

Extracción de propiedades ópticas en aguas costeras del Golfo de Vizcaya mediante MODIS-250m

G. Chust, Y. Sagarminaga, A. Borja y V. Valencia
gchust@pas.azti.es

AZTI - Tecnalia. Unidad de Investigación Marina
Herrera kaia portualdez z/g. 20110 Pasaia. Gipuzkoa

RESUMEN

Este estudio evalúa el uso del sensor remoto de resolución media MODIS para la estimación de propiedades ópticas de aguas costeras en el sureste del Golfo de Vizcaya. Para ello, se han utilizado datos muestreados *in situ* referentes a propiedades ópticas del agua (transmitancia, transparencia por profundidad del disco de Secchi y turbidez nefelométrica) y sólidos en suspensión a lo largo de la costa vasca, durante cinco años, juntamente con datos de reflectividad de la banda 1 (620-670 nm) de imágenes de MODIS. La transmitancia fue la propiedad óptica mejor relacionada con la señal de la banda 1 de MODIS mediante un modelo exponencial ($r = -0.66$; $p < 0.0001$), mientras que los sólidos en suspensión no presentaron correlación significativa. Este modelo fue utilizado para el mapeo de la transmitancia en aguas superficiales de la costa vasca.

PALABRAS CLAVE: MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), calidad del agua, propiedades ópticas, transmitancia, turbidez, sólidos en suspensión, costa vasca, Golfo de Vizcaya.

ABSTRACT

This study tests the use of medium-resolution MODIS satellite sensor to retrieve optical properties of coastal waters in the Southeast Bay of Biscay. Hence, *in situ* data of optical water properties (transmittance, Secchi disc depth, and nephelometric turbidity) and suspended solids collected along the Basque coast during a five-year period, together with reflectance data of band 1 (620-670 nm) of MODIS images were used. Light transmission was the best optical property predicted with the MODIS band 1 ($r = -0.66$; $p < 0.0001$), obtained from an exponential model, while suspended solids was not significantly correlated. This model was used to map water surface transmittance in the Basque coast.

KEY WORDS: MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), water quality, optical properties, transmittance, turbidity, suspended solids, Basque coast, Bay of Biscay.

INTRODUCCIÓN

Las elevadas concentraciones de material en suspensión pueden transportar consigo contaminantes (Martin y Windom, 1991) y afectar a diversos procesos en las aguas litorales tales como la productividad del fitoplancton (May *et al.*, 2003) y el crecimiento del bentos (McLaughlin *et al.*, 2003). El material en suspensión está relacionado con la transparencia del agua, el cual es un parámetro clave para la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) y para la de Calidad de las aguas para el Baño (Directiva 76/160/EEC) que establecen un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de

aguas para su protección y uso sostenible. El seguimiento del material en suspensión mediante muestreo *in situ* es altamente costoso, limitado en extensión y en resolución debido a la alta variabilidad espacial y temporal que caracteriza su dinámica (Miller *et al.*, 2003). Varios estudios ya han demostrado el potencial de la teledetección para la detección y seguimiento de plumas de turbidez (Hu *et al.* 2004; Miller y McKee, 2004). Por lo tanto, existe un potencial en el uso de las imágenes de satélite para proporcionar mapas sinópticos y evaluaciones rápidas del material en suspensión y de las propiedades ópticas relacionadas con la calidad del agua en los ecosistemas costeros.

Este estudio evalúa la estimación de propiedades ópticas del agua mediante la reflectancia de la banda 1 (620-670 nm) del sensor de resolución media MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). El objetivo final de esta contribución es generar mapas de las propiedades ópticas de las aguas costeras del sureste del Golfo de Vizcaya, que puedan ser utilizados en la determinación de la calidad ambiental en Directivas como las antes mencionadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

En muestras de aguas de superficie se determinó la concentración de sólidos en suspensión por gravimetría ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) y la turbidez mediante un turbidímetro calibrado en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). La transparencia se midió en términos de la profundidad de visión del disco de Secchi (m). Los perfiles de transmitancia se obtuvieron mediante un transmisómetro de 25 cm de camino óptico asociado a un CTD y se procesaron en términos de porcentaje de luz transmitida, o transmitancia, a 660 nm para los primeros 25 metros de profundidad. Para cada intervalo de profundidad se integraron los valores de transmitancia (T) mediante la siguiente fórmula:

$$T_{(Z=0, Z=i)} = \prod_{Z=0}^i T_Z$$

donde z es la profundidad.

Estas medidas se obtuvieron mediante muestreo en el marco del programa "Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la Comunidad Autónoma del País Vasco", en adelante Red de Calidad, (Borja *et al.*, 2004). Desde 1994, en este seguimiento se muestrean trimestralmente 51 estaciones en los estuarios y la zona litoral de la costa vasca. Con el objetivo de comparar estos datos con aquellos procedentes de las imágenes de satélite, se seleccionaron sólo 16 de las estaciones que corresponden al litoral, para el período 2000 a 2005 (Figura 1). Esto supone un total de 382 observaciones para cada una de las variables del agua. Estas estaciones se sitúan aproximadamente a 1000 metros de distancia de la costa sobre fondos de 30 metros (Figura 1). Como estudio preliminar, se calculó una matriz de correlación entre las cuatro propiedades del agua.

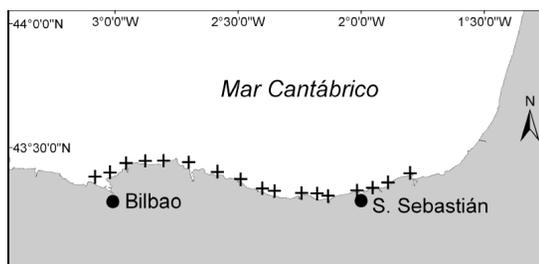


Figura 1. Situación de la zona de estudio en la costa vasca y posición de las estaciones de muestreo costeras (+) pertenecientes al Programa Red de Calidad (Borja *et al.*, 2004).

El sensor MODIS, a bordo de los satélites *Terra* y *Aqua* del sistema EOS (*Earth Observing System*), proporciona dos imágenes diarias gracias al pase de *Terra* a las 10.30 (descendente) y al pase de *Aqua* a las 13.30 (ascendente). Estos datos son distribuidos por *Land Processes Distributed Active Archive Center* (U.S. Geological Survey Center for Earth Resources Observation and Science). Se utilizaron los valores de reflectividad espectral en superficie de la banda 1 (620-670 nm, rojo) de MODIS, la cual tiene una resolución de 250 m. Este producto de nivel 2 de procesado (denominado MOD09GQK para *Terra* y MYD09GQK para *Aqua*) es una estimación de la reflectividad espectral a nivel del suelo, para cada banda, como si no hubiera dispersión ni absorción (descrito en <http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Esta estimación incluye una corrección de los efectos atmosféricos de los gases, aerosoles y nubes delgadas tipo cirros.

Se seleccionaron las imágenes de la zona de estudio correspondientes a las fechas de la Red de Calidad, es decir 59 imágenes. Posteriormente, se descartaron aquellas imágenes afectadas por nubes y brumas, quedando 14 imágenes seleccionadas. Así, se obtuvo un total de 68 pares de observaciones. La correspondencia temporal entre datos de satélite y datos *in situ* queda asegurada ya que el 80% de los pares de observaciones fueron tomados con diferencias horarias menores a 2 h 30 min. Se determinó la relación entre las propiedades del agua y el valor de la reflectividad de la banda 1 de MODIS utilizando modelos de regresión lineal y exponencial. Por último, se seleccionó el mejor modelo para generar mapas de las propiedades de las aguas costeras.

RESULTADOS Y DISCUSION

La matriz de correlación entre las propiedades del agua reveló que la transmitancia está principalmente correlacionada con la profundidad del disco de Secchi (en escala logarítmica), seguido de la turbidez nefelométrica (Tabla 1). La concentración de sólidos en suspensión no presenta correlación significativa con la transmitancia ni con la turbidez, y débilmente correlacionada con la profundidad del disco de Secchi.

	PDS (Log)	TN	SOL
T	0.663**	-0.368**	-0.085
PDS (escala Log)	--	-0.4237**	-0.117*
TN	--	--	0.096

** $p \leq 0.001$; * $0.01 < p < 0.05$

Tabla 1. Matriz de correlaciones entre las propiedades del agua. Número de observaciones = 382. T: Transmitancia; PDS: Profundidad del disco de Secchi; TN: Turbidez nefelométrica; SOL: Sólidos en suspensión total.

La reflectividad de la banda 1 de MODIS se correlacionó significativamente con las tres propiedades ópticas (Tabla 2, Figura 2), pero no presentó correlación significativa con los sólidos en suspensión. La transmitancia en superficie fue la variable que explicó la mayor parte de la variancia de la reflectividad, en particular utilizando un modelo exponencial ($r = -0.65$, $p < 0.0001$). De este modo, se analizó la transmitancia a lo largo de la columna de agua utilizando el modelo exponencial. La máxima correlación entre la transmitancia y los valores de reflectividad se obtuvo para el rango de profundidad entre 0 y 2 metros ($r = -0.66$, $p < 0.0001$, véase Figura 3). Dado que la transmitancia fue la variable mejor relacionada con la señal de reflectividad de la banda 1 de MODIS, ésta fue seleccionada para su mapeo como indicador de las propiedades ópticas del agua en la costa sureste del Golfo de Vizcaya (Figura 4) utilizando la siguiente fórmula:

$$T = 79.3e^{(-0.0017 \text{ Banda 1})}$$

Estos resultados indican que la banda 1 de MODIS permite extraer la transmitancia del agua pero resulta poco útil para predecir la concentración de sólidos en suspensión, al menos en un rango amplio de condiciones. Esta limitación está

	Banda 1 (lin.)	Banda 2 (exp.)
T ($n = 68$; Prof.: 0-1 m)	-0.637**	-0.654**
PDS ($n = 65$)	-0.522**	-0.592**
TN ($n = 63$; Prof.: 0-1 m)	0.474**	0.406**
SOL ($n = 63$; Prof.: 0-1 m)	0.016	-0.097

** $p \leq 0.001$; * $0.01 \leq p \leq 0.05$

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre las propiedades del agua y la reflectividad de la banda 1. n : número de observaciones; lin.: modelo lineal, exp: modelo exponencial; Prof.: Profundidad. T: Transmitancia; PDS: Profundidad del disco de Secchi; TN: Turbidez nefelométrica; SOL: Sólidos en suspensión total.

parcialmente en desacuerdo con el trabajo de Miller y McKee (2004). La principal diferencia reside en qué los datos de Miller y McKee (2004) provienen de seis días de muestreos realizados en tres zonas, mientras que nuestro muestreo se basó en un periodo de cinco años a lo largo de la costa vasca que incluye doce cuencas importantes. La principal razón del desacuerdo entre estos resultados se debe a que la respuesta óptica, en términos de reflectancia, *scattering* o atenuación general de la luz es propia de cada tipo de sólidos. Así, materiales gruesos presentan una escasa actividad óptica mientras que, recíprocamente, materiales finos del tipo de las arcillas o el propio fitoplancton presentan una actividad óptica mucho mayor por unidad de peso. Un factor importante que explica la variabilidad en la concentración de los sólidos lo constituyen las características físicas particulares de cada cuenca en la costa vasca (Uriarte *et al.*, 2004). En este sentido, aunque para grupos reducidos de datos, correspondientes a periodos cortos y a sistemas sometidos a una fuente homogénea de materiales en suspensión, pueden obtenerse correlaciones significativas entre la carga en suspensión y las propiedades ópticas, la significación de la correlación se va debilitando a medida que aumenta la heterogeneidad, tanto por ampliación de los periodos como por extensión de las áreas a las que se refieren los datos.

Una limitación de orden similar puede considerarse para la comparación entre valores de reflectividad debido a la corrección atmosférica aplicada en los valores de reflectancia (que no tiene en cuenta diferencias atmosféricas locales) y a las diferencias que pueden esperarse para localizaciones y situaciones climatológicas progresivamente más heterogéneas.

Extracción de propiedades ópticas en aguas costeras del Golfo de Vizcaya mediante MODIS-250m

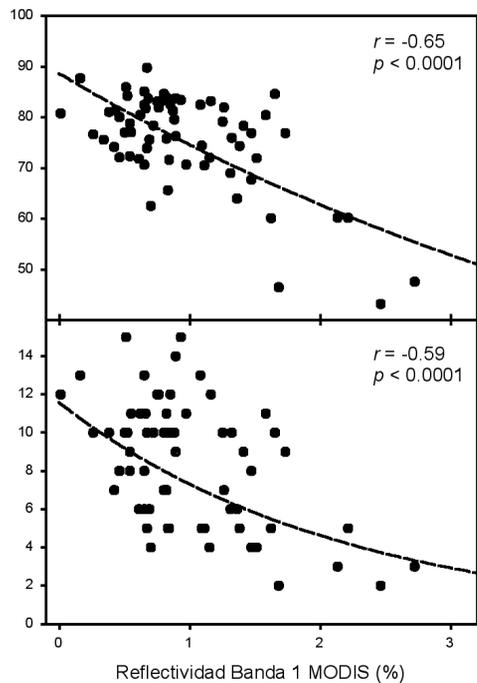


Figura 2. Relaciones exponenciales entre las propiedades ópticas del agua (transmitancia en superficie y profundidad del disco de Secchi) y la reflectividad de la banda 1 de MODIS.

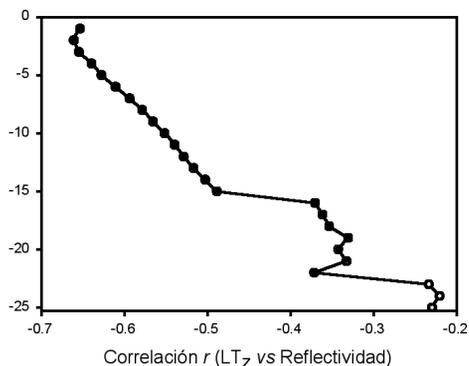


Figura 3. Correlación entre la transmitancia a diferentes intervalos de profundidad y la reflectividad de la banda 1 de MODIS (modelo exponencial) a lo largo de la columna de agua. Los círculos negros indican correlaciones significativas ($p < 0.05$), las de los blancos no son significativas.

La transparencia y la transmitancia presentan un rango y una distribución representativos de un abanico amplio de situaciones, climáticas, hidrográficas e hidrológicas en la costa vasca (Valencia y Franco, 2004). La transmitancia, que resulta ser la variable mejor correlacionada con la señal de la banda 1 de MODIS, presenta en superficie una dis-

tribución espacial y estacional que integra la respuesta a variaciones de la salinidad, concentración de clorofila y material particulado autóctono, con importante incidencia en las propiedades ópticas de las aguas superficiales (Valencia y Franco, 2004).

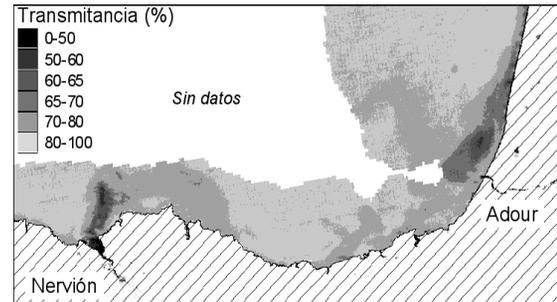


Figura 4. Mapa de la transmitancia en la costa vasca estimado mediante un modelo exponencial de regresión utilizando la banda 1 de MODIS (620-670 nm) del 19 de mayo de 2005. En esta fecha se aprecian dos plumas de turbidez principales procedentes del río Nervión y del Adour.

CONCLUSIONES

El modelo de regresión exponencial basado en la banda 1 (620-670 nm) de MODIS explicó el 43.7% de la varianza de la transmitancia. A partir de este modelo, se generó un mapa de la estimación de la transmitancia, que constituye un indicador de la transparencia del agua. A pesar de todas las limitaciones, los resultados aquí obtenidos suponen un primer paso en la determinación de las propiedades ópticas del agua, a partir de datos de satélite, que puedan servir en el futuro para dar respuesta a los requerimientos de directivas como las anteriormente mencionadas. Así, la capacidad de los datos MODIS para proporcionar mapas diarios de resolución media de la transmitancia del agua tiene el potencial de mejorar los sistemas operacionales de seguimiento de calidad ambiental en la costa vasca.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (Gobierno Vasco) por proporcionar los datos de propiedades del agua. Agradecemos también a LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center, <http://LPDAAC.usgs.gov>), por distribuir los datos

G. Chust, Y. Sagarmínaga, A. Borja y V. Valencia

MODIS. Nos hemos beneficiado de las contribuciones de Javier Franco (AZTI-Tecnalia).

BIBLIOGRAFÍA

- BORJA, A., FRANCO, J., VALENCIA, V., BALD, J., MUXIKA, I., BELZUNCE, M. J. y SOLAUN, O. 2004. Implementation of the European Water Framework Directive from the Basque Country (northern Spain): a methodological approach. *Mar. Poll. Bull.* 48: 209-218.
- HU, C., CHEN, Z., CLAYTON, T. D. SWARZENSKI, P. BROCK, J. C. y MULLER-KARGER, F. E. 2004. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Rem. Sens. Environ.* 93: 423-441.
- MARTIN, J. M. y WINDOM, H. L. 1991. Present and future roles of ocean margins in regulating marine biogeochemical cycles of trace elements. En *Ocean margin processes in global change*, R. F. C. Mantoura Ed. Report Dahlem Workshop 1990. Wiley, Berlin, pp. 45-67.
- MAY, C. L., KOSEFF, J. R., LUCAS, L. V., CLOERN, J. E. y SCHOELLHAMER, D. H. 2003. Effects of spatial and temporal variability of turbidity on phytoplankton blooms. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 254: 111-128.
- MCLAUGHLIN, C. J., SMITH, C. A., BUDDEMEIER, R. W., BARTLEY, J. D. y MAXWELL, B. A. 2003. Rivers, runoff and reefs. *Glob. Planet. Change.* 39: 191-199.
- MILLER, R. L., TWARDOWSKI, M., MOORE, C. y CASAGRANDE, C. 2003. The Dolphin: Technology to support remote sensing bio-optical algorithm development and applications. *Backscatter, Alliance for Marine Remote Sensing.* 8: 12.
- MILLER, R. L. y MCKEE, B. A. 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Rem. Sens. Environ.* 93: 259-266.
- URIARTE, A., COLLINS, M., CEARRETA, A., BALD, J. y EVANS, G. 2004. Sediment supply, transport and deposition: contemporary and Late Quaternary evolution. En *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*, A. Borja y M. Collins Eds. Elsevier Oceanography Series Amsterdam, pp. 97-131.
- VALENCIA, V. y FRANCO, J. 2004. Main characteristics of the water masses. En *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*, A. Borja y M. Collins Eds. Elsevier Oceanography Series Amsterdam, pp. 197-232.