

# Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante teledetección

J. Bustamante, R. Díaz-Delgado y D. Aragónés

*Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (LAST) y Grupo de Ecología Espacial, Dep. Biología Aplicada, Estación Biológica de Doñana, CSIC. Avda. María Luisa s/n, 41013 Sevilla.*

jbustamante@edb.csic.es, rdiaz@edb.csic.es, daragones@edb.csic.es

## RESUMEN

En este trabajo se analiza el potencial de las imágenes del sensor TM de Landsat para determinar la presencia de inundación, y los valores de profundidad y turbidez en zonas de inundación somera espacialmente heterogéneas. El objetivo final es valorar la información radiométrica de los sensores de la serie Landsat (MSS, TM y ETM+) para reconstruir los cambios históricos estacionales en las características de las aguas someras de las marismas de Doñana. Utilizamos 249 puntos de muestreo simultáneos con dos adquisiciones de Landsat 5 en primavera de 2004 y ajustamos modelos estadísticos a los datos de campo para predecir el grado de inundación, profundidad y turbidez en el punto de muestreo en función de los datos radiométricos del sensor. Los resultados indican que la banda 5 de TM es el mejor indicador del grado de inundación de un punto (especialmente cuando las aguas presentan sedimentos en suspensión y vegetación flotante o emergente), y en consecuencia se proponen modelos que en función de la radiometría del sensor TM explican un 31% de la varianza de la turbidez del agua y un 70% de la varianza de la profundidad en zonas inundadas.

**PALABRAS CLAVE:** inundación, turbidez, profundidad, Landsat, marismas de Doñana.

## ABSTRACT

In this work, we check the ability of Landsat TM images to discriminate flooded areas and to quantify depth and turbidity in very spatially heterogeneous shallow wetlands. We aim at evaluating whether radiometric values of Landsat sensors (MSS, TM y ETM+) aid to reconstruct historical and seasonal changes on physico-chemical characteristics of the Doñana shallow marshes. We use 249 training points simultaneously to two scenes of Landsat 5 (spring of 2004). Then, we fit statistic models within ground truth data and radiometric reflectances in order to map flooding level, depth and turbidity. Results confirm the 5<sup>th</sup> TM band as the best indicator of flooding level at any place (especially when waters are charged of suspended sediments and floating or emergent aquatic plants). Therefore, we apply two models to explain the 31% of water turbidity and the 70% of water depth in flooded areas from reflectance values of Landsat TM5 band.

**KEY WORDS:** flooding, water turbidity, water depth, Landsat, Doñana marshes.

## INTRODUCCIÓN

El agua presenta una baja reflectividad, especialmente en las bandas del infrarrojo cercano y medio (bandas 4, 5 y 7 de los sensores TM y ETM+). Existen en la literatura distintos procedimientos para identificar zonas inundadas basados en la baja reflectividad del agua en el infrarrojo. Se han propuestos algunos índices para determinar grado de inundación de manera automática en una imagen. Ángel-Martínez (1994) sugiere un índice que es utilizado por el CEDEX para cartografiar aguas continentales:

$$I_{CEDEX} = \frac{TM4}{TM3} - \frac{TM4}{TM5} \quad (1)$$

Según Castaño *et al.* (1999) si el índice tiene valores inferiores a 0.4 el pixel se considera como inundado. Domínguez Gómez (2001) define un índice de agua de la diferencia normalizada NDWI que es útil para discriminar aguas que no tengan una elevada concentración de sólidos o "blooms" de algas:

$$NDWI = \frac{TM 2 - TM 4}{TM 2 + TM 4} \quad (2)$$

Pero documenta que el índice no funciona bien en ocasiones con imágenes de un sensor ATM aerotransportado y sugiere como mejor método el análisis del histograma de la banda 4 (Infrarrojo cercano 760 a 900 nm), donde el agua presenta baja reflectividad. Sin embargo, el análisis radiométrico de aguas con distintos niveles de turbidez realizado por Lee *et al.* (2002) demuestra que la banda 5 de TM y ETM+ de Landsat (1550-1750 nm) es la menos sensible a la carga de sedimentos del agua y por lo tanto la que tiene una mejor capacidad para delinear el límite agua-suelo en aguas turbias.

Utilizando como verdad terreno dos muestreos de campo simultáneos a dos adquisiciones de Landsat 5 hemos testado la capacidad relativa del Índice del CEDEX, el NDWI, la banda 4 y la banda 5 de TM para discriminar zonas inundadas frente a zonas sin agua en situaciones típicas de la marisma de Doñana, donde las zonas inundadas son poco profundas, pueden estar parcialmente cubiertas con vegetación emergente o flotante, pueden ser aguas muy someras y presentar valores altos de turbidez por algas o sedimentos en suspensión. Además, hemos evaluado el potencial de los datos radiométricos para predecir la turbidez y profundidad del agua en las zonas inundadas.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Datos de campo

Se realizaron dos campañas de toma de datos de campo, en la zona de la Marisma Gallega y en la Madre de las Marismas, coincidiendo con dos adquisiciones, de Landsat 5 TM del 25 de marzo de 2004 y del 26 de abril de 2004.

Se seleccionaron estas zonas por ser las que históricamente presentan una mayor heterogeneidad en los niveles de inundación, vegetación y turbidez. Se realizaron transectos tomando puntos de muestreo georeferenciados con GPS cada 200 metros. En cada punto de muestreo se registró, en un radio aproximado de 15 m, el grado de inundación en 5 clases [*inundado* = menos de un 25% de suelo emergido, *encharcado* = entre 25-75% de suelo emergido, *empapado* = más de un 75% de suelo emergido, *suelo húmedo* (sin agua libre) y *suelo seco*], el porcentaje de cobertura

(las mismas 5 categorías, en visión cenital) de agua libre, suelo desnudo, vegetación emergente, vegetación flotante, algas y macrófitos sumergidos. Se midió la profundidad en cm y la turbidez en NTU con un turbidímetro nefelométrico portátil Hanna modelo HI 93703.

### Modelos estadísticos

#### *Inundación*

Para la inundación consideramos dos variables respuesta ordinales con valores de 0 a 4. En primer lugar la cobertura de agua libre, siendo 0 sin agua y 4 más del 75% de cobertura de agua libre. En segundo lugar, el grado de inundación, siendo 0 suelo seco y 4 inundado. Aunque ambas variables están relacionadas no son equivalentes. De hecho, algunas zonas estaban inundadas (menos de un 25% de suelo emergido) pero con una alta cobertura de vegetación flotante o emergente, es decir, que aunque tuvieran un 4 en inundación bien podían tener un 0 en cobertura de agua libre (Figura 1). En primer lugar, mediante un modelo de regresión lineal, testamos que variable predictora explicaba mejor las variaciones en la cobertura de agua libre y cual explicaba mejor las variaciones en el grado de inundación.

Una vez seleccionado el mejor predictor para inundación, mediante un árbol de clasificación con las categorías de inundación como variable respuesta, determinamos el mejor punto de corte para definir la categoría de inundado. Usamos para el árbol un valor mínimo de corte de 5, un tamaño mínimo de 10 y una devianza mínima de 0.2.



**Figura 1.** Ejemplo de zona inundada con una alta cobertura de vegetación flotante y emergente.

*Turbidez*

Ajustamos un modelo predictivo del tipo GAM (Modelo Aditivo Generalizado) por un procedimiento por pasos a la turbidez, medida en cada punto en NTU y transformada logarítmicamente,  $\log(\text{NTU}+0.01)$ . Es una primera aproximación para determinar la relación entre la radiometría y el nivel de turbidez del agua en zonas inundadas (excluimos los puntos con otros niveles de inundación). Usamos como predictores potenciales las reflectividades en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de TM, más índices derivados de éstas (índice CEDEX, NDWI y NDVI)..

*Profundidad*

Ajustamos un modelo predictivo del tipo GAM por un procedimiento por pasos a la profundidad, medida en cm y transformada logarítmicamente,  $\log(\text{profundidad}+1)$ . Se excluyen puntos con otros niveles de inundación (encharcado, empapado, suelo húmedo y suelo seco). Usamos como predictores potenciales las reflectividades en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, más índices derivados de éstas (índice CEDEX, NDWI y NDVI).

**RESULTADOS**

**Determinación del grado de inundación**

De las variables testadas, la banda 4 de Landsat es la que mejor explica las variaciones en el agua libre (un 63% de varianza explicada,  $R^2$  en Tabla 1), mientras que la banda 5 es la que explica más varianza del grado de inundación (Tabla 2).

El árbol de clasificación resultante usando como predictor la banda 5 para el grado de inundación tuvo 4 nodos terminales con una devianza residual media de 2.158 y un error de clasificación global de 38.8% (97 sobre 249 puntos de muestreo) y prede-

Predictor	$R^2$	$F$	$P$
TM 4	62.8	418.8	< 0.001
TM 5	59.3	360.7	< 0.001
NDWI	44.4	198.2	< 0.001
I_CEDEx	51.2	259.8	< 0.001

**Tabla 1.** Porcentaje de varianza explicada de la cobertura de agua libre.

ría las siguientes categorías de inundación en base a las reflectancias de la banda 5 (Tabla 3).

Predictor	$R^2$	$F$	$P$
TM 4	11.0	30.5	< 0.001
TM 5	18.0	54.6	< 0.001
NDWI	2.9	7.3	0.007
I_CEDEx	11.6	32.4	< 0.001

**Tabla 2.** Porcentaje de varianza explicada del grado de inundación.

Intervalo reflectancias TM5	Categoría
0.000 – 0.105	Muy inundado
0.105 – 0.145	Inundado
0.145 – 0.199	Encharcado
> 0.199	Suelo seco

**Tabla 3.** Puntos de corte en el árbol de clasificación para grado de inundación.

El porcentaje de acierto global, si nos fijamos sólo en las dos categorías que queremos distinguir “Inundado” y “suelo seco” fue del 95 % (194 correctamente clasificados de 204 puntos en esas dos categorías solamente). No obstante, sólo hay dos puntos “realmente” mal clasificados: 2 inundados clasificados como suelo seco, que suponen menos de 1% de error (Tabla 4).

En base a estos resultados, y al análisis visual de las imágenes, consideramos como inundado todos

		Predicho por árbol de clasificación			
		In	En	Ss	Total
Verdad terreno	In	161	6	2	169
	En	13	7	1	21
	Emp	5	3	2	10
	Sh	5	2	7	14
	Ss	0	2	33	35
Total		184	20	45	249

**Tabla 4.** Matriz de confusión del modelo de árbol de clasificación. (In= Inundado, En= Encharcado, Emp= Empapado, Sh= Suelo húmedo, Ss= Suelo seco).

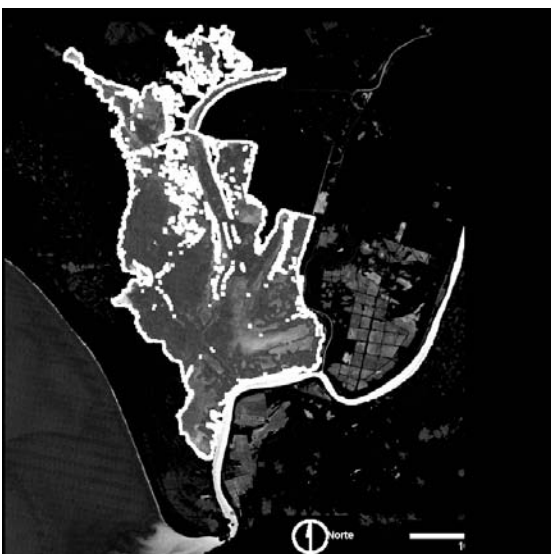
los píxeles con valores de reflectancia en la banda 5 < 0.145, siempre y cuando estuvieran dentro de la máscara de máxima inundación. La máscara de máxima inundación se construyó con las dos fechas de máxima inundación de la serie (dos fechas de invierno con poca vegetación) y seleccionamos un límite de reflectancia en la banda 5 < 0.105 que es más conservadora para agua libre sin vegetación.

### Modelo para turbidez del agua

El mejor modelo para predecir la turbidez del agua en un pixel inundado incluye la reflectancia en las bandas 2, 3 y 7 (Ecuación 3).

$$\text{Log}(NTU+0.01) = 2.30 - (2.55 \cdot 10^{-4} TM 2) + (6.00 \cdot 10^{-4} TM 3) - (2.31 \cdot 10^{-4} TM 7) \quad (3)$$

La turbidez es más alta en zonas inundadas con reflectividades altas en la banda 3 (rojo), pero hay que compensar corrigiendo para la banda 2 (verde) y para la banda 7 (infrarrojo medio). Posiblemente la banda 2 corrige para zonas con mucha vegetación y la 7 para zonas con poca agua. El modelo final explica un 31.5% de varianza (Figura 2). No es el único modelo posible; pero hay otros no lineales y más complejos que no explican un porcentaje de varianza significativamente mayor.



**Figura 2.** Turbidez del agua predicha por el modelo para el 25 de marzo de 2004. La línea blanca delimita la zona inundada de la marisma. Obsérvese la elevada turbidez del río y de la pluma de descarga.

### Modelo para profundidad

En el modelo entran dos de los índices propuestos para discriminar el agua (NDWI e I\_CEDDEX), ambos con una correlación positiva con la profundidad (a mayores valores del índice aguas más profundas). El hecho de que ambos índices entren en el modelo indica que cada uno aporta una información distinta. Al mismo tiempo hay una correlación negativa de la profundidad con la banda 1 de TM (azul). Cuanta más reflectividad en esta banda menos profundidad. El modelo es relativamente bueno, pues tiene un 70.14% de varianza explicada. (Ecuación 4).

$$\text{Log}(Prof+1) = 4.69 - (5.03 \cdot 10^{-5} TM1) - (0.17 I\_CEDDEX) + 2.50 NDWI \quad (4)$$

## DISCUSIÓN

Los resultados sugieren que la banda 5 de TM es el mejor indicador de inundación en situaciones de aguas someras, turbias o con abundante vegetación emergente o flotante. La banda 4 de TM es un buen indicador de aguas libres; pero falla si el agua contiene sedimentos o vegetación emergente. El índice del CEDDEX y el NDWI, aunque significativamente correlacionados con la inundación, son peores indicadores en las situaciones típicas de las marismas de Doñana en las que los hemos testado.

La turbidez y la profundidad de la masa de agua son predecibles en base a datos radiométricos del sensor TM. El modelo de turbidez explica una parte pequeña, aunque muy significativa de la varianza. La profundidad (a la escala que nos interesa 10-200 cm) se puede predecir bien en base a los datos radiométricos.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se está realizando dentro del proyecto "Reconstrucción de las fluctuaciones poblacionales de las aves de Doñana a lo largo de las tres últimas décadas" financiado mediante un convenio entre el CSIC y el Organismo Autónomo de Parques nacionales. Tanto el Parque Nacional como el Parque Natural de Doñana facilitaron los permisos para realizar las tareas de campo. A. Travaini., H. Le Franc, D. Paz, A. Polvorinos, e I. Román colaboraron en los muestreos de campo. J.C. Gilabert, J.L. Pecharromán y P.L. Porta ayudaron con el tratamiento de las imágenes.

## BIBLIOGRAFÍA

- ÁNGEL-MARTÍNEZ, M. C. 1994. *Aplicación de la Teledetección en la localización de superficies de agua*. Informe CEDEX, Madrid.
- CASTAÑO, S., M. F. MEJUTO, A. VELA, A. QUINTANILLA, y RUIZ, J. R. 1999. Monitoring of wetlands evolution. In *Application of Space Techniques to the Integrated management of river basin Water Resources (ASTIMwR). Final Report Contract n° ENV-CT96-0366 Environment and Climate Programme* (S. Montesinos, and S. Castaño, Eds.). European Comission, Directorate General XII, Centre for Earth Observation, Albacete, pp. 27-49.
- DOMÍNGUEZ GÓMEZ, J. A. 2002. Estudio de la calidad del agua de las lagunas de gravera mediante teledetección. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares. 430 páginas.
- KYU-SHUN L, K. TAE-HOON, Y. YEO-SANG, y S. SANG-MING. 2001. Spectral characteristics of shallow turbid water near the shoreline on inter-tidal flat. *Korean Journal of Remote Sensing*. 17: 131-139.