

# Desarrollo de una metodología para la caracterización de praderas de fanerógamas marinas en el litoral andaluz mediante técnicas de teledetección con sensores hiperespectrales

E. Méndez<sup>1</sup>, A. Cabello<sup>1</sup>, J. E. Frieyro<sup>1</sup>, A. Hayas<sup>1</sup>, L. Granado<sup>1</sup>,  
G. Montoya<sup>1</sup>, I. Pino<sup>1</sup> y J. A. Domínguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agencia de Medio Ambiente y Agua. Junta de Andalucía. Dpto. de Comunicación y Sistemas de Información y Unidad de I+D+i, C/ Johan Gutenberg, 1, 41092 Sevilla

<sup>2</sup> Centro de Estudios Hidrográficos (CEH-CEDEX). Paseo Bajo Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid

---

## Resumen

La teledetección se considera una técnica no invasiva para la delimitación y caracterización de las fanerógamas marinas. La evaluación del empleo de imágenes y su análisis es el inicio de una nueva línea de investigación que permitirá conocer los procedimientos más adecuados para realizar el seguimiento del ecosistema marino del litoral mediterráneo andaluz.

La caracterización biofísica y ambiental de la zona de estudio, el Parque Natural Marítimo Terrestre de Cabo de Gata-Níjar, se realizó durante diferentes campañas de campo entre 2007 y 2009, en las cuales se midieron las propiedades aparentes del agua (reflectancia y atenuación difusa), la respuesta espectral de los diferentes tipos de fanerógamas marinas (*Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*) y los tipos de sustrato. A partir de estos datos se seleccionaron los sensores más adecuados para el estudio, tanto en plataforma aérea como espacial, considerando sus resoluciones espectral y espacial (sensores CASI y CHRIS-Proba).

Como resultado de esta investigación se obtuvo una cartografía de los fondos marinos de la zona de estudio y una metodología detallada para su elaboración, ampliable al contexto mediterráneo costero.

**Palabras clave:** hiperespectral, irradiancia, modelos de transferencia radiativa, fanerógamas marinas, reflectancia del fondo, cartografía, árbol de decisión.

## Abstract

### Development of a methodology for the characterization of seagrass on the andalusian coast using remote sensing techniques with hyperspectral sensors

Remote sensing is considered a non-invasive technique to identify and characterize seagrass. The evaluation of the use of images and their analysis is the beginning of a new line of research to know the best way for mapping the marine ecosystem of the Mediterranean coast of Andalusia.

The biophysical and environmental characterization of the studied area, the Maritime Terrestrial Natural Park of Cabo de Gata-Níjar was conducted during different field campaigns between 2007 and 2009, with the objective of measuring the apparent water properties (reflection and diffuse attenuation), the spectral response of the different types of seagrass (*Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa*) and bottom substrate types. From these data, we selected the most appropriate airborne and spaceborne sensors for the study and its spectral and spatial resolution (CASI and CHRIS-Proba sensors).

As a result of this research, maps of the seabed were obtained in the study area as well as a detailed methodology for the characterization of seagrass, extendable to the Mediterranean coast.

---

\* Autor para la correspondencia: emendez@agenciamedioambienteyagua.es

Recibido: 18-08-11; Aceptado: 17-11-11.

**Key words:** hyperspectral, irradiance, radiative transfer models, seagrass, bottom reflectance, mapping, decision tree.

## Introducción

Las fanerógamas marinas son plantas subacuáticas que no pueden considerarse algas sino plantas evolucionadas de origen terrestre. Las praderas que forman constituyen uno de los más extensos ecosistemas litorales en Andalucía y especialmente en Cabo de Gata. Desempeñan un importante papel ecológico en el litoral Mediterráneo debido principalmente a: (i) su función como sumideros de carbono y zonas productoras de oxígeno, (ii) tienen un importante papel en la protección de playas en época de temporales y, (iii) configuran un importante ecosistema marino. Sin embargo, estas praderas están en regresión, en gran medida por el incremento de la presión antrópica sobre el litoral, lo que comporta una pérdida de biodiversidad y un deterioro generalizado de la calidad del agua. Además, las praderas de fanerógamas marinas son un buen indicador del estado ecológico, como recoge la Directiva Marco del Agua (2000/60/EC).

La utilización de sensores pasivos para estudiar el fondo acuático marino del litoral mediterráneo andaluz requiere tener en cuenta no sólo las ventanas espectrales, sino también el comportamiento de la energía electromagnética en el agua. El modelo de transferencia radiativa más generalizado que explica el comportamiento de la energía electromagnética dentro del agua es el de Maritorena (Maritorena *et al.*, 1994), fundamentado en el control de los valores de reflectancia en aguas someras en función de la profundidad, la respuesta del fondo a una determinada profundidad y el albedo (Ecuación 1).

$$R(0^-, \lambda) = R_{\infty}(0^-, \lambda) + [(R_b(0^-, \lambda) - R_{\infty}(0^-, \lambda)) \exp[-2K_d(\lambda)Z]] \quad [1]$$

donde,  $R_b$  es la reflectancia del fondo (bottom),  $R_{\infty}$  es la reflectancia de la columna de agua medida sobre un océano de profundidad «infinita»,  $K_d$  es el coeficiente de atenuación difusa,  $Z$  es la profundidad y  $R$  es la reflectancia de la superficie del agua.

La relación entre la reflectancia justamente fuera,  $R(0^+)$ , y dentro,  $R(0^-)$ , del agua se considera constante (Austin, 1980; Kirk, 1994; Kutser *et al.*, 2006):

$$R(0^+) / R(0^-) = 0.544 \quad [2]$$

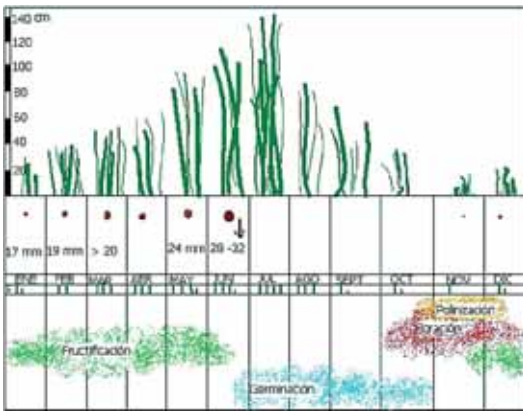
El conocimiento del comportamiento espectral de la energía electromagnética en el agua mediterránea y su interacción con el fondo marino permitirá conseguir el objetivo del presente estudio: la caracterización y delimitación de las praderas de fanerógamas marinas en el litoral mediterráneo andaluz en la zona piloto del ámbito del Parque Natural Marítimo Terrestre de Cabo de Gata-Níjar, así como la discriminación de diferentes especies dentro de la pradera mediante sensores de diferentes resoluciones espacial, espectral y temporal. La metodología desarrollada permite elaborar cartografías detalladas y precisas de forma semiautomática.

## Material y método

La metodología de esta investigación contiene cinco etapas bien diferenciadas (Dominguez *et al.*, 2009): planificación, campaña de campo, adquisición de las imágenes, tratamiento y análisis de los datos, y generación y valoración de cartografía temática.

## Área de estudio

El Parque Natural Marítimo Terrestre de Cabo de Gata-Níjar, situado en la provincia de Almería en el sureste peninsular español, presenta características idóneas para seleccionar este paraje como zona piloto, considerando además que en sus fondos marinos se encuentran las praderas más occidentales de *Posidonia oceanica* del Mediterráneo, que colonizan los fondos arenosos o detríticos o incluso substratos rocosos, especialmente en zonas someras y en zonas abiertas sometidas a un hidrodinamismo



**Figura 1.** Representación esquemática de la fenología reproductiva de *Posidonia oceanica*. Se representa con (↓) el desprendimiento de la semilla al sustrato y (s) señala la superficie por haz en cm<sup>2</sup>/haz. Cada barra tiene un valor de 100. (Sánchez Lizaso, 1993).

intenso. Las praderas más extensas se localizan en la costa norte y central, entre Agua Amarga y San José, siendo más escasas y reducidas en el resto, extendiéndose hasta los -30 m. Junto a ellas pueden encontrarse algas rojas filamentosas o laminares que se adhieren a los rizomas de la *Posidonia oceanica*, las cuales están adaptadas a la escasa iluminación existente bajo la densa cobertura de las hojas de *Posidonia*.

Otra especie de fanerógama presente en la zona es *Cymodocea nodosa*, asentada principalmente en fondos de arena fina algo fangosa desde los -2 m hasta los 10 m de profundidad, pudiéndose extender incluso hasta los -30 m. Se trata de una planta típicamente pionera y colonizadora, que puede encontrarse formando praderas mixtas con otras fanerógamas o con el alga verde *Caulerpa prolifera* (no siendo el caso en esta zona).

A la hora de plantear el estudio llevado a cabo, fue fundamental conocer el ciclo fenológico de las fanerógamas marinas, dado que esto condiciona las fechas en las que capturar las imágenes, lo que a su vez condiciona la orientación y programación de los vuelos y los trabajos de campo asociados. Las plantas de *Posidonia oceanica* poseen un característico ciclo vital con una clara diferencia estacional. Las hojas nacen y se desprenden a lo largo de todo el ciclo anual, aunque la intensidad con la que estos dos procesos se desarrollan presenta un cierto ritmo estacional (figura 1). Por su parte, la estacionalidad de la *Cymodocea nodosa*



**Figura 2.** Delimitación de la zona de estudio.

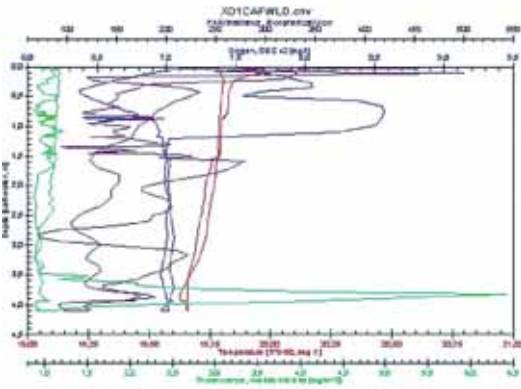
es similar a la de la *Posidonia*; presenta sus valores máximos de desarrollo en los meses de julio y agosto y una disminución en otoño hasta los valores mínimos en febrero.

El área de estudio seleccionada se localiza en el término municipal de Níjar (Almería) en el sector costero que se orienta en dirección SW-NE entre las pequeñas localidades de Las Negras y Agua Amarga.

En esta zona, la *Posidonia oceanica* se distribuye fundamentalmente formando praderas densas y homogéneas, en ocasiones asociada con rodales de *Cymodocea nodosa*, no habiéndose encontrado durante los muestreos otras especies de fanerógamas marinas ni algas verdes, cuyas características espectrales pudieran producir confusión para identificar las respectivas especies.

### Campañas de campo y adquisición de las imágenes

La ausencia de documentación espectral sobre la zona de estudio planteó la necesidad de



**Figura 3.** Perfil en profundidad de diversos parámetros (PAR/Irradiancia, oxígeno, temperatura y fluorescencia) en uno de los puntos de muestreados.

generarla, para lo que se planificaron varias campañas de campo entre 2007 y 2009 donde se desarrollaron los protocolos de adquisición de las siguientes medidas:

1. Medidas radiométricas del agua. La adquisición espectral desde fuera del agua se realizó siguiendo los protocolos oceanográficos de la NASA y desde dentro del agua mediante la inmersión de fibras ópticas con cosenos receptores para medir la irradiancia ascendente y descendente a diferentes profundidades. Las medidas se realizaron a tres profundidades: superficial (0.5 m), media ( $z/2$  m) y fondo ( $z$ -

0.5 m), donde  $z$  es la profundidad máxima en el punto de muestreo. Se utilizaron espectrorradiómetros Ocean Optics USB 4000.

2. Caracterización espectral del fondo. Se requirió del montaje de un laboratorio portátil en la cabina del barco, donde se realizaron medidas de reflectancia y transmitancia en la vegetación bentónica y medidas de reflectancia en diferentes tipos de sustrato sin vegetación, con un espectrorradiómetro ASD-FR (350-2.500 nm) y un High Intensity Contact Probe. Las muestras se obtuvieron mediante dragado.

3. Medidas de reflectancia de vegetación y suelos desnudos de zonas emergidas mediante radiómetro ASD-FR, utilizando un blanco de referencia del 99%.

4. Caracterización biofísica de la columna de agua. Utilizando una sonda multiparamétrica (CTD SBE 19PLUS) se obtuvieron los perfiles verticales de conductividad, temperatura y profundidad (figura 3) tomando muestras de forma continua (4 datos por segundo). Adicionalmente, este equipo incluía los sensores de oxígeno disuelto, pH, fluorómetro y PAR/Irradiancia. Se midió sistemáticamente la transparencia mediante disco de Secchi.

Los puntos de muestreo se eligieron en base a las variables (tabla 1): profundidad, tipo de bentos y cobertura de la pradera (estableci-

**Tabla 1.** Matriz de variables cubiertas en la selección de los puntos de muestreo

Cobertura pos. (%)	Tipo de sustrato								
	Arena				Roca				
	Profundidad (m)				Profundidad (m)				
	0-5	5-10	10-20	20-30	0-5	5-10	10-20	20-30	
Cymodocea		×	×	×	×				
		×	×	×	—	—	—	—	—
Posidonia	0-25	×	×	×	×	×	—	—	—
	25-50	—	—	×	×	—	—	—	—
	50-75		×	×	×	—	—	—	—
	75-100	×	×	×	×	×	×	—	—
	100		×	×	×	—	—	—	—
Pradera mixta	0-25	×	×	×	×	—	—	—	—
	25-50	—	×	×	—	—	—	—	—
	50-75	—	—	—	—	—	—	—	—
	75-100	—	—	×	—	—	—	—	—

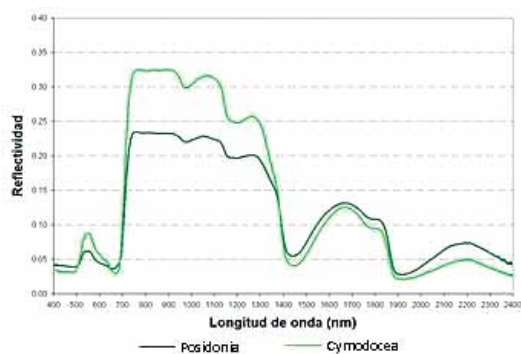


**Figura 4.** Algunos transeptos de buceo realizados divididos en función de la presencia de fanerógamas.

da mediante estimación visual). Se midieron en total 195 puntos, localizados en áreas lo suficientemente amplias de pradera, suelos, rocas, para garantizar la recogida de firmas espectrales puras y de fácil identificación en las imágenes.

Paralelamente a los trabajos de radiometría y como fuente adicional de información para la validación de resultados se realizaron observaciones del fondo marino mediante transeptos de buceo (figura 4).

La adquisición de las imágenes se planificó coincidente con las campañas de radiometría para poder disponer de datos verdad-terreno no sólo para el control de calidad de la corrección atmosférica de las imágenes, sino también para el análisis de las mismas, clasificación y posterior validación. Se utilizaron dos sensores de distintas resoluciones espectrales y espaciales (tabla 2): el sensor CHRIS (Compact



**Figura 5.** Comparación de los espectros de reflectancia de *Cymodocea nodosa* y *Posidonia oceanica*.

High Resolution Imaging Spectrometer), a bordo del satélite de demostración tecnológica PROBA de la ESA, y el sensor aerotransportado CASI 550 (Compact Airborne Spectral Imager).

## Tratamiento y análisis de los datos

Las medidas de reflectancia realizadas en el laboratorio portátil en el barco permitieron caracterizar espectralmente la *Posidonia oceanica* y la *Cymodocea nodosa* (Figura 5).

Las medidas de irradiancia a diferentes profundidades proporcionaron los valores del coeficiente de atenuación difusa descendente  $K_d$  (Jerlov, 1976; Mueller *et al.*, 2000; Mobley, 1999).

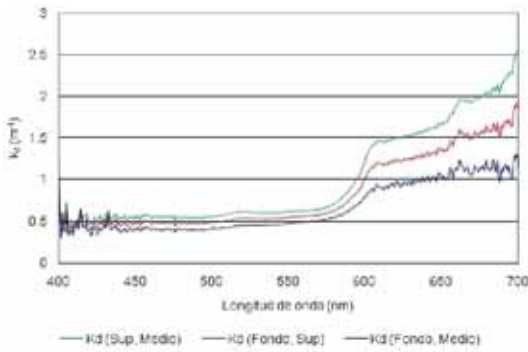
$$K_d = 1 / (z_2 - z_1) \cdot \ln(E_d(z_2) / E_d(z_1)) \quad [3]$$

donde,  $E_d$  es la irradiancia solar descendente y  $z_n$  es la profundidad a la que se toman las distintas medidas.

La imagen CHRIS se corrigió radiométricamente (Noise removal) empleando un software libre desarrollado por la ESA llamado BEAM VISAT. Posteriormente, se realizó su corrección atmosférica empleando SCAPE-C

**Tabla 2.** Características de los sensores utilizados en el estudio

Sensor	Modo	Rango espectral (Nm)	Nº bandas	Resolución espacial (M)	Fecha de adquisición
CHRIS	2-Agua	405-1035	18	17	28-jul-08
CASI	Espectral	407-957	75	4	24-jul-08
CASI	Espacial	424-828	25	2	24-jul-08



**Figura 6.** Coeficiente de atenuación difusa  $K_d$  entre 400 y 700 nm.

(Guanter *et al.*, 2006). Fue georreferenciada tomando puntos de control identificados en la imagen de los que se conocían sus coordenadas terreno en el sistema de referencia ED-50, UTM huso 30. En sucesivas correcciones fueron introduciéndose puntos en la zona de agua, con especial cuidado de no perder control sobre las deformaciones de la imagen (tabla 3).

Las imágenes CASI fueron proporcionadas georreferenciadas (tabla 3) con la calibración a radiancias y corregidas atmosféricamente con el código de transferencia radiativa 6S (Verote *et al.*, 1997). Posteriormente, se realizó un ajuste empírico que permitiera adaptar la imagen a las condiciones atmosféricas reales del día de la adquisición, tomando como referencia los datos obtenidos de la campaña de campo (figura 7).

Una vez corregidas las imágenes, se procedió a la identificación de las masas de agua y a la generación de máscaras de tierra. A las imágenes de agua de CASI se les aplicó una transformación MNF para minimizar el ruido

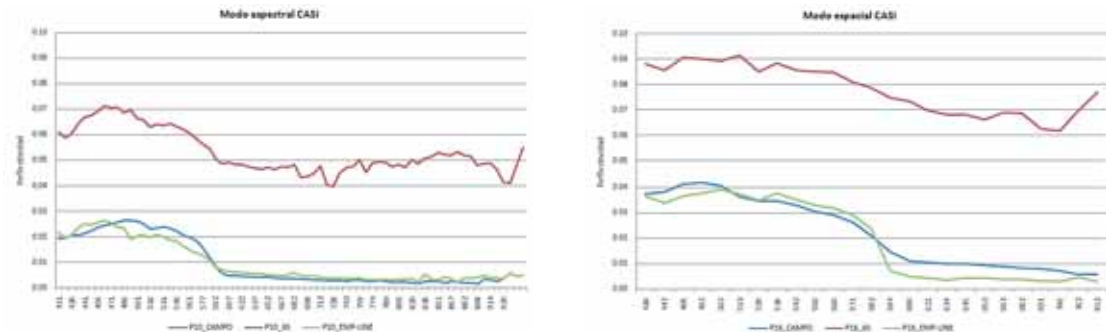
**Tabla 3.** Error medio cuadrático planimétrico obtenido en la georreferenciación de las imágenes

	RMSXY (píxel)
CASI (modo espectral)	1.12
CASI (modo espacial)	0.8
CHRIS	1.3

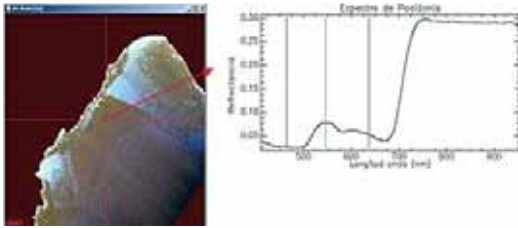
de la imagen, tomando como base el análisis de las estadísticas propias de los datos para determinar qué bandas estaban dominadas por el ruido, sin una coherencia espectral y cuáles tenían ruido nulo o bajo, a partir de las que calcular una nueva imagen mejorada.

Las imágenes del modo espacial de CASI presentaban el efecto de reflejo especular del agua conocido como «sunglint», el cual fue reducido utilizando el método de corrección presentado por Kutser (Kutser *et al.*, 2009).

Para la obtención de las imágenes de reflectancia de fondo se llevó a cabo la corrección de la columna de agua mediante la aplicación del modelo de transferencia radiativa de Maritorena (Maritorena *et al.*, 1994). Como resultado se produjo sobreestimación en la reflectancia del fondo entre el 20-26% según el tipo de cubierta. Mediante la aplicación de una derivación de la Ley de Beer o Ley de Lambert-Beer (Dierssen *et al.*, 2003) el resultado mejoró, pero sólo para profundidades inferiores a 10 m, lo que llevó a ajustar el proceso a partir de relaciones empíricas entre datos de campo e imágenes, que consiguieron mejorar los resultados y permitieron discriminar además distintos aspectos de las fanerógamas en las zonas con vegetación. Los puntos utiliza-



**Figura 7.** Espectro de campo (azul). Corrección atmosférica 6S en el mismo punto (rojo). Mejora empírica de la corrección atmosférica del modelo 6S (verde) en las imágenes CASI.

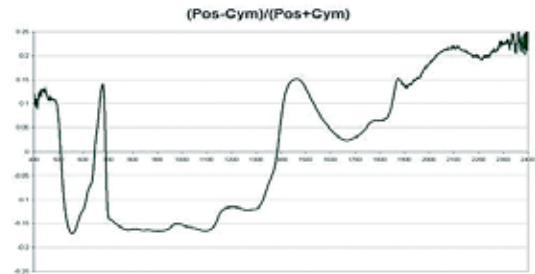


**Figura 8.** Imagen CASI y firma espectral resultante de la corrección de la columna de agua.

dos representaban los principales tipos de fondo presentes en la zona, obteniendo una ecuación lineal que relacionaba los espectros de laboratorio y de imagen para cada una de las bandas de la imagen. En la figura 8 se observa la firma espectral obtenida de una imagen de reflectancia del fondo.

El análisis de las imágenes se realizó mediante el cálculo de cocientes e índices espectrales normalizados, partiendo del estudio minucioso de las firmas espectrales de las dos especies de fanerógamas para encontrar sus máximos y mínimos, y así escoger adecuadamente las bandas a utilizar; se calculó inicialmente un cociente normalizado entre los espectros correspondientes a hojas sanas de ambas especies (figura 9) para observar a qué longitudes de onda era mayor el contraste entre ellas. Fueron los índices que relacionaban bandas del verde y azul o bandas del rojo y azul (tabla 4) los que dieron mayor información relevante.

Posteriormente, se llevaron a cabo dos tipos de clasificaciones supervisadas con las que se obtuvieron los mejores resultados en la locali-



**Figura 9.** Índice normalizado de fanerógamas. En la gráfica pueden observarse puntos de contraste, por

zación de áreas específicas de fanerógamas marinas.

Por un lado, se utilizó el clasificador «Spectral Angle Mapper» (SAM), teniendo en cuenta sólo ciertas longitudes de onda de las imágenes, en concreto aquellas en las que se encontraron diferencias significativas entre los distintos tipos de fondo basadas en el análisis anterior, y a partir de los espectros puros (endmembers) obtenidos en las campañas de campo. Los endmembers utilizados pertenecían a los sustratos *Cymodocea nodosa*, *Posidonia oceanica* y arenas de diferente granulometría recogidos en zonas suficientemente amplias para garantizar la recogida de firmas puras.

Por otro lado, el conocimiento espectral de la zona derivado del cálculo de los índices espectrales y cocientes entre bandas, permitió generar una clasificación mediante árboles de decisión (Breiman *et al.*, 1984), siendo las bandas que englobaban las longitudes de onda aproximadas a 555, 580 y 606 nm las que mayor in-

**Tabla 4.** Índices espectrales y cocientes entre bandas (band ratios) calculados y utilizados en las posteriores clasificaciones mediante árboles de decisión

	Índices IR-R	Índices IR-R	Índices IR-R	Índices IR-R	Índices IR-R	Band ratios
Vuelo Casi 2X2 M			605-491	550-491		429/491 491/502 491/512
Vuelo Casi 4X4 M		758-553	606-493	553-493	584-606	493/509 493/516 584/553 584/606
Chris-Proba	755-680					490/510

**Tabla 5.** Matriz de confusión generada para controlar la precisión en la clasificación de la imagen CHRIS a partir del clasificador SAM

		Verdad terreno (píxeles)			
		<i>Posidonia oceanica</i>	<i>Cymodocea nodosa</i>	No vegetación	Total
Píxeles imagen clasificada	<i>Posidonia oceanica</i>	36	2	4	42
	<i>Cymodocea nodosa</i>	4	6	0	10
	No vegetación	0	2	10	12
	No clasificado	0	0	0	0
	Total	40	10	14	64

formación aportaron para la discriminación de las dos especies de fanerógamas.

Tras un proceso de post clasificación, se construyeron matrices de confusión con datos verdad-terreno para evaluar el resultado obtenido mediante las diversas técnicas empleadas. Para ello, se utilizaron aquellos espectros que no habían intervenido en ningún momento en las clasificaciones, enfrentando los resultados de las clasificaciones y la verdad-terreno (tabla 5).

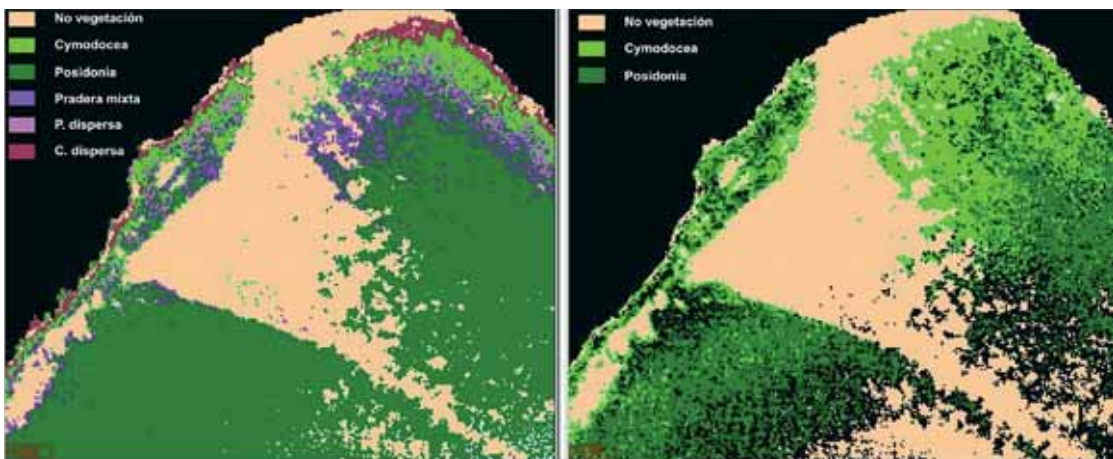
## Resultados y discusión

Un ejemplo de los resultados obtenidos de las clasificaciones puede verse en la figura 10, en la que se presenta la imagen correspondiente a una pasada del vuelo en modo espectral de CASI clasificada por los dos métodos. Aunque con ambos clasificadores se ha llegado a mayor nivel de detalle obteniendo más clases, por

ejemplo, discriminando distintos tipos de fondos sin vegetación o zonas de mezclas, éste no ha sido objetivo prioritario en el proyecto, no habiéndose realizado muestreos específicos y detallados con los que validar estos resultados.

El análisis de las matrices de confusión llevó a la conclusión de que la exactitud de las clasificaciones globales estuvo por encima del 75% en todas las imágenes clasificadas, presentando un coeficiente Kappa superior a 0,65 (tabla 6).

La validación de los resultados mediante estas matrices y las observaciones directas realizadas en campo, junto con los datos obtenidos de los trabajos de buceo y las grabaciones de video puntuales realizadas, ha llevado a la conclusión de que ambos clasificadores son válidos para cartografiar las praderas de fanerógamas marinas en el área estudiada con los sensores utilizados, si bien en algunas zonas es posible que se haya producido sobreestimación del clasificador al asignar valores de *Cymodo-*

**Figura 10.** Porción de imagen correspondiente al modo espectral de CASI clasificada mediante árbol de decisión (derecha) y mediante SAM (izquierda).



**Tabla 6.** Resultados obtenidos en las clasificaciones finales derivados de las matrices de confusión para los tres tipos de imágenes utilizadas

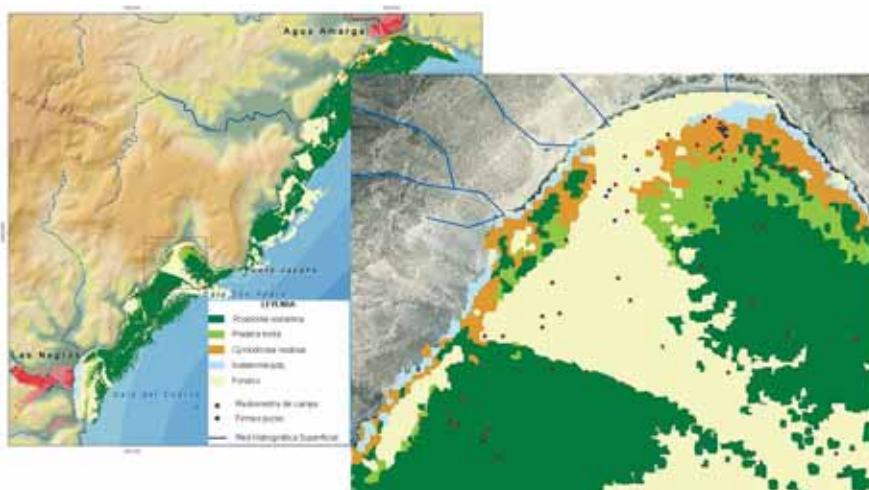
	Chis Proba modo agua (17×17 m)	CASI modo espacial (2×2 m)	CASI modo espectral (4×4 m)
Kappa	0.64	0.69	0.67
Precisión total (%)	81.25	80.15	77.77

*cea nodosa*. Esto es debido en gran parte a que esta fanerógama presenta una estructura de césped más o menos disperso que deja ver el fondo, el clasificador debe estimar un umbral a partir del cual el espectro del píxel a clasificar es considerado fondo, o en cambio, es considerado *Cymodocea* porque mantenga algún rasgo más o menos intenso en las bandas más características de ésta. Los espectros de *Cymodocea* presentan siempre rasgos del fondo (arenas o rocas), por lo que ha sido necesario tratarlos con sumo cuidado para minimizar errores en la clasificación. Hay que añadir que a lo largo de toda la zona existe un pasillo de transición entre tierra y mar clasificado como «Indeterminado», debido a que se trata de una zona intermareal con un escaso rango de mareas, formada por una mezcla de rocas, cantos, arena, grava y vegetación de difícil acceso, especialmente en la costa acantilada, que ocupa la mayor parte de nuestra zona de estudio. La proximidad del acantilado ha influido alterando los valores normales del fondo.

Teniendo en cuenta lo anterior y valorando las dificultades encontradas durante la fase de corrección de imágenes y análisis de los datos, se puede decir que los resultados más fiables se han obtenido de la clasificación del vuelo en modo espectral de CASI. No obstante, la mejor resolución del vuelo CASI en modo espacial, independientemente de los resultados de la clasificación, hace que se aprecie mejor la estructura interna de la pradera, pudiendo utilizarse no tanto para la caracterización de la pradera sino para su evolución. Por otro lado, los resultados obtenidos con la imagen CHRIS pueden tener interés cuando se trate de hacer un seguimiento de las praderas a nivel global y como punto de partida para estudios posteriores.

En resumen, la metodología presentada ha permitido obtener una cartografía a diferentes escalas del fondo marino del litoral mediterráneo andaluz, no conseguida por técnicas convencionales.

En la figura 11 puede observarse una de las cartografías obtenidas, en la que se aprecia la



**Figura 11.** Cartografía derivada de la imagen CASI (resolución: 4 m). La imagen ampliada corresponde a la Cala de San Pedro, la zona de mayor diversidad encontrada en el área estudiada.

delimitación e identificación de las dos especies presentes, diferenciándose claramente del suelo desnudo que configura el fondo, siendo esto posible en los dos tipos de imágenes utilizadas, tanto CASI, a dos resoluciones diferentes, como CHRIS. Además se ha caracterizado espectralmente el fondo marino de la zona de estudio, con lo que se ha generado una librería espectral específica.

La comparación entre imágenes de alta resolución espacial del sensor CASI con la media resolución del sensor CHRIS, así como la posibilidad de analizar la multiangularidad de este sensor, presenta una extensa gama de posibilidades de estudio mediante teledetección.

La teledetección aerotransportada y espacial se presenta pues como alternativa no invasiva para la elaboración de cartografías de fanerógamas y sustratos marinos en aguas claras y a diferentes escalas.

## Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que en mayor o menor medida han colaborado en el proyecto y en buena medida lo han hecho posible: Alicia Palacios Orueta, Antonio Campos Ramirez, Beatriz Cuesta Barco, David Ciudad Delgado, Diego Moreno Lampreave, Emilio García Adiego, Francisco Fernández Baños, Imanol Echave Calvo, Jesús Rodríguez Santaella, Juan de Dios Rico Ferrer, Juan Navarro Casas, Luis Manuel Canedo Huescar, Luis Guanter Palomar, Manuel Juan Cazorla, María Isabel García Olid, Mónica Santos Lleó, Peter Fletcher, Raquel Madero Fernández, Sonia Sánchez Palomares. Y a la ESA por los datos cedidos del sensor CHRIS-Proba.

## Referencias

- AUSTIN, R. W. 1980. Gulf of Mexico, Ocean-Color Surface-Truth Measurements. *Layer Meteorology*, 1980, Published in Boundary, Vol. 18, 269-285.
- BREIMAN, L., FREIDMAN, J. H., OLSHEN, R. A. & STONE, C. J. 1984. *Classification and Regression Trees*, Belmont, California, Wadsworth International Group, 358 pages.
- DIERSSEN, H. M., ZIMMERMAN, R. C., LEATHERS, R. A., VALERIE DOWNES, T. & DAVIS, C. O. 2003. Ocean color remote sensing of seagrass and bathymetry in the Bahamas Banks by high-resolution airborne imagery. *Limnology and oceanography*, 2003, Vol. 48, no.1, part 2, 444-455.
- DOMINGUEZ GÓMEZ, J. A., CHUVIECO SALINERO, E. & SASTRE MERLÍN, A. 2009. Monitoring transparency in inland water bodies using multispectral images, *International Journal of Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, no. 6, 1669-1586.
- GREEN, A. A., BERMAN, M., SWITZER, P. & CRAIG, M. D. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, Vol. 26, no. 1, 65-74.
- GREEN, E. P., MUMBY, P. J., EDWARDS, A. J. & CLARK, C. D. 2000. Remote sensing handbook for tropical coastal management. *Coastal Management Sourcebook 3*, Unesco Publishing, 316 pages.
- GUANTER, L., ALONSO, L., GOMEZ-CHOVA, L. & MORENO, J. 2006. Coupled Approach for Spectral/Radiometric Calibration and Surface Reflectance Retrieval from CHRIS/PROBA Data. *4th ESA CHRIS/PROBA Workshop*, 2006, ESA/ESRIN.
- JERLOV, N. G. 1976. *Marine Optics*, Amsterdam, Elsevier, 231 pages.
- KIRK, J. T. O. 1984. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnology and Oceanography*, 1984, Vol. 29, no. 2, 350-356.
- KUTSER, T., VAHTMÄE, E. & MARTIN, G. 2006. Assessing suitability of multispectral satellites for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters by means of model simulations. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2006, Vol. 67, no. 3, 521-529.
- KUTSER, T., VAHTMÄE, E. & PRAKS, J. 2009. A sun glint correction method for hyperspectral imagery containing areas with non-negligible water leaving NIR signal. *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol.113, 2267-2274.
- LYZENGA, D. R. 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 1981, Vol.2, 71-82.
- MARITORENA, S., MOREL, A. & GENTILI, B. 1994. Diffuse Reflectance of Oceanic Shallow Waters: Influence of water depth and bottom albedo. *Limnology and Oceanography*, 1994, Vol.39, no. 7, 1689-1703.
- MOBLEY, C. D. 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 1999, Vol.38, no. 36, 7442-7455.

- MUELLER, J. L., DAVIS, C., ARNONE, R., FROUIN, R., CARDER, K., LEE, Z. P., STEWARD, R. G., HOOKER, S., MOBLEY, C. D., & McLEAN, S. 2000. Above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols, Chapter 10. *NASA/TM-2000-209966 Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, revision 2*, 2000, NASA-GSFSC, Giulietta S. Fargion and James L. Mueller.
- SÁNCHEZ LIZASO, J. L. 1993. *Estudio de la pradera de Posidonia oceánica (L.) Delile en la Reserva Marina de Tabarca (Alicante): Fenología y producción primaria*. Tesis doctoral.
- VERMOTE, E. F., TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M. & MONCRETTE, J. J 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol.35, no. 3, 675-686.