

VALIDACIÓN DE MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CLOROFILA «A» A PARTIR DE IMÁGENES SEAWIFS EN EL ATLÁNTICO CENTRO-ORIENTAL

J. PÉREZ-MARRERO, L. MAROTO, J. GODÓY, M. VILLAGARCÍA, A. CIANCA, M. J. RUEDA y O. LLINÁS

*Instituto Canario de Ciencias Marinas. Po Box 56, Telde, 35200, Gran Canaria. Spain
Jpmarrero@iccm.rcanaria.es*

RESUMEN: Dentro del marco del proyecto Canigo se llevaron a cabo cuatro campañas oceanográficas al Norte del Archipiélago Canario cubriendo todas las épocas del año. En cada campaña se muestrearon alrededor de 60 estaciones hasta 200m de profundidad, para obtener datos de la concentración de clorofila "a", proporcionando así una caracterización precisa del contenido de biomasa fitoplanctónica y su variabilidad en la región. Mas de 160 pases del sensor Seawifs fueron analizados a su vez para el mismo campo de trabajo y coincidentes con las fechas de las campañas. Considerando una ventana temporal de 24 horas, se obtuvieron un total de 62 pares válidos entre los datos in situ y las medidas de los sensores remotos para aguas caso I. Estos pares fueron utilizados para obtener mediante regresión un algoritmo local mejorado para el cálculo de la concentración de clorofila a partir de datos de satélite. El algoritmo fue justificado de nuevo con un conjunto independiente de datos in situ de la estación ESTOC, validando el método. Se hizo también una regresión de la cantidad integrada de clorofila "a" frente a las radiancias emergentes del agua lo que proporcionó una razonable precisión en la estimación del contenido total de clorofila en la columna de agua derivado desde datos de satélite.

ABSTRACT: Four cruises covering all seasons were conducted north of the Canary Archipelago within the framework of CANIGO project. On each campaign around sixty stations were sampled for chlorophyll-'A', concentration down to 200 m depth, thus allowing a very accurate characterisation of phytoplanktonic biomass content and variability in the region. More than one hundred and sixty overpasses of the SeaWIFS sensor were analysed contemporaneously to the field work. Allowing for a time window of 24 hours a total of 62 matches between in situ and remotely sensed measurements were obtained for case I waters. These pairs covered the four seasons and have been used to regress a locally enhanced algorithm to derive chlorophyll concentration from satellite. The algorithm was tested against an independent set of in situ measurements from the ESTOC station validating the devised method. The integrated amount of chlorophyll-'A', was also regressed against water leaving radiances; this has provided a reasonably accurate estimation of the total chlorophyll content in the water column from satellite data.

Palabras Clave: Concentración de clorofila, Aguas caso I, Seawifs, Atlántico Centro-Oriental

INTRODUCCIÓN

Los algoritmos para la estimación de pigmentos pueden ser recalculados para aumentar su precisión en las escalas regional y local, dado el gran abanico de factores que afectan su cálculo. De hecho, las mejoras a ésta escala aportarán resultados más precisos a escala global. Una mejor caracterización de la biomasa fitoplanctónica producirá mejoras en el cálculo de la producción primaria a partir de modelos bio-ópticos, lo cual es lo más conveniente para la monitorización de grandes áreas con altas frecuencias temporales. Estas escalas son las más convenientes desde un punto de vista ecológico.

¿Cuál es la precisión de los algoritmos para ésta región en particular?. ¿Podemos estimar el total de biomasa como una función de la concentración superficial?. ¿Qué capa superficial?. ¿Cuál es la estacionalidad de los productores primarios en ésta área?. Un muestreo extensivo como el efectuado durante el proyecto CANIGO puede ayudar a reducir alguna de éstas incertidumbres. Series temporales como la del ESTOC contribuirán a validar las determinaciones hechas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Cruceros Cánigo: Dentro del proyecto Cánigo se realizaron cuatro campañas comprendidas entre los años

1997 y 1999, que cubrieron las diferentes estaciones del año. La zona de estudio engloba tanto aguas de tipo oligotrófico como las enriquecidas por el Afloramiento de la costa Africana. En cada campaña un promedio de 60 estaciones oceanográficas fueron estudiadas para determinar la concentración de clorofila 'a' en los primeros 200m, mediante análisis fluorométrico (Welschmeyer, 1994). Esta metodología tiene un límite de detección por debajo de $5.0 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ siendo capaz de discernir en concentraciones del orden de $10^3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ lo que la hace apta para las condiciones oligotróficas que prevalecen en el área del Océano Atlántico fuera de la influencia de la costa Africana. Como información complementaria y con el propósito de obtener un algoritmo local de estimación de clorofila, se tuvieron en cuenta los datos mensuales de concentración de clorofila 'a' obtenidos en el ESTOC, Estación Europea de Series Temporales en las Islas Canarias (Llinás *et al.*, 1999).

Se procesaron imágenes **Seawifs** de las estaciones HCAN y HSAN obtenidas vía NASA GSFC coincidentes en fecha con las campañas del Cánigo, el ESTOC y el resto de campañas realizadas en el área que se utilizaron para la validación del algoritmo obtenido con anterioridad. El software empleado para el cálculo de la radiancia normalizada emergente del mar a 443, 512, y 555nm fue el seadas (versión3). Después de la georeferenciación de las imágenes se extrajo la información de los puntos correspondientes a las estaciones de muestreo y se aplicó un filtro de nubes, con un criterio de $L_{wn}(443)/L_{wn}(555)=0.5 \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Se establecieron dos ventanas temporales de 24 y 48 horas para tener en cuenta el efecto de las variaciones de escala corta sobre la población fitoplanctónica. El conjunto de datos válidos y susceptibles de ser comparados con los datos in situ consiste en 62 pares, correspondientes a aguas caso I, para la obtención del algoritmo empírico y 16 para su validación dentro de la ventana de 24 horas; para la ventana temporal de 48 horas, el número de pares válidos, en aguas caso I, fueron 87 y 16 respectivamente. En cada ventana temporal se hizo un análisis de regresión entre la concentración superficial de clorofila, o el contenido total de la primera profundidad óptica, y $L_{wn}(443)/L_{wn}(555)$ o $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$.

El análisis se realizó primero para la totalidad de los datos y después para cada sub-región definida por su proximidad a la costa Africana. Para establecer la primera profundidad óptica se utilizó el criterio de la biomasa total para aguas caso I de Morel y Berthon (1989).

Para valorar la viabilidad de la estimación del contenido total de clorofila como una función de la concentración superficial se estudió la forma y la variabilidad

espacio-temporal de los perfiles de clorofila. Se obtuvieron perfiles generalizados de biomasa para cada una de las sub-regiones.

RESULTADOS

Distribución de Biomasa: se establecieron cuatro sub-regiones de acuerdo con las características bioquímicas de afloramiento y oceánicas diferenciadas a priori (figura1): C.Ghir y C. Yubi influenciadas por el afloramiento costero fueron constituidas por aquellas estaciones que estaban dentro de las 20 primeras millas desde la costa. El resto de las estaciones se dividieron en dos grupos llamados 29°N y 32°N, de acuerdo con su latitud. El máximo de biomasa total, alrededor de los 60 mg m^{-2} , se alcanzó en invierno sin grandes diferencias entre la costa y las aguas oceánicas. Para el resto del año el contenido en pigmentos presenta diferencias entre aguas mar abierto y las influidas por el afloramiento: decrece a lo largo del año en el primer dominio mientras que en el último crece ligeramente desde el verano hasta el otoño. En invierno se encuentra un perfil bastante uniforme sin ningún máximo de clorofila en profundidad DCM, y para el resto de las estaciones y sub-regiones aparece un perfil de forma Gausiana. La posición del DCM es en general más superficial y más variable en el régimen del afloramiento, siendo bastante estable en los transectos del 29N y 32N.

En la tabla 1 aparecen algunas de las características medias estacionales de la distribución del fitoplancton. (Pérez-Marrero *et al.*, 2000) El contenido en clorofila de la primera profundidad óptica comparada con el contenido total en la columna de agua oscila entre 4 y 18 %, con un valor modal entre 4 y 6 los cuales abarcan más del 50% de las situaciones. Existe una anticorrelación elevada entre éste porcentaje y la posición relativa de la primera profundidad óptica Z_{pd} . En las zonas de afloramiento la posición del DCM varía sobre aproximadamente 2 hasta 5 profundidades ópticas, mientras que para el océano abierto el DCM está siempre por debajo de 5 profundidades ópticas salvo en el bloom de invierno cuando el máximo aparece en superficie.

Algoritmo empírico para la concentración de clorofila: la versión regular del Seadas (v3) proporciona por lo general, en esta región, concentraciones superficiales de clorofila "a" menores de las existentes, especialmente en invierno. Se realizó un ajuste por mínimos cuadrados entre la ratio de las radiancias normalizadas emergentes del agua a 443 y 555 nm y la concentración superficial. Se encontró una adecuada covariación entre la relación $L_{wn}(443)/L_{wn}(555)$ y la concentración superficial de clorofila. Se calcularon los coeficientes de correlación entre la radiancia y: a) la concentración superficial, b) el contenido de clorofila en la primera pro-

fundidad óptica. Este análisis se realizó para las aguas oceánicas (caso I) con una ventana temporal de 24 y 48 horas. En todos los casos las mejores correlaciones se dieron para una función de la forma: $C = ar^{-b}$. Donde C es o la concentración superficial de clorofila C_0 (mg m^{-3}) o bien el contenido total de la primera profundidad óptica $C_{z_{pd}}$ (mg m^{-2}), r es el cociente de radiancias en la superficie del mar a 443 y 555 nm, y a y b son parámetros empíricos.

Todas las regresiones fueron significativas (Figura 2) indicando que variaciones breves de la concentración de clorofila, del orden de un día, son bastante pequeñas en las aguas oceánicas. Los mayores coeficientes de correlación se encontraron, tal y como se esperaba, para la ventana temporal menor y para la concentración superficial: para el contenido total de la primera profundidad óptica, el coeficiente de correlación es ligeramente menor, pero en términos relativos el error medio estimado se reduce significativamente. Cuando aumentamos el tiempo en la comparación, los efectos sobre los dos parámetros a y b son bastante consistentes: a se reduce sobre el 18% al igual que para $C_{z_{pd}}$, mientras que b se reduce alrededor del 7.5% en ambos casos.

Validación de algoritmos: el algoritmo obtenido fue comprobado de nuevo con un conjunto de datos independientes. Los resultados se presentan en la Figura 3. Un total de 16 pares fue considerado como bueno para la comparación, excepto para las dos estaciones llevadas a cabo el 22 de Febrero en la estación ESTOC (que aparece como la 53 en el gráfico) y presenta altas concentraciones inusuales, los puntos están bien distribuidos alrededor de la línea ideal representada $y=x$. El error RMS excluyendo estas dos estaciones fue $0.06\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ bastante aceptable para cálculos mesoescalares. Si se incluyen estas dos estaciones el error medio de estimación se eleva ligeramente hasta 0.1. Para el contenido total de la primera profundidad óptica el test ofrece también buenos resultados con un error RMS de 0.9, esto es alrededor del 18%, para los mismos 14 puntos.

Estimación del total de clorofila en la columna a partir de datos de satélite: los perfiles fueron parametrizados en términos de una Gaussiana mas un polinomio de segundo orden para tener en cuenta su asimetría con respecto a la profundidad del DCM, esto reduce claramente el error en la determinación del perfil. Se examinó la relación entre la concentración superficial y el contenido total de clorofila en la columna de agua.

Para aguas caso I los perfiles medios estacionales para las diferentes sub-regiones se muestra en la Figura 4. Si la escala espacial es suficientemente grande, esto es a nivel de los dominios definidos en la figura 1, se

obtiene una buena correlación entre el contenido de clorofila en superficie $C_{z_{pd}}$, y el contenido total de clorofila C_t para aguas caso I.

DISCUSIÓN

Los algoritmos empíricos de color del océano pueden ser siempre sospechosos de reflejar condiciones particulares más que el comportamiento general de la relación radiancia-clorofila; de todos modos los datos usados aquí intentan cubrir todas las estaciones y una variación espacial suficiente para ser considerada representativa de la distribución normal de fitoplancton de la región estudiada. Todos los datos de invierno utilizados para derivar el algoritmo fueron obtenidos entre Enero y Febrero de 1999 durante el Poseidon 247, de acuerdo con el conjunto de la base de datos del ESTOC, el invierno de 1999 fue bastante anómalo con concentraciones muy altas de Clorofila asociados con una gran convección que introdujo grandes cantidades de nutrientes a la normalmente pobre capa superficial. Esta podría ser la causa de alguna sobreestimación de grandes concentraciones por medio del algoritmo propuesto, de todos modos para el rango usual por debajo de 0.3 mg m^{-2} su representación es bastante buena y ajusta realmente los más bajos rangos de variación.

Para los estudios de aguas oligotróficas la razón de radiancia a 443 y 555 nm puede ser utilizada para una estimación del total de biomasa de la capa superficial pero esto es solo acertado cuando se tienen en cuenta áreas relativamente grandes, en ese caso la correlación entre el total de clorofila y la porción vista por el satélite están bien correlacionadas. El poder establecer una buena determinación de aquella relación es esencial para la precisión de los modelos de producción primaria.

BIBLIOGRAFÍA

- LLINÁS, O., RODRIGUEZ DE LEON, A., SIEDLER, G., WEFER, G. (1999). ESTOC data Report 95-96. Technical Reports of the Canarian Institute of Marine Sciences. N° 7
- MOREL, A. AND BERTHON, J-F. (1989). Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. Oceanogr.* 34, n° 8, pp: 1545-1562
- WELSCHEMEYER, N. A. (1994). Fluorimetric analysis of chlorophyll-a in presence of chlorophyll-b and phaeopigments. *Limnol. Oceanogr.* 39, n° 8, pp: 1985-1992
- PÉREZ-MARRERO, J., MAROTO, L., GODOY, J., LLINÁS, O. 2000. Phytoplankton biomass estimation in the northern Canary box, using SeaWiFS and in situ data. *Ocean Optics XV. Monaco* 16-20 October.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos sinceramente a la NASA Godard Space Flight Center por proveernos amablemente de los datos de SeaWiFS y el software para su procesamiento, Seadas. Estamos también agradecidos a las instituciones a cargo de los buques oceanográficos: Institute für Meereskunde Kiel, Gobierno de Canarias.

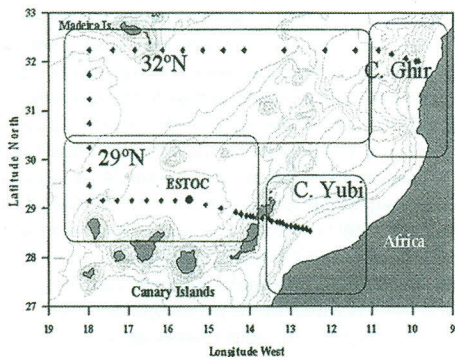


Figura 1. Zona de estudio. Los puntos marcan las posiciones típicas de las estaciones de muestreo en las campañas.

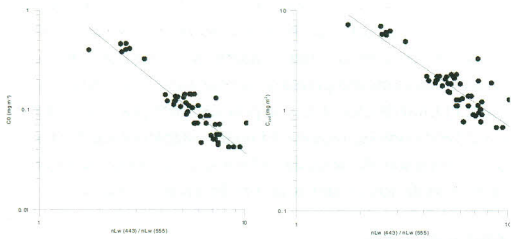


Figura 2. Regresión entre $L_{443}/L_{443+L555}$ (eje x) y la concentración de clorofila superficial (eje y) a la izquierda, y con el contenido integrado de la primera profundidad óptica a la derecha.

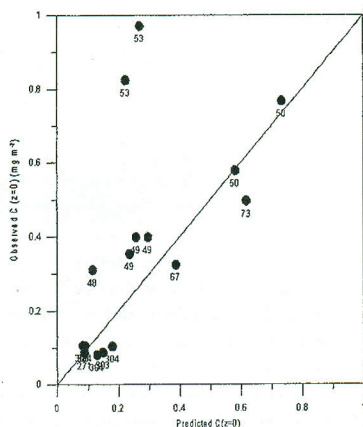


Figura 3. Test de validación del algoritmo propuesto para la estimación de la concentración de clorofila "a" superficial para ratios de radianza a 443 y 555 nm, usando el conjunto de datos independiente.

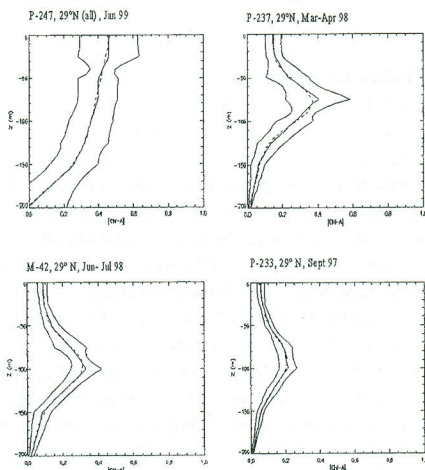


Figura 4. Perfiles medios estacionales \pm una desviación estándar para aguas oceánicas a 29°N de latitud. La curva generalizada es la que aparece con línea punteada.

	32°N	primavera	verano	otoño	29°N	invierno	primavera	verano	otoño
C_1 (mg m^{-2})		27.4 ± 2.7	27.3 ± 5.2	19.1 ± 2.12		63.2 ± 11.9	33.9 ± 4.1	29.6 ± 3.9	20.4 ± 2.8
C_{pd} (mg m^{-2})		1.6 ± 0.49	0.9 ± 0.3	1.0 ± 0.23		6.5 ± 2.5	2.3 ± 0.7	1.4 ± 0.4	1.1 ± 0.3
C_{pd}/C_1 (%)		5	3	5		10	6	4	5
Z_m (m)		101.4	112	89.3		0	79.5	97	92
Z_{pd} (m)		16.5	16.7	18.3		12.9	15.5	16.1	18.0

Tabla 1. Valores estacionales medios de la distribución de clorofila en aguas oceánicas del Atlántico central.