

Tesis doctoral

Assessment of passive optical remote sensing for mapping macroalgae communities on the galician coast

Autor: Gema Casal Pascual (gcasal@udc.es)

Director: Juan Freire

Lugar: Grupo de Recursos Marinos y Pesquerías, Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña

Fecha: Octubre de 2012

Calificación: Apto *Cum Laude*

Resumen

Las zonas costeras representan la transición entre el ambiente terrestre y el acuático siendo uno de los ecosistemas más dinámicos y productivos de la Tierra. Las comunidades de algas bentónicas juegan un papel clave en los ecosistemas costeros debido a sus funciones ecológicas. Debido a su importancia ecológica y económica, son necesarios métodos que permitan reunir información cualitativa y cuantitativa sobre estas comunidades para su eficiente valoración, seguimiento y gestión.

La teledetección se ha aplicado en muchas partes del mundo para el cartografiado de las comunidades de algas en una gran variedad de condiciones ambientales. Existen estudios que para tal fin utilizan una gran variedad de sensores multispectrales e hiperespectrales así como modelos bio-ópticos. En España el uso de técnicas de teledetección en la zona terrestre está bien reconocido, sin embargo el número de estudios aplicados a la zona costera y especialmente al cartografiado de hábitats bentónicos someros decrece considerablemente. Por esta razón las referencias científicas relacionadas con estas aplicaciones son escasas. Entre ellas podemos mencionar los estudios realizados por Fornes *et al.* (2006) quienes cartografiaron *Posidonia oceanica* utilizando el sensor multispectral IKONOS, Méndez *et al.*

(2011) que cartografiaron *P. oceanica* y *Cymodocea nodosa* utilizando los sensores hiperespectrales CASI y CHRIS o el estudio llevado a cabo por Chust *et al.* (2010) utilizando LIDAR para el cartografiado de hábitats costeros en un estuario Vasco.

En Galicia la escasez de estudios relacionados con el cartografiado bentónico utilizando teledetección es más acusado que a nivel nacional. Algunos de los estudios realizados en la zona costera están relacionados con el seguimiento de mareas rojas (e.g. Mosquera *et al.*, 2006), vertidos (e.g. Torres-Palenzuela *et al.* 2006) o fenómenos de afloramiento (e.g. Spyarakos *et al.*, 2011) a escala regional. Sin embargo, la única referencia encontrada en relación al cartografiado bentónico fue el estudio llevado a cabo por Catoira *et al.* en 1993. Estos autores realizaron un trabajo preliminar utilizando imágenes multispectrales Landsat 5TM sin obtener resultados significantes. Por esta razón, el trabajo realizado en esta tesis abre una nueva línea de investigación en la costa gallega en relación a la utilización de este tipo de técnicas aplicadas al cartografiado bentónico.

Durante la realización de esta tesis se valoraron sensores de teledetección pasivos multispectrales (SPOT-4), hiperespectrales espaciales (CHRIS-Proba) y aeroportados (AHS y CASI-2) para el estudio de comunidades de al-

gas. Además, los resultados obtenidos contribuyen a la generación de datos espaciales referentes a las algas presentes en el litoral gallego.

El satélite multiespectral SPOT-4 mostró resultados positivos en la detección de la presencia de comunidades de algas pardas hasta 10 m de profundidad. Sin embargo, la relativamente baja resolución espacial y espectral no permitió diferenciar grupos de algas (verdes, pardas y rojas) entre sí. Este satélite presenta cuatro bandas espectrales y sólo las dos primeras XS1 (500-590 nm) y XS2 (610-680 nm) son útiles en la detección de sustratos sumergidos debido a la absorción de longitudes de onda infrarrojas por la columna de agua. Por otra parte, su resolución espacial permite solamente detectar asentamientos homogéneos de algas mayores a su tamaño de píxel (20 m). Por estas razones, este satélite ha sido utilizado con éxito para el cartografiado de asentamientos homogéneos de algas de gran tamaño (e.g. Augenstein *et al.*, 1991; Chauvaud *et al.*, 2001; Pascualini *et al.*, 2005 o Torrusio, 2009). En la costa gallega, existen algunas especies de algas pardas que pueden formar grandes asentamientos homogéneos tales como *Laminaria* spp., *Cystoseira baccata* o *Sargassum muticum* y detectables por el satélite SPOT-4. A pesar de su baja resolución espectral y media resolución espacial, cada imagen puede cubrir 60x60 km. Por esta razón, este sensor puede ser utilizado en estudios a escalas regionales.

Por otra parte, el sensor hiperespectral CHRIS-Proba presenta 18 bandas espectrales que comprenden un rango espectral entre 411 y 1019 nm, 17 m de tamaño de píxel y un *swath* de 13 × 13 km. Sus características espectrales mejoran la capacidad de diferenciación entre grupos de algas en comparación con las obtenidas por el satélite SPOT-4. Sin embargo, durante el desarrollo de este trabajo se observó que después de la corrección atmosférica algunas de las bandas presentaron valores anómalos y éstas no fueron incluidas en el análisis. La dificultad de procesar los datos CHRIS a nivel 2 ha sido mencionado por otros autores tales como Alonso *et al.* (2009) debido probablemente a su naturaleza experimental. Comparando la configuración espectral de CHRIS modo 2 y MERIS se observa que el sensor

CHRIS tiene 14 bandas espectrales entre 400 y 750 nm mientras que MERIS solamente presenta 9 bandas. Estudios previos utilizando MERIS demostraron el éxito de este sensor en la diferenciación de algas verdes, pardas y rojas (Kutser *et al.*, 2006a). Una mejor resolución espectral y espacial hace esperar que el sensor CHRIS sea más apropiado que MERIS en el cartografiado de las comunidades algales. Sin embargo, en este estudio los valores anómalos en algunas bandas de CHRIS no permitieron el máximo aprovechamiento de sus capacidades espectrales. Esta asunción es también confirmada en el estudio realizado por Pauly *et al.* (2011) quienes cartografiaron algas verdes, pardas y rojas en regiones intermareales y de aguas poco profundas.

CHRIS Proba presenta capacidad para la toma de imágenes multiangulares que ha sido utilizada de forma exitosa en estudios terrestres (Begiebing y Bach, 2004; Sykioti *et al.*, 2011) y es especialmente efectivo en terrenos con diferente pendiente. Las imágenes multiangulares fueron también utilizadas para estudios de calidad de agua (Van Mol y Ruddik, 2004; Ruíz-Verdú *et al.*, 2005) donde se estudiaron parámetros de la superficie del agua. Sin embargo, la capacidad multiangular de CHRIS-Proba no es una ventaja en el caso del cartografiado bentónico. Con ángulos diferentes al nadir, la luz tiene que viajar más distancia en la columna de agua. Diferentes estudios (Vahtmäe *et al.* 2006; Kutser *et al.* 2006b) muestran que pequeñas variaciones de profundidad (la distancia que la luz tiene que viajar hacia y desde el sustrato) tienen un impacto importante sobre la posibilidad de reconocer los diferentes tipos de fondo. Además los ángulos, diferentes del nadir, pueden incrementar la cantidad de *sun glint* y *sky glint*. Pauly *et al.* (2011) y Méndez *et al.* (2011), las únicas referencias encontradas en relación al cartografiado de fondos costeros utilizando el sensor CHRIS, también excluyeron estas imágenes angulares de sus estudios. Por lo tanto, el sensor CHRIS-Proba presenta una ventaja en la diferenciación de los grupos macroalgales respecto a sensores multiespectrales como el HRVIR de SPOT-4. Sin embargo, la cobertura de cada imagen es mucho menor implicando una limitación en el cartografiado a escalas regionales. No obstante, los análisis rea-

lizados en esta tesis muestran que la resolución espacial de CHRIS no es suficiente para cartografiar en detalle los diferentes grupos de algas (verdes, pardas y rojas) en la costa gallega, debido a que la cobertura bentónica en esta zona es bastante heterogénea.

La valoración de sensores hiperespectrales para el cartografiado de comunidades algas bentónicas fue realizada utilizando métodos basados en imágenes así como métodos físicos. Los resultados obtenidos muestran que el sensor AHS es capaz de separar los tres tipos de grupos de algas cuando están emergidos. Sin embargo, cuando las algas se encuentran sumergidas la diferenciación entre algas pardas y rojas no es posible. Utilizando el modelo bioóptico desarrollado por Maritorena *et al.* (1994) para valorar las imágenes CASI-2, se observaron mejores resultados que los obtenidos para el sensor AHS. Utilizando este sensor se pudieron separar los tres grupos de algas hasta una profundidad de 4 m. Esto puede explicarse debido a la posición de las diferentes bandas espectrales en ambos sensores así como al ruido presente en las imágenes AHS. Como fue mencionado por Mumby *et al.* (1997) los sensores aeroportados presentan mayor resolución espacial y espectral que los sensores satelitales, proporcionando una mayor información espectral sobre objetivos puros, y así mayor precisión en el cartografiado detallado de hábitats. La resolución espacial del sensor AHS y CASI-2 es de alrededor de 2 m y el *swath* (varios metros) es también mucho menor que el presente en satélites. Estas características permiten el cartografiado detallado de hábitats bentónicos poco profundos a escalas locales.

Después del trabajo realizado en esta tesis, si tuviéramos que recomendar un sensor para el estudio de las comunidades de algas en la costa gallega, podríamos decir que la mejor elección dependerá de los objetivos específicos de cada estudio. En esta tesis se demostró que satélites multiespectrales como SPOT-4 o incluso sensores hiperespectrales espaciales como CHRIS-Proba pueden ser útiles en el cartografiado de comunidades de macroalgas a una escala regional sin demasiado detalle. Los sensores multiespectrales podrían ser de utilidad en la realización de estudios retrospectivos así como en la monitorización de estas co-

munidades en el futuro debido a la elevada cantidad de datos de archivo y su periodo de revista. Por otra parte, para estudios más detallados se necesita una mayor resolución espacial y espectral. En el caso de la costa gallega la resolución espacial es considerada prioritaria al igual que afirmaron Vahtmäe y Kutser (2007). Además, todas estas valoraciones deberían ser realizadas teniendo en cuenta el presupuesto disponible. Algunas iniciativas como por ejemplo *Third-Party Missions* o el Programa *EU-FAR* permiten a la comunidad científica el acceso a imágenes remotas de forma gratuita o a coste de reproducción. En otros casos, la adquisición de este tipo de información puede resultar prohibitiva especialmente en imágenes de elevada resolución.

A pesar del elevado potencial de las técnicas de teledetección y su combinación con Sistemas de Información Geográfica (SIG) debería de tenerse en cuenta que los mapas resultantes son una imagen instantánea en el tiempo y la fiabilidad de su representación en cualquier momento posterior dependerá del grado de variabilidad natural presente en el área representada en el mapa (MESH, 2008). Para investigar y gestionar eficientemente los hábitats bentónicos es necesario una continua actualización de los datos. Por esta razón, la interoperabilidad y la promoción de colaboración así como el compartir información entre usuarios serían una buena opción en el estudio de hábitats bentónicos poco profundos. En los últimos años esta tendencia está ganando importancia y nuevas iniciativas *Free-Libre Open Source Software* están apareciendo debido a que garantizan la interoperabilidad a largo plazo de manera sostenible. Algunos ejemplos que podrían ser mencionados aquí serían *MapServer* que es una plataforma *Open Source* para la publicación de datos espaciales y aplicaciones de cartografiado interactivo en la web. Proyectos importantes como *MESH (Mapping European Seabeds Habitats)* han apostado por esta plataforma para publicar sus datos. Haciendo un esfuerzo adicional por compartir los datos en internet se expandirían de forma importante los recursos disponibles para los usuarios finales ayudando así a una mejor gestión de las actividades humanas y promoviendo un desarrollo sostenible.

Además, durante los últimos años se han lanzado nuevos satélites tales como WorldView-2, Formosat-2 o Rapid-eye que mejoran las características técnicas de los ya operativos. Este desarrollo tecnológico parece continuar en el futuro debido a que se espera el lanzamiento de nuevos satélites. Por esta razón, las posibilidades que podrá ofrecer el cartografiado de hábitats bentónicos poco profundos y su nivel de detalle, a día de hoy, es impredecible.

Referencias

- ALONSO, L., GÓMEZ-CHOVA, L., MORENO, J., GUANTER, L., BROCKMANN, C., FOMFERRA, N., QUAST, R., & REGNER, P. 2009. CHRIS/PROBA Toolbox for hyperspectral and multiangular data exploitations. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, IGARSS 2009.
- AUGENSTEIN, E. W., STOW, D.A., & HOPE, A. S. 1991. Evaluation of SPOT HRV-XS data for kelp resource inventories. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 57:501-509.
- BEGIEBING, S., & BACH, H. 2004. Analyses of hyperspectral and directional CHRIS data for agricultural monitoring using a canopy reflectance. Proc. of the 2nd CHRIS-Proba Workshop, Frascati, Italy.
- CATOIRA, J. L., SOLÓRZANO, F., SERRANO, F., CARRASCAL, J. L., VELEIRO, M. J., LÓPEZ, E., DE URRUTIA, J. M., ACUÑA, R., DURÁN, C., ALCALDE, A., FERNÁNDEZ, M., FRANCESCH, O., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, P., FERNÁNDEZ, P., & PÉREZ, J. L. 1993. Prospección, análisis y cartografía de microalgas y erizo de mar en el litoral de Galicia. Consellería de Pesca. Dirección Xeral de Pesca, Marisqueo e Acuicultura.
- CHAUVAUD, S., BOUCHON, C., & MANIÈRE, R. 2001. Cartographie des biocénoses marines de Guadeloupe á partir de données SPOT (récifs coralliens, phanérogames marines, mangroves). *Oceanologica Acta*, 24(1): 3-16.
- CHUST, G., GRANDE, M., GALPARSORO, I., URIARTE, A., & BORJA, A. 2010. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89: 200-213.
- FORNES, A., BASTERRETXEA, G., ORFILA, A., JORDI, A., ÁLVAREZ, A., & TINTORE, J. 2006. Mapping *Posidonia oceanica* from IKONOS. *ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 315-322.
- KUTSER, T., MILLER, I., & JUPP, D. L. B. 2006b. Mapping coral reef benthic substrates using hyperspectral space-borne images and spectral libraries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70: 449-460.
- KUTSER, T., VAHTMÄE, E., & MARTIN, G. 2006a. Assessing suitability of multispectral satellites for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters by means of model simulations. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 67: 521-529.
- MARITORENA, S., MOREL, A., & GENTIL, B. 1994. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters. Influence of water depth and bottom albedo. *Limnology and Oceanography*, 39(7):1689-1703.
- MÉNDEZ, E., CABELLO, A., FRIEYRO, J. E., HAYAS, A., GRANADO, L., MONTOYA, G., PINO, I., & DOMÍNGUEZ, J. A. 2011. Desarrollo de una metodología para la caracterización de praderas de fanerógamas marinas en el litoral andaluz mediante técnicas de teledetección con sensores hiperespectrales. *Revista de Teledetección*, 36: 73-83.
- MESH (Mapping European Seabed Habitats). 2008. The MESH Blue Book. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, UK.
- MOSQUERA, A., TORRES, J. M., GONZÁLEZ-VILAS, L., MARTÍNEZ-IGLESIAS, G., & PAZOS, Y. 2006. Estudio de una floración tóxica de *Pseudonitzschia ssp.* en las costas de Galicia usando una imagen MERIS y datos in situ. *Revista de Teledetección*, Número Especial: 75-79.
- MUMBY, P. J., GREEN, E. P., EDWARDS, A. J., & CLARK, C. D. 1997. Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide? *Marine Biology*, 130:193-202.
- PASQUALINI, V., PERGENT-MARTINI, C., PERGENT, G., AGREIL, M., SKOUFAS, G., SOURBES, L., & TSIRIKA, A. 2005. Use of SPOT-5 for mapping seagrasses: an application to *Posidonia oceanica*. *Remote Sensing of Environment*, 94 (1): 39-45.
- PAULY, K., GOOSSENS, R., & DE CLERCK, O. 2011. Mapping coral-algal dynamics in a seasonal upwelling area using spaceborne high resolution sensors, in: Pauly, K. (2011). GIS-based environmental analysis, remote sensing and niche modeling of seaweed communities. pp. 149-168.
- RUIZ-VERDÚ, A., DOMÍNGUEZ-GÓMEZ, J. A., & PEÑA-MARTÍNEZ, R. 2005. User of CHRIS for monitoring water quality in Rosarito reservoir. Proc. Of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21-23 March, ESRIN, Frascati, Italy, (ESA SP-593, June 2005).
- SPYRAKOS, E., GONZÁLEZ-VILAS, L., TORRES-PALENZUELA, J. M., & DESMOND-BARTON, E. 2011. Remote sensing chlorophyll a of optically complex waters (Rías Baixas, NW

- Spain): Application of a regionally specific chlorophyll a algorithm for MERIS full resolution data during an upwelling cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115 (10): 2471-2485.
- SYKIOTI, O., PARONIS, D., STAGAKIS, S., & KYPARISSIS, A. 2011. Band depth analysis of CHRIS/PROBA data for the study of a Mediterranean natural ecosystem. Correlations with leaf optical properties and ecophysiological parameters. *Remote Sensing of Environment*, 115: 752-766.
- TORRES-PALENZUELA, J. M., VILAS, L. G., & CUADRADO, M. S. 2006. Use of ASAR images to study the evolution of the Prestige oil spill off the Galician coast. *International Journal of Remote Sensing*, 27 :1931-1950.
- TORRUSIO, S. 2009. Mapping Marine Macrophytes along the Atlantic Coast of Tierra Del Fuego (Argentina) by Remote Sensing. In. Yang, X. (2009). Remote sensing and geospatial technologies for coastal ecosystem assessment and management. Ed. Xiaojun Yang. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 279-293.
- VAHTMÄE E., KUSTER T., MARTIN G., & KOTTA J. 2006. Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping macroalgal cover in turbid coastal waters- a Baltic Sea case study. *Remote Sensing of Environment*, 101: 342-351.
- VAN MOL, B., & RUDDICK, K. 2004. The Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS): the future of hyperspectral satellite sensors. Imagery of Oostende coastal and inland waters. Airborne Imaging Spectroscopy Workshop, 8 October 2004, Bruges.
- VATHMÄE, E., & KUTSER, T. 2007. Mapping bottom type and water depth in shallow coastal waters with satellite remote sensing. *Journal of Coastal Research*, 50: 185-189.

