-0.75	-0.64
SS			1	0.75	0.54	0.67	0.68	0.65
Tb				1	0.68	0.80	0.84	0.76
TM1					1	0.78	0.76	0.70
TM2						1	0.91	0.85
TM3							1	0.92
TM4								1

Tabla 2. Matriz de correlación entre parámetros hídricos y radianza de las cuatro bandas.

Destaca la elevada correlación entre la turbidez y el resto de variables analizadas. El análisis estadístico de correlación entre las variables hídricas sugiere un comportamiento no lineal (Ramsey III *et alli*, 1992), de forma que un tratamiento exponencial mejora considerablemente la correlación. Este comportamiento permitiría considerar la posibilidad de utilizar, únicamente, la turbidez como parámetro indicativo de la productividad del embalse en la época prospectada, correspondiente a un periodo no lluvioso y de estratificación.

La correlación lineal entre las distintas variables hídricas y las bandas TM2, TM3 y TM4 presenta valores comprendidos entre 0.84 y 0.64, mientras que los de la banda TM1 son ligeramente inferiores, aunque aceptables, para la profundidad de disco Secchi y la turbidez.

Se observa una elevada correlación de la clorofila *a* con las bandas TM2, TM3 y TM4 que pondría de manifiesto, una elevada contribución de la fase biológica al comportamiento óptico de las aguas del pantano de Aracena en la época prospectada. Los parámetros turbidez y disco Secchi son los que presentan mayores coeficientes de correlación con la respuesta espectral en las cuatro bandas, con valores inversos indicativos del comportamiento de estas dos variables.

El análisis de los modelos de estimación de los parámetros hídricos, obtenidos por regresión simple y múltiple (Tabla 3), indica que la única variable predictora es, en todos los casos, la banda TM3. La inclusión de la banda TM4 no mejora substancialmente el coeficiente de regresión múltiple.

Modelos de estimación	R ²
Cl (mg/m ³) = - 4.107 + 0.751 TM3	0.56*
Cl (mg/m ³) = - 3.533 + 0.455 TM3 + 0.321 TM4	0.58*
Tb (UNT) = -5.664 + 0.836 TM3	0.70*
Tb (UNT) = -7.970 + 0.219 TM2 + 0.636 TM3	0.71*
Tb (UNT) = - 8.20+ 0.226 TM2 + 0.716 TM3 - 0.094 TM4	0.71*
SS (mg/l) = - 4.662 + 0.681 TM3	0.46*
SS (mg/l) = - 8.093 + 0.278 TM2 + 0.429 TM3	0.48 ¹
DS (m) = 2.997 - 0.747 TM3	0.56*
DS (m) = 3.738 - 0.331 TM2 - 0.815 TM3 + 0.40 TM4	0.60*
DS (m) =4.30-0.12 TM1-0. 26 TM2-0.77 TM3+0.40 TM4	0.60*

* p< 0.001 ¹ p< 0.05

Tabla 3. Modelos de estimación de variables a partir de las bandas espectrales.

Estos resultados indican que los parámetros hídricos turbidez y clorofila *a* son los más significativos para predecir el comportamiento óptico de las aguas del pantano de Aracena en la época del año prospectada. La distribución espacial de estas variables, obtenida a partir de los modelos que incluyen exclusivamente la banda TM3, se presenta en las figuras 2 y 3. La figura 4 corresponde al modelo de predicción obtenido para los sólidos en suspensión.

La comparación de las figuras 2, 3 y 4 muestra que los modelos obtenidos mantienen la elevada correlación existente entre la turbidez y las variables clorofila *a* y sólidos en suspensión. Este comportamiento permitiría utilizar la turbidez como parámetro predictor del estado de eutrofización de las aguas del embalse de Aracena en esta época del año.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que dada la información suministrada por unidad de área, la posibilidad de organización espacial de los

datos y la relativa frecuencia de paso de los satélites Landsat, la utilización de este tipo de sensores es adecuada para la monitorización de parámetros de calidad de las aguas en embalses y pantanos, y supone una disminución efectiva de los parámetros tiempo/coste frente a otros sistemas de prospección.

BIBLIOGRAFÍA

- BABAN, S. M. J. (1993). Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K., using Landsat imagery. *Int. J. 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. *Int. J. Remote Sensing*, 14, 799-821.
- FRASER, R. N. (1998). Multispectral remote sensing of turbidity among Nebraska Sand Hills lakes. *Int. J. Remote Sensing*, 19, 3011-3016.
- 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.
- HAN, L., RUNDQUIST, D. C., LIU, L. L., FRASER, R. N. and SCHALLES, J. F. (1994). The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediments. *Int. J. Remote Sensing*, 15, 3707-3718.
- 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 (97-99).

Los autores quieren agradecer la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, de D^a. Julia Toja, D. Antonio Pérez y D. Andrés Calderón.

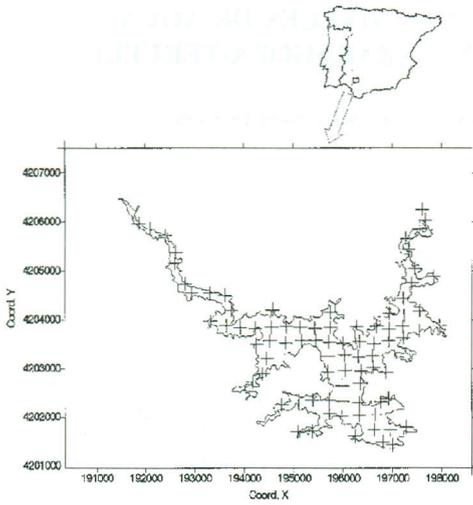


Figura 1. Puntos de muestreo (coordenadas UTM).

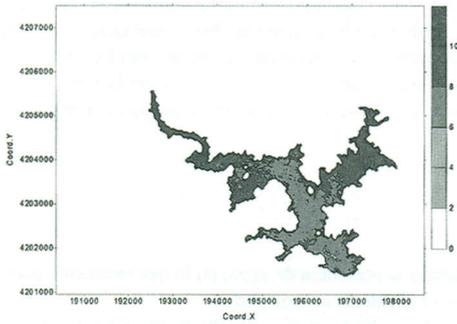


Figura 3. Turbidez (UNT) obtenida por regresión.

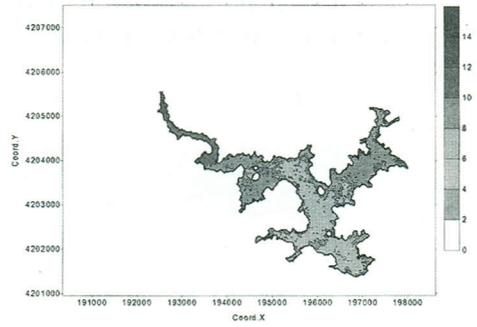


Figura 2. Contenido en clorofila (mg/m^3) obtenido por regresión.

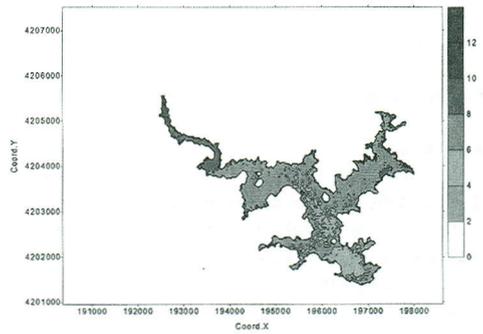


Figura 4. Sólidos en suspensión (mg/ml) obtenida por regresión.