

Hacia una relación única para el estudio del estado trófico de lagos y embalses con Thematic Mapper

Towards a unique relationship for the study of the trophic state of lakes and reservoirs with Thematic Mapper

C. Doña¹, J. A. Domínguez² y V. Caselles¹
carolina.dona@uv.es

¹ *Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Facultad de Física. Universidad de Valencia. Doctor Moliner, 50. 46100-Burjassot.*

² *Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3. 28005-Madrid.*

Recibido el 01 de enero de 2009, aceptado el 29 de julio de 2009

RESUMEN

El análisis del estado trófico de lagos y embalses, a través del sensor Thematic Mapper (TM) de Landsat, se ha realizado mediante relaciones empíricas y por tanto válidas para un cierto lago o embalse, e incluso para un conjunto de ellos. Sin embargo, lo más conveniente sería obtener una relación empírica pero universal, válida para cualquier lago o embalse. El presente trabajo constituye un primer paso en esta línea de investigación. Se han utilizado datos de dos campañas realizadas en lagos, de dos zonas distintas, con estados tróficos muy diferentes: la Albufera de Valencia, cuyo grado eutrófico es de hipertrofia extrema, pues se han registrado concentraciones de clorofila *a* de hasta 900 mg/m³, (con reflectividades TM2 del 10 al 12 %), y los lagos del Parque Regional del Sureste de Madrid, cuyos estados tróficos varían desde oligotrófico a hipertrófico (con reflectividades TM2 del 1 al 4 %). Como resultado se han obtenido relaciones empíricas para la clorofila *a*, las partículas en suspensión o seston y la transparencia, aplicables a lagos y embalses desde un grado eutrófico de hipertrofia extrema a oligotrofia.

PALABRAS CLAVE: estado trófico, lagos, embalses, Thematic Mapper.

ABSTRACT

The analysis of trophic state of lakes and reservoirs, through Landsat Thematic Mapper sensor, has been made by means of empirical relationships, and therefore valid for a certain lake or reservoir, or even to a specific set of them. However, the most suitable would be to obtain a universal empirical relationship applicable to any lake or reservoir. The present work constitutes a first step in this research line. Data from two field campaigns carried out in lakes, of two different areas, with a very different trophic state have been considered: the Albufera lake in Valencia, which eutrophication's point is extremely hypertrophy according to the registered concentrations of chlorophyll *a* up 900 mg/m³, (TM2 reflectivities between 10 and 12 %), and the SE Regional Park lakes in Madrid, whose trophic states rang from oligotrophic to hypertrophic (TM2 reflectivities between 1 and 4 %). As a result, empirical relationships for chlorophyll *a*, seston and transparency have been obtained, which are applicable to lakes and reservoirs from oligotrophic to extreme hypertrophic states.

KEYWORDS: trophic state, lakes, reservoirs, Thematic Mapper.

INTRODUCCIÓN

El estado trófico de lagos y embalses ha sido objeto de estudio durante muchos años. Esto es debido a que la calidad de aguas de lagos y embalses se puede ver deteriorada por el fenómeno de la eutrofización.

La primera definición limnológica de eutrofización la propuso Naumann en 1919: “La eutrofización es un aumento de los niveles nutricionales, especialmente con respecto al fósforo y al nitrógeno”. A partir de esta primera definición se han propuesto varias, donde la mayoría de ellas tenían un factor en común que era el aumento o enriquecimiento de nutrientes (Domínguez, 2002). Más recientemente, la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OECD) define la eutrofización como un enriquecimiento de las aguas en sustancias nutritivas que conduce, generalmente, a modificaciones como el aumento de la producción de algas y otras plantas acuáticas, deterioro de la calidad de agua y del ecosistema acuático. El indicador que nos define el estado trófico de las aguas es el índice o grado de eutrofia. Éste, nos permite clasificar las aguas, de lagos o embalses, de un estado oligotrófico (con bajo nivel de nutrientes) a un estado hipertrófico (con gran abundancia de nutrientes).

El uso del sensor Thematic Mapper (TM) de Landsat es útil para la determinación de variables indicadoras del estado trófico, como la concentración de clorofila *a*, la transparencia y las partículas en suspensión o seston en el agua (Baban, 1993; Cheshire *et al.*, 1988; Dekker and Peters, 1993; Lathrop *et al.*, 1991; Lavery *et al.*, 1993; López-García y Caselles, 1987 y 1990; Mayo *et al.*, 1995; Allee *et al.*, 1999; Brivio *et al.*, 2001; Kloiver *et al.*, 2001; Duan *et al.*, 2007).

Caselles *et al.*, (1986) publicaron un estudio sobre el estado trófico del lago de la Albufera (Valencia). Donde obtuvieron un modelo para la clorofila *a* y el seston en un cierto intervalo de reflectividades. Pero no pudieron definir un modelo para la transparencia.

Más recientemente, Domínguez *et al.*, (2009) publicaron un estudio sobre el estado trófico de los lagos situados en el “Parque Regional del Sureste”, situado a 20 km al SE de la ciudad de Madrid. En este caso se obtuvieron modelos para la clorofila *a*, el seston y la transparencia, en otro intervalo de reflectividades.

La diferencia entre estos dos estudios es que las variables indicadoras del estado trófico abarcan intervalos diferentes de reflectividades. En el presente trabajo, se han tomado los datos de las variables de

la Albufera y del “Parque Regional del Sureste” y se ha definido un modelo único, válido para ambos lugares.

El objetivo de nuestro trabajo ha sido, dar un paso más hacia una relación única para el estudio del estado trófico de lagos y embalses mediante el sensor Thematic Mapper de Landsat.

ZONA DE ESTUDIO

Los lagos objeto de estudio están localizados en dos áreas diferentes. La Albufera de Valencia está situada en la costa mediterránea 10 km al sur de la ciudad de Valencia. La comunicación de la Albufera con el mar se lleva a cabo por tres canales o “golas”, donde el flujo de agua es regulado por compuertas que mantienen su nivel en los valores más adecuados al cultivo de arroz. Esto es debido a que la Albufera está, en su mayor parte, dedicada al cultivo de arroz. La Albufera es un sistema hipertrófico, pero tiene una gran diferencia respecto a otros sistemas hipertróficos: es posible la renovación del agua mediante un sistema de compuertas que permite evacuar el agua cuando ésta llega al punto en que debería producirse la muerte y el final del sistema. Estos flujos de entrada de agua al lago condicionan la evolución anual del sistema (Caselles *et al.*, 1986).

La otra zona de estudio se encuentra a 20 km al sureste de la ciudad de Madrid. Es una reserva natural denominada “Parque Regional del Sureste”. Las lagunas objeto de estudio están ligadas directamente a la minería a cielo abierto. Un gran porcentaje de las lagunas situadas en la zona de estudio son artificiales, generadas por actividades extractivas. El estado trófico de estas lagunas depende del grado de intervención humana. La laguna de las Madres sufrió un plan de recuperación en los 90, actualmente es un sistema oligotrófico y es utilizada para usos educativos y recreativos. En el caso de la laguna del Campillo, la explotación ha concluido y la laguna está abandonada. Al estar abandonada, la laguna sigue su propia dinámica y actualmente es un sistema eutrófico. En cambio, en la laguna del Porcal la explotación no ha concluido. Esto significa que sufre un elevado grado de deterioro por agresión humana y, por lo tanto, se trata de un sistema hipertrófico. A diferencia de otras masas de agua, estos lagos carecen de entradas o salidas superficiales de agua. La contribución de agua se produce en época de lluvias. Debido a esto la evolución temporal del sistema se comporta de forma cíclica y la ausencia

de grandes cantidades de concentraciones de seston permite que la actividad biológica sea abundante y la concentración de clorofila *a* elevada (Domínguez, 2002).

MEDIDAS Y MÉTODOS

Datos verdad-terreno

El estudio se ha realizado a partir de los datos de la campaña del día 22 de Julio de 1985 en la Albufera (Valencia) y de los datos obtenidos por el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) de la campaña del 3-4 de Julio del 2000 en los lagos del Porcal, las Madres y el Campillo situados en el “Parque Regional del Sureste” (Madrid). El estudio se ha realizado en estas fechas debido a que en verano es la época en que hay más actividad biológica.

Los datos verdad-terreno utilizados consisten en: clorofila *a* (mg/m³), transparencia (disco de Secchi, en m) y seston (mg/l). Fueron obtenidos en diferentes puntos de muestreo, repartidos por la totalidad de los lagos objeto de estudio (tablas 2 y 3). Las muestras fueron tomadas coincidiendo con el paso del satélite por las zonas de estudio.

La clorofila *a* se emplea para estimar la biomasa algal. La determinación cuantitativa (mg/m³) se basa en el análisis espectrofotométrico de extractos de clorofila en una solución 1:1 de acetona 90% y dimetilsulfóxido, según el método tricromático de Strickland y Parsons (1968):

$$Clf.a = (11,6 A_{665} - 1,31 A_{645} - 0,14 A_{630})(v / V_z) \quad (1)$$

donde A_{665} , A_{645} , A_{630} son las absorciones de las longitudes de onda de 665, 645 y 630 nm, v es el volumen del extracto en ml, V es el volumen de la muestra de agua filtrada en l, y z es el paso óptico de la cubeta espectrofotométrica en cm.

La medida del seston es otro método de estimar la biomasa, aunque incluye partículas muertas, inertes o degradadas. En el caso de la Albufera, se realizó con un contador de partículas “Coulter” modelo ZM, contando partículas cuyo diámetro estuviera comprendido entre 2,66 y 80 μ m. Se separaron los tamaños en clases y se estimaron los pesos finales de las partículas contadas en relación al volumen de muestra original (Caselles *et al.*, 1986).

En el caso de los lagos del “Parque Regional del Sureste” las muestras de agua se filtraron mediante un filtro de fibra de vidrio estándar y finalmente se hallaron las concentraciones de seston con las estimaciones de los pesos finales en relación al volumen de la muestra inicial (Domínguez *et al.*, 2009).

La transparencia fue medida con el disco de Secchi. Uno de los motivos por los que se optó por este método fue que la toma de muestras se debía realizar en un tiempo limitado, por el paso del satélite, y con este método el muestreo se realiza más rápidamente que con otros métodos.

El disco de Secchi es un disco, de color blanco (Albufera) o alternando cuadrantes blancos y negros (Parque Regional del Sureste), de 20 cm de diámetro. La estimación de la transparencia es la medida de las profundidades a las que el disco desaparece al descenderlo y aparece al elevarlo. La transparencia puede estar afectada por el color del agua, las algas y sedimentos en suspensión. Como es lógico, la relación existente entre el seston y la profundidad del disco de Secchi es tal que a mayor concentración de seston menor será la profundidad de Secchi y viceversa. Igualmente podríamos decir de la clorofila *a*, a mayor concentración menor profundidad de Secchi.

Las mejores correlaciones obtenidas entre las diferentes variables, con un nivel de significación $\alpha = 0,01$, se muestran en la tabla 1. En esta tabla, además de la fuerte correlación entre las variables, se observa la dependencia inversa entre la clorofila *a* y el seston, con la transparencia. También se observa, la fuerte correlación directa entre la clorofila *a* y el seston. Esto último es debido a que la cantidad de seston orgánico existente es mayor que la del inorgánico.

Variables	Ln(Secchi)	Ln(Clora)
Ln(Clora)	-0.98	
Ln(Seston)	-0.95	0.97

Tabla 1. Matriz de correlación de las diferentes variables estudiadas, con un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

En las figuras 1 y 2 se representa la relación existente entre la clorofila *a* y el seston con la transparencia.

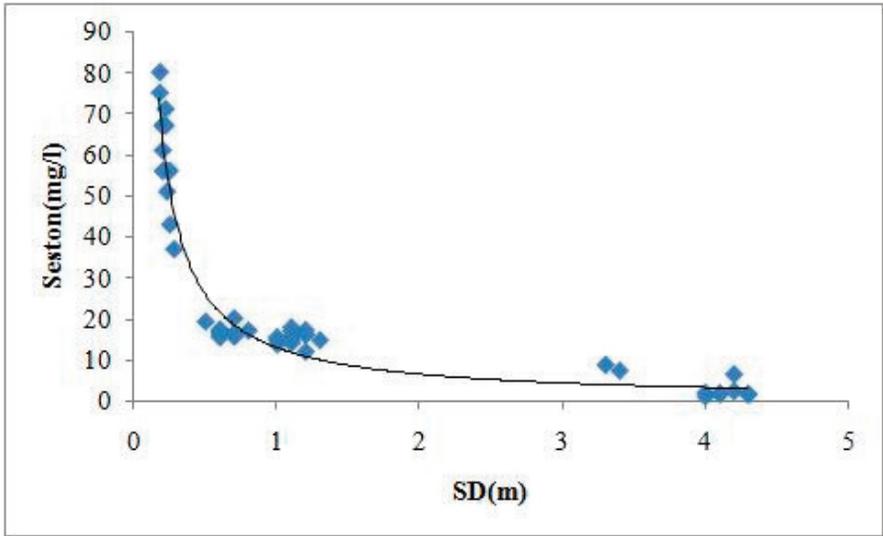


Figura 1. Representación de la variación de seston frente a los valores de la profundidad de Secchi.

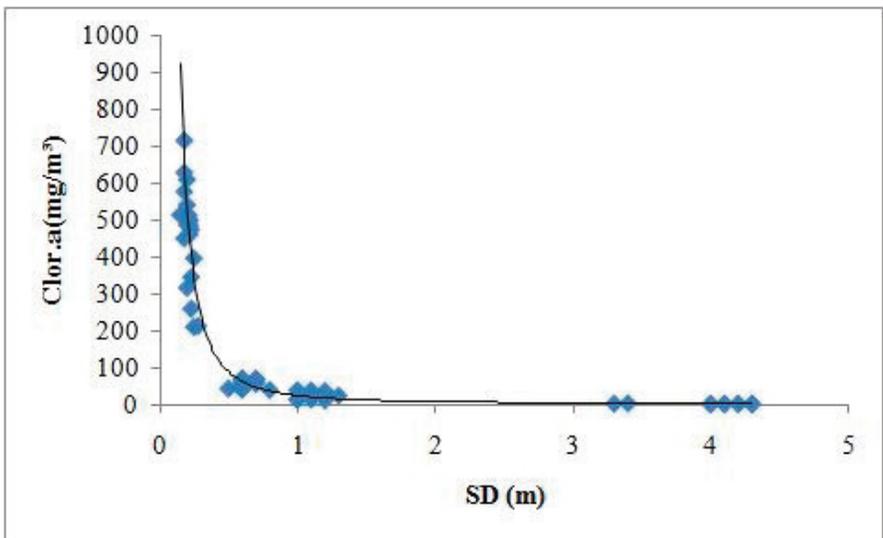


Figura 2. Representación de la variación de clorofila a frente a los valores de la profundidad de Secchi.

Análisis de las imágenes

Las escenas TM correspondientes al “Parque Regional del Sureste” fueron corregidas geométricamente. Dicha corrección se basó en la selección de puntos de control en tierra mediante la utilización de mapas topográficos a escala 1:100 000 del área de estudio. Para evitar perturbaciones de los valores radiométricos originales, se aplicó el método de interpolación del vecino más próximo. Los píxeles de agua y tierra fueron discriminados aplicando un umbral simple en la banda del infrarrojo próximo (Domínguez *et al.*, 2009).

La corrección atmosférica de las imágenes TM de las zonas de estudio se llevó a cabo siguiendo el método de Gilabert *et al.*, 1994. Se decidió utilizar este método debido a que se desarrolló para superficies oscuras, como puede ser el agua, y espesores ópticos pequeños. Los resultados aparecen en las tablas 2 y 3.

Finalmente, en cuanto a la localización de los puntos de muestreo, en el caso de la Albufera, se tomó la media aritmética obtenida con los valores comprendidos dentro de un entorno de 4x4 píxeles, esto es, el equivalente en el suelo a una zona de 120 m x 120 m. Posteriormente se sometió a un examen crítico cada una de estas zonas, de forma que fueron excluidos del análisis los puntos que, por situarse en zonas muy heterogéneas, pudieran presentar problemas en su localización (Caselles *et al.*, 1986).

En cambio, en los lagos del “Parque Regional del Sureste”, los puntos de muestreo se eligieron a partir de una imagen georreferenciada ATM (Airborne Thematic Mapper) y se localizaron en el campo mediante GPS. En este caso, el valor del píxel es el promedio del valor correspondiente a la medida puntual realizada in situ (Domínguez, 2002).

RESULTADOS

Las mejores correlaciones que se han obtenido para los datos de clorofila *a* y de transparencia han sido con la reflectividad de la banda 2 del TM. Y para el seston con la reflectividad de la banda 4 del TM.

Se han evaluado varios modelos para determinar las relaciones entre los datos verdad-terreno y las reflectividades del sensor TM. En la tabla 4 se muestran los parámetros estadísticos que se han utilizado para determinar la significación estadística de los modelos de regresión. Éstos incluyen el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el valor F. El valor F es el expresado como el cociente del valor de F observado y F crítico a un nivel de significación del 5% (seston) y del 1% (clorofila *a*, transparencia). A mayor cociente, la predicción del modelo será más significativa (Lathrop *et al.*, 1991).

Al representar los datos de concentración de clorofila *a* frente a los valores de reflectividad y teniendo en cuenta el significado de los estadísticos de regresión, el modelo que se ha obtenido, con una bondad del ajuste del 96%, es (figura 3).

Para la concentración de seston, el modelo obtenido con una bondad del ajuste del 93% es el siguiente (figura 4):

$$(Clf.a)^{1/3} = [(0,74 \pm 0,02) TM2 + (0,84 \pm 0,12)](mg / m^3)^{1/3} \quad (2)$$

Finalmente, para la transparencia también se ha obtenido un modelo (figura 5), a diferencia del estudio de la Albufera:

$$(seston)^{1/2} = [(1,62 \pm 0,07) \ln(TM4) + (4,28 \pm 0,08)](mg / l)^{1/2} \quad (3)$$

Finalmente, para la transparencia también se ha obtenido un modelo (figura 5), a diferencia del estudio de la Albufera:

$$Transparencia(m) = (4.22 \pm 1.07)(TM2)^{-(1,32 \pm 0,04)} \quad (4)$$

con una bondad del ajuste del 97%.

A continuación, se ha realizado la validación cruzada de los modelos propuestos para valores de reflectividades de las mismas zonas de estudio. Los valores obtenidos se muestran en las tablas 5, 6 y 7.

También se ha realizado la validación para el modelo propuesto de la clorofila *a* en una zona diferente a la estudiada. Los valores han sido extraídos del estudio de lagos italianos realizado por Giardino *et al.*, 2001 (tabla 8).

TM2 (%)	TM4 (%)	SECCHI (m)	CLORA (mg/m ³)	SESTON (mg/l)
10.2	7.1	0,23	346	56
10.2	8.1	0,21	506	-
10.2	7.8	0,23	260	51
9.9	6.5	0,21	514	-
11.4	8.1	0,25	210	43
9.9	7.1	0,18	578	80
9.5	6.5	0,22	486	67
10.2	7.5	0,20	542	67
10.8	8.4	0,20	317	61
10.2	8.4	0,15	515	-
9.9	7.5	0,18	451	-
9.5	7.1	0,18	717	75
9.9	7.1	0,18	630	-
10.2	6.8	0,25	397	56
9.9	6.8	0,22	462	71
9.9	7.5	0,20	611	67
10.2	8.1	0,20	488	56
11.7	8.4	0,28	213	37
9.9	7.5	0,22	499	-
9.5	6.8	0,23	475	-

Tabla 2. Reflectividades en los canales 2 y 4 del sensor TM y datos verdad- terreno de la campaña del día 22 de Julio de 1985 en la Albufera (Valencia).

TM2 (%)	TM4 (%)	SECCHI (m)	CLOR.A (mg/m ³)	SESTON (mg/l)
1,2	0,1	4,0	0,6	2,1
1,2	0,2	4,0	0,8	1,2
1,2	0,2	4,3	0,8	1,7
1,1	0,2	4,2	0,9	2,5
1,2	0,2	4,1	0,9	1,8
1,2	0,3	4,3	1,1	1,9
0,7	0,3	4,1	1,2	2,0
1,1	0,3	4,2	1,5	6,6
1,1	0,3	3,3	1,9	8,9
1,0	0,4	3,4	2,8	7,5
1,4	0,4	1,2	10,7	12,1
2,7	0,4	1,0	11,9	13,9
3,0	0,5	1,1	13,5	14,2
2,8	0,5	1,0	14,6	15,0
2,2	0,5	1,1	14,8	15,7
2,1	0,6	1,3	23,9	14,9
2,3	0,6	1,2	25,9	16,4
3,0	0,7	1,1	29,1	15,7
2,8	0,9	1,2	29,9	17,3
2,9	0,9	1,1	33,1	17,1
2,6	0,9	1,1	33,7	18,0
3,3	0,9	1,2	36,2	16,2
2,3	1,0	1,1	37,7	14,8
2,5	1,0	1,0	38,2	15,6
3,0	1,0	0,8	39,0	17,2
3,3	1,0	0,6	40,4	16,1
3,5	1,1	0,5	42,9	19,4
4,2	1,1	0,6	50,0	16,6
4,1	1,1	0,6	42,9	16,7
3,9	1,1	0,7	55,8	20,2
3,7	1,2	0,7	59,0	16,0
3,2	1,2	0,6	59,0	15,6
3,7	1,2	0,6	63,9	17,5
3,9	1,3	0,7	66,2	15,8
3,5	1,3	0,7	67,5	16,6
4,2	1,4	0,6	67,9	17,0
4,1	-	0,6	68,4	-
3,6	-	0,7	70,1	-
3,7	-	0,6	70,5	-
3,2	-	0,7	71,0	-
3,5	-	0,6	81,1	-
4,1	-	0,6	81,5	-

Tabla 3. Reflectividades en los canales 2 y 4 del sensor TM y datos verdad- terreno de la campaña del 3-4 de Julio del 2000 en los lagos del "Parque Regional del Sureste" (Madrid).

Variables	Modelo	R ²	RMSE (mg/m ³)	F/Fc (α=0,01)	N
y=Clor.a(mg/m ³)	$(y)^{1/3}=(0,74\pm0,03)x+(0,84\pm0,16)$	0.96	30	87	28
x= TM2 (%)	$y=(59,69\pm5,07)x-(117\pm28)$	0.84	80	18	28
Variables	Modelo	R ²	RMSE (mg/l)	F/Fc (α=0,05)	N
y=Seston(mg/l)	$(y)^{1/2}=(1,69\pm0,10)\ln(x)+(4,24\pm0,12)$	0.93	5	57	23
x= TM4 (%)	$y=(7,0\pm0,5)x-(7,7\pm1,8)$	0.91	6	47	23
Variables	Modelo	R ²	RMSE (m)	F/Fc (α=0,01)	N
y= Secchi(m)	$y=(4,22\pm1,07)x^{(1,33\pm0,04)}$	0.97	0.3	133	30
x= TM2 (%)					

Tabla 4. Estadísticos de regresión de los modelos obtenidos para la predicción de clorofila a, seston y transparencia.

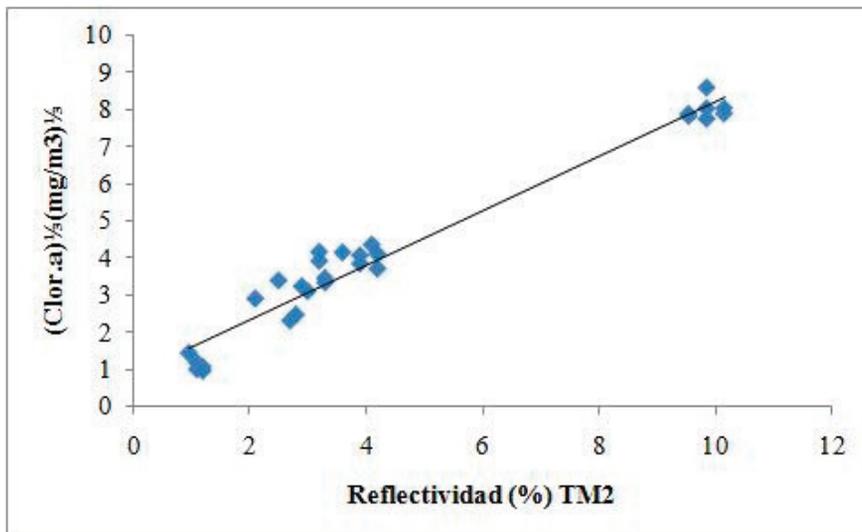


Figura 3. Representación de la raíz cúbica de la clorofila a frente a los valores de reflectividad de la banda TM2.

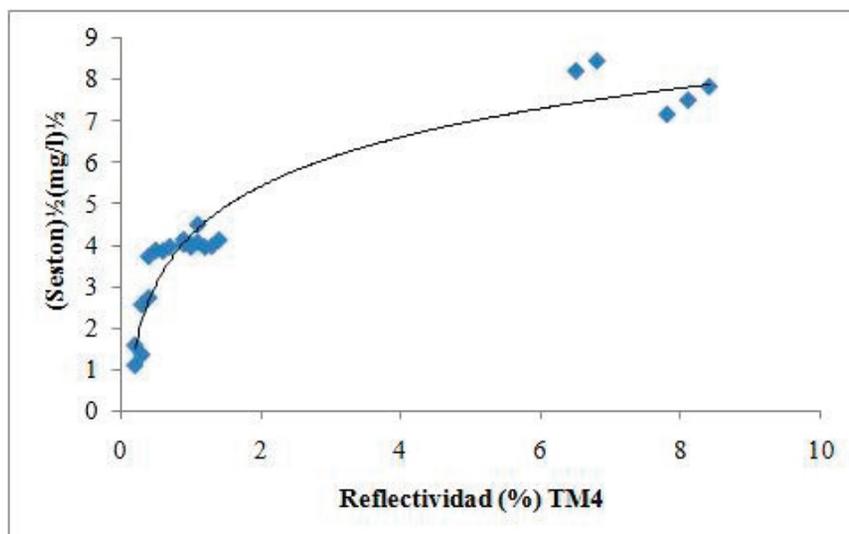


Figura 4. Representación de la raíz cuadrada de partículas de seston frente a los valores de reflectividad de la banda TM4.

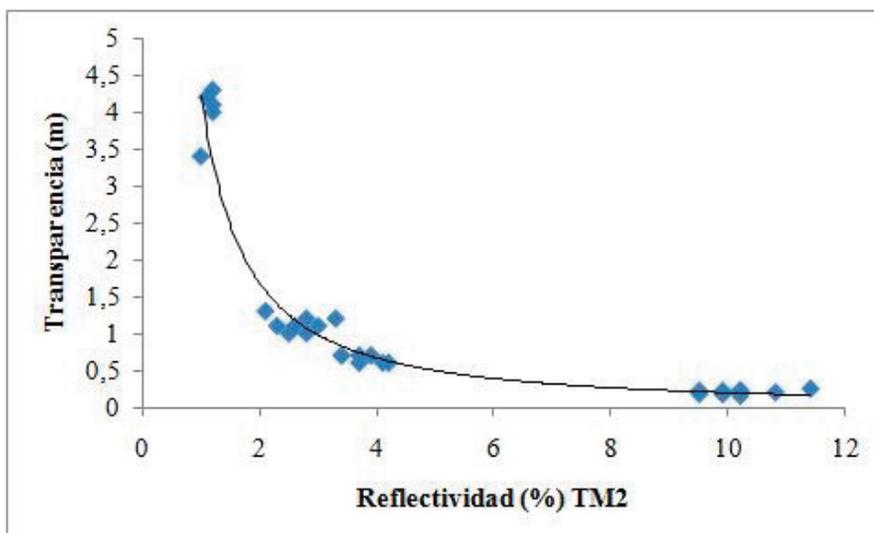


Figura 5. Representación de la transparencia medida mediante el Disco de Secchi frente a los valores de la reflectividad de la banda TM2.

Como se observa en las tablas 5, 6, 7 y 8, los modelos propuestos, para la determinación de las variables indicadoras del estado trófico, han presentado diversos resultados. En el caso de la clorofila *a* se ha obtenido un RMSE de 30 mg/m³ para la aplicación del modelo en puntos del área de estudio, independientes a los puntos empleados para construir el modelo. Al aplicarlo en los cuatro puntos del estudio de Giardino *et al.*, 2001, se ha obtenido un RMSE de 0,7 mg/m³ (Tablas 5 y 8).

Un RMSE de 30 mg/m³ no se considera aceptable. Este error tan elevado, en la determinación de la variable, es debido a que se están comparando dos medidas diferentes: la clorofila *a* medida in situ y la estimada mediante satélite. Los valores de clorofila *a* medidos in situ pertenecen a valores de superficie y la concentración de clorofila *a* obtenida en el modelo es la correspondiente a la columna de agua que observa el sensor.

En el caso del seston se ha obtenido un RMSE de 4 mg/l, que se considera aceptable (tabla 6).

Finalmente, al aplicar el modelo propuesto para determinar la transparencia en la zona de estudio, se ha obtenido un valor aceptable del RMSE de 0,2 m (tabla 7).

La transparencia en el agua está afectada por el color, la turbidez debida a las partículas inorgánicas en suspensión y por el fitoplancton (Koenings *et al.*, 1991).

Como es de esperar, la transparencia medida con el disco de Secchi disminuye al aumentar la turbidez medida en NTUs (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Diversos autores han estudiado la relación existente entre las dos variables. Effler, 1988, estudió la relación entre la profundidad de Secchi y la turbidez (NTUs) definiendo un modelo lineal. Koenings *et al.*, 1991, también definieron un modelo lineal, pero estudiaron la relación entre la profundidad de Secchi y el cociente turbidez-color del agua. En cambio, Tripathi *et al.*, 1998, definieron un modelo cuadrático para relacionar ambas variables. También se han obtenido modelos potenciales, como el que proponen Smith *et al.*, 2002, pero en este caso con un disco negro. Por lo tanto, se han obtenido modelos empíricos, pero no se conoce un factor universal de conversión entre las dos unidades de medida (m, NTUs). Por esta razón se ha utilizado el disco de Secchi para medir la transparencia. Esto podría explicar la relación asintótica que se observa en las gráficas de transparencia (figuras 1 y 2).

CONCLUSIÓN

El sensor TM del Landsat es útil para la determinación de variables indicadoras del estado trófico del agua, como la clorofila *a*, transparencia y seston.

En el presente trabajo, a diferencia de otros estudios, se ha intentado obtener una relación empírica de cada una de las variables citadas que pueda ser aplicada a cualquier lago o embalse. Para ello, se han utilizado dos experiencias realizadas en lagos de dos zonas distintas y con estados tróficos muy diferentes: la Albufera de Valencia, un sistema hipertrofico (reflectividades TM2 del 10 al 12 %), y los lagos del Parque Regional del Sureste de Madrid, cuyos estados tróficos van de oligotrofico a hipertrofico (reflectividades TM2 del 1 al 4%).

Como resultado se han obtenido relaciones empíricas para la clorofila *a* y la transparencia, con la reflectividad de la banda 2 del TM, y para el seston, con la reflectividad de la banda 4 del TM, aplicables a sistemas con grado eutrófico de hipertrofia extrema a oligotrofia. Los modelos propuestos se han validado en la zona de estudio, y en el caso de la clorofila *a* también se ha validado en cuatro puntos independientes de la zona de estudio, obteniendo diversos resultados, aceptables en la determinación de la transparencia y de la concentración de seston, y no aceptables en el caso de la concentración de clorofila *a*. En un futuro próximo, se necesitaría validar los modelos propuestos en más puntos, distintos del área de estudio y que abarquen estados tróficos diferentes.

La clorofila *a* (mg/m³) y la transparencia medida con el disco de Secchi (m) se encuentran entre las variables que, según la OECD, determinan la clasificación del estado trófico de las masas de agua. Un valor del RMSE de 30 mg/m³ en la determinación de clorofila *a* no permitiría diferenciar entre los distintos estados tróficos, según la clasificación de la OECD. Pero un RMSE de 0,2m, en la determinación de la transparencia medida con el disco de Secchi, sí que permitiría diferenciarlos.

La ventaja de obtener una relación empírica única, sería que el estudio de la calidad de aguas se realizaría más fácilmente. Sin tener que realizar muestreos simultáneos a la adquisición de las imágenes.

A parte de las validaciones citadas anteriormente, el siguiente paso de este estudio sería la aplicación de los diferentes modelos obtenidos, para la determinación de variables indicadoras del estado trófico en

[Clor.a] observada (mg/m ³)	[Clor.a] calculada (mg/m ³)	((Clor.a) observada)- ((Clor.a) calculada) (mg/m ³)
506	582	-76
578	537	41
542	582	-40
451	537	-86
611	537	74
499	537	-38
0,6	5,2	-4,6
0,8	5,2	-4,4
0,9	5,2	-4,3
1,2	2,5	-1,3
1,9	4,5	-2,6
10,7	6,6	4,1
13,5	28,7	-15,2
14,8	15,0	-0,2
25,9	16,4	9,5
29,9	24,7	5,2
33,7	21,1	12,6
37,7	16,4	21,3
39,0	28,7	10,3
42,9	40,4	2,5
42,9	58,1	-15,2
59,0	45,8	13,2
63,9	45,8	18,1
67,5	40,4	27,1
68,4	58,1	10,3
70,5	45,8	24,7
81,1	40,4	40,7
RMSE =30 mg/m ³		

Tabla 5. Comparación de los valores verdad-terreno y calculados con el modelo de clorofila *a* en las dos zonas de estudio. Con valores independientes de los puntos empleados para la construcción del modelo.

[Seston] observado (mg/l)	[Seston] Calculado (mg/l)	((Seston) observado)- [Seston] calculado) (mg/l)
2,1	0,1	2,0
1,7	2,3	-0,6
1,8	2,3	-0,5
2,0	4,9	-2,9
8,9	4,9	4,0
12,1	7,2	4,9
14,2	9,4	4,8
15,7	9,4	6,3
16,4	11,4	5,0
17,3	16,5	0,8
18,0	16,5	1,5
14,8	18,0	-3,2
17,2	18,0	-0,8
19,4	19,4	0,0
16,7	19,4	-2,7
16,0	20,7	-4,7
17,5	20,7	-3,2
16,6	21,9	-5,3
56	57	-1
67	58	9
56	56	0
67	58	9
RMSE = 4 mg/l		

Tabla 6. Comparación de los valores verdad-terreno y calculados con el modelo de seston en las dos zonas de estudio. Con valores independientes de los puntos empleados para la construcción del modelo.

[Secchi] observado (m)	[Secchi] calculado (m)	(([Secchi] observado)- [Secchi] calculado) (m)
4,2	3,7	0,5
4,0	3,3	0,7
3,3	3,7	-0,4
1,2	1,4	-0,2
1,1	1,0	0,1
1,1	1,0	0,1
1,1	1,5	-0,4
1,0	1,1	-0,1
0,8	1,0	-0,2
0,7	0,7	0,0
0,7	0,8	-0,1
0,7	0,9	-0,2
0,6	0,6	0,0
0,6	0,7	-0,1
0,6	0,7	-0,1
0,6	0,7	-0,1
0,6	0,8	-0,2
0,6	0,9	-0,3
0,6	0,9	-0,3
0,5	0,8	-0,3
0,28	0,16	0,12
0,25	0,19	0,06
0,23	0,19	0,04
0,23	0,21	0,02
0,22	0,20	0,02
0,21	0,20	0,01
0,20	0,19	0,01
0,20	0,20	0,00
0,18	0,20	-0,02
0,18	0,21	-0,03
RMSE = 0,2 m		

Tabla 7. Comparación de los valores verdad-terreno y calculados con el modelo de transparencia en las dos zonas de estudio. Con valores independientes de los puntos empleados para la construcción del modelo.

[Clor.a] Observada (mg/m ³)	[Clor.a] Calculada (mg/m ³)	([Clor.a] observada)- [Clor.a] calculada (mg/m ³)
7,0	5,2	1,8
7,7	3,9	3,8
7,1	3,9	3,2
5,5	2,5	3,0
RMSE= 3 mg/m ³		

Tabla 8. Comparación de los valores verdad-terreno y calculados con el modelo de clorofila a de los datos extraídos de Giardino.

todo tipo de sistemas eutróficos, e intentar obtener el error de aplicación de la metodología aquí propuesta, para que sirva como herramienta en el seguimiento del estado ecológico de las masas de aguas, según la Directiva Marco del Agua (European Commission, 2000).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia por la ayuda concedida (Proyectos CGL2007-64666-CLI y CGL2007-29819E) y a la Generalitat Valenciana (Proyecto PROMETEO/2009/086). También queremos agradecer los comentarios realizados por la Prof. M.A. Gilabert y M. Mira, de la Universidad de Valencia. Finalmente, deseamos expresar nuestro agradecimiento a los revisores anónimos, pues debido a sus comentarios el trabajo ha mejorado sustancialmente.

REFERENCIAS

ALLEE, R. J. y JOHNSON, J. E. 1999. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll-a and Secchi disc depth of Bull Shoals Reservoir, Arkansas, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 20: 1057-1072.

BABAN, S. M. J. 1993. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads U. K., using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 1245-1246.

BRIVIO, P. A., GIARDINO, C. y ZILIOLI, E. 2001. Determination of Chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*. 22: 487-502.

CASELLES, V., LÓPEZ GARCÍA, M. J. y SORIA, J. M. 1986. Estudio del estado trófico del lago de la Albufera (Valencia) a partir de imágenes del Landsat-5 (TM). I Reunión Científica del Grupo de Trabajo de Teledetección. Barcelona, 10-11 de diciembre.

CHESHIRE, H. M., PELKEY, P. D. y VOSE, J. M. 1988. Multiple regression technique in the analysis of Landsat TM for water quality monitoring. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 29-38.

DEKKER, A. G. y PETERS, S. W. M. 1993. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case of study in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*. 14:799-821.

DOMÍNGUEZ, J. A. 2002. Estudio de la calidad del agua de las lagunas de gravera mediante teledetección. *Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá*. Alcalá de Henares, España.

DOMÍNGUEZ, J. A., CHUVIECO, E. y SASTRE, A. 2009. Monitoring transparency in inland water bodies using multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*. 30:1567-1586.

DUAN, H. T., ZHANG, Y. Z., ZHAN, B., SONG, K. S. y WANG, Z. M. 2007. Assessment of Chlorophyll-a concentration and trophic state

- for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. *Environmental Monitoring and Assessment*. 129:295-308.
- EFFLER, S. W. 1996. *Limnological and Engineering Analysis of a Polluted Urban Lake/ prelude to Environmental Management of Onondaga Lake, New York, New York*, Springer-Verlag, 832.
- EUROPEAN COMMISSION. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. 327 (22.12.2000):1-72.
- GIARDINO, C., PEPE, M., BRIVIO, P. A., GHEZZI, P. y ZILIOLO, E. 2001. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *The Science of the Total Environment*. 268:19-29.
- GILABERT, M. A., CONESE, C. y MASSELLI, F. 1994. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing*. 15:2065-2086.
- KLOIVER, S. M., BREZONIK, P. L., OLMANSON, L. G. y BAUER, M. E. 2001. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*. 82:38-47.
- KOENINGS, J. P. y EDMUNDSON, J. A. 1991. Secchi disk and photometer estimates of light regimes in Alaskan lakes: Effects of yellow color and turbidity. *Limnology and Oceanography*. 36(1): 91-105.
- LATHROP, R. G., LILLESAND, T. M. y YANDELL, B. S. 1991. Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. *International Journal of Remote Sensing*. 12:2045-2064.
- LAVERY, P., PAATTIARATCHI, C., WYLLIE, A. y HICK, P. 1993. Water quality monitoring in estuarine water using the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*. 46:268-280.
- LÓPEZ-GARCÍA, M. J. y CASELLES, V. 1987. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Albufera lagoon of Valencia (Spain). *13th Annual Conference of the Remote Sensing Society*. Nottingham, September 7-11.
- LÓPEZ-GARCÍA, M. J. y CASELLES, V. 1990. A multitemporal study of chlorophyll-a concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 11:301-311.
- MAYO, M., GITELSON, A., YAZOBI, Y. Z. y BEN-AVRAHAM, Z. 1995. Chlorophyll distribution in Lake Kinneret determined from Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 16: 175-182.
- OECD, 1982. Eutrophication des Eaux. Methodes de surveillance, d'évaluation et de lutte *Eutrophication of water; monitoring, assessment and control*. Paris: OECD
- SMITH, D. G. y DAVIES-COLLEY, R. J. 2002. If visual water clarity is the issue, then why not measure it?. *Proceedings of the National Water Quality Monitoring Council Annual Conference*. Madison, Wisconsin, May 19-23, 2002.
- STRICKLAND, J. D. H. y PARSONS, T. P. 1968. *A practical handbook for seawater analysis*. (Ottawa: Fisheries Research Board).
- TRIPATHI, N. K., VENKOBACHAR, C., SINGH, R. K. y SINGH, S. K. 1998. Monitoring the pollution of river Ganga by tanneries using the multiband ground truth radiometer. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 53: 204-216.