

## **APPLICAZIONE DI UN MODELLO OTTICO REGIONALE PER LO STUDIO DELLE ACQUE MARINE DELLA TOSCANA**

Carolina SANTINI (\*), Fabio MASELLI (\*), Luca MASSI (^), Maurizio PIERI (°)

(\*), IBIMET – CNR, Via Giovanni Caproni, 8, 50145 Firenze, Italy, maselli@ibimet.cnr.it

(^), Università di Firenze – Laboratorio di Ecologia, Dipartimento di Biologia Vegetale

(°) LaMMA – Regione Toscana

### **Riassunto**

Lo scopo del presente lavoro è l'applicazione e la verifica di un modello ottico regionale per il monitoraggio delle acque marine della Toscana. Il modello si basa su immagini MODIS Aqua di secondo livello. Usando i dati raccolti durante una campagna di misure di concentrazione ed assorbimento dei principali costituenti dell'acqua di mare (clorofilla-*a*, sostanza gialla e sedimenti in sospensione), è stato sviluppato un modello semianalitico per rappresentare le caratteristiche spettrali locali del mare. Il modello è basato su una tecnica di inversione che utilizza il principio di *Spectral Angle Mapping* (SAM). Questa tecnica permette il recupero delle concentrazioni del costituente marino, insensibile alle variazioni di ampiezza delle riflettanze misurate. In questo modo, l'errore commesso nella stima delle concentrazioni è ridotto rispetto alle tecniche convenzionali di inversione. La tecnica è stata applicata per produrre immagini mensili di concentrazione dei costituenti marini. Le immagini di concentrazione di clorofilla-*a* ottenute sono state quindi confrontate con quelle fornite dall'algoritmo globale OC3M della NASA. Quest'ultimo algoritmo sovrastima significativamente vicino costa la concentrazione di clorofilla, principalmente a causa della variabilità dei rapporti fra gli assorbimenti dei differenti componenti marini otticamente attivi, e del fondale marino. Il problema è in gran parte corretto dalla nuova procedura, localmente calibrata, che produce stime di concentrazione sufficientemente accurate.

### **Abstract**

The present work aims at applying and verifying of an optical regional model to monitoring of Tuscany seawaters. The model is based on MODIS Aqua imagery (second level). Using the data collected during a measurement campaign on the concentration and absorption of the main seawater constituents (chlorophyll-*a*, yellow substance and sediments in suspension), a semianalytical model has been developed to account for the local spectral characteristics of the sea. The model is based on an inversion technique which uses the principle of Spectral Angle Mapping (SAM). This technique allows the retrieval of seawater constituent concentrations, insensitive to amplitude variations of the measured reflectances. In this way, the error committed in the estimation of the concentrations is reduced with respect to conventional inversion techniques. The technique has been applied to produce monthly images of seawater constituents concentration. The obtained chlorophyll-*a* concentration images are then compared to those provided by NASA global OC3M algorithm. This last algorithm significantly overestimates near shore chlorophyll concentration, mainly due to the variability of absorption ratios of optically active seawater constituents, and of the sea bottom. The problem is mostly corrected by the new, locally calibrated algorithm, which produces sufficiently accurate concentration estimates.

### **Introduzione**

Lo studio dell'andamento stagionale dei parametri ottici attivi (concentrazioni di clorofilla-*a* e sedimenti in sospensione, assorbimento della sostanza gialla) permette di monitorare in aree marine

di interesse ambientale ed economico la qualità delle acque. In particolare lo stato trofico delle acque è funzione della concentrazione di clorofilla-*a* che indica la biomassa fitoplanctonica presente nelle acque.

La quantità di biomassa e la produzione fitoplanctonica sono influenzate da alcuni parametri fisici, chimici e biologici, fra i più importanti dei quali la disponibilità di nutrienti principalmente fosforo e azoto e di alcuni oligoelementi, la disponibilità della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), la durata del fotoperiodo e la temperatura. Un altro parametro importante è la stabilità della colonna d'acqua che dipende essenzialmente dalle variazioni di densità dovuta a quelle di temperatura e salinità. La distribuzione verticale della densità dell'acqua marina determina la struttura della colonna d'acqua: stratificata quando si verificano variazioni brusche di densità che individuano uno strato superficiale generalmente ben illuminato rispetto a quelli profondi, generalmente più ricchi di nutrienti; omogenea quando la densità risulta stabile con la profondità, rendendo così possibili rimescolamenti di acque fra lo strato superficiale e quelli profondi. Generalmente sono le caratteristiche climatiche che determinano le variazioni annuali della struttura della colonna d'acqua, la disponibilità di nutrienti e della PAR e quindi il ciclo della biomassa fitoplanctonica. Nelle aree temperate il periodo di incremento della biomassa fitoplanctonica avviene generalmente in primavera quando insolazione e temperatura favoriscono la produzione primaria fitoplanctonica in acque arricchite di nutrienti durante la stagione invernale. In un contesto complesso di cambiamenti climatici per l'aumento della temperatura globale, principalmente causato dall'incremento di anidride carbonica nell'atmosfera, è di fondamentale importanza, anche per una migliore comprensione dei mutamenti climatici globali, lo studio del ciclo vitale del fitoplancton attraverso l'utilizzo dei dati satellitari di colore e temperatura superficiale del mare. In questo lavoro è descritto un modello ottico regionale, applicato a dati MODIS Aqua di livello 2, per lo studio del colore del mare. Nella parte metodologica è descritta la procedura applicata alle immagini MODIS. Tale procedura si basa su un algoritmo semianalitico di colore del mare calibrato con dati di verità a mare ricavati da una campagna di campionamenti eseguita nel 2003 (Maselli et al., 2007). Nella discussione, le mappe mensili ottenute dall'elaborazione dei dati, sono state confrontate con le stime standard di clorofilla distribuite dalla NASA che utilizza l'algoritmo globale OC3M (O'Reilly et al., 1988), al fine di validare i risultati ottenuti dal modello regionale.

### **Cenni teorici**

Nel mare prospiciente la costa toscana da un punto di vista ottico si possono distinguere le acque litoranee poco profonde e influenzate dagli apporti fluviali e dai fenomeni di risospensione del fondale da quelle del largo generalmente oligotrofiche e limpide. In letteratura i due tipi di ambiente sono stati classificati ed analizzati con approcci separati. In acque di mare aperto le caratteristiche ottiche sono dovute principalmente alla presenza del fitoplancton, mentre in ambienti costieri, spesso, tale regola non sussiste ed il colore del mare dipende anche dagli altri costituenti marini e dalla profondità del fondale marino. In questo ultimo caso, analizzare e definire espressioni che descrivono la qualità delle acque è complesso ed i risultati sono spesso inadeguati. In realtà è noto che anche le aree del largo possono essere caratterizzate da una notevole variabilità fitoplanctonica sia quantitativa sia spettrale come nelle aree di *upwelling*. Questa distinzione statica quindi per tipi di acque marine rappresenta più una tendenza generica che una proprietà oggettiva. In sintesi, lo studio spettrale delle acque comprende due tipi di approccio conoscitivo. L'analisi statistica della correlazione che lega la riflettanza alle concentrazioni dei costituenti ottici è una tecnica impiegata nei metodi empirici per i due tipi di acque. L'approccio teorico del trasferimento radiativo nelle acque marine congiunto allo studio delle proprietà ottiche inerenti è utilizzato in entrambi i tipi di acque, vincolato nel caso di acque costiere alla precisione analitica delle proprietà bio-ottiche delle acque (Mobley, 1994). Tali accenni dovrebbero riflettere la complessità dell'analisi dei parametri in gioco utilizzando approcci matematici basati su misure ottiche.

In questo studio è stata utilizzata un'espressione di base applicata inizialmente ad acque di tipo oceanico e successivamente anche ad acque costiere in quanto tale formulazione tratteggia il

comportamento della luce nelle acque in modo grossolanamente adeguato alle proprietà ottiche inerenti (Morel e Prieur, 1977). E' stata compiuta una regionalizzazione di tale modello sulle caratteristiche delle acque tramite misure a mare (coefficienti specifici di assorbimento, concentrazioni) ed una delineaazione dei coefficienti specifici di backscattering. Tramite l'inversione dell'algoritmo calibrato sulle acque in studio sono stimate le concentrazioni dei costituenti marini dalle riflettanze misurate da satellite. Partendo dalla *normalized water leaving radiance* (nLw, prodotto MODIS standard), la riflettanza misurata da satellite ( $R_{rS_{mis}}$ ) si ricava dall'espressione:

$$R_{rS_{mis}} = \frac{nLw}{F_0} \quad [1]$$

con  $F_0$  l'irradianza solare al top dell'atmosfera (Gordon e Voss, 1999).

In accordo con la documentazione specifica dei dati MODIS la riflettanza simulata,  $R_{rS_{sim}}$ , utilizzata dal modello è:

$$R_{rS_{sim}} = \mathfrak{R} \frac{f}{Q} \left( \frac{b_b}{a} \right) \quad [2]$$

con  $\mathfrak{R}$  uguale a 0.54 ed  $f/Q$  uguale a 0.0949 (Gordon et al., 1988). Nell'equazione precedente il coefficiente di backscattering totale ( $b_b$ ) e di assorbimento totale ( $a$ ) sono misurati sommando i relativi contributi parziali dei singoli componenti secondo la seguente formula:

$$R_{rS_{sim}} = 0.051 \cdot \frac{b_{bw} + [CHL] \cdot b_{b_{PH}}^* + [SS] \cdot b_{b_{NAP}}^*}{a_w + [CHL] \cdot a_{PH}^* + [SS] \cdot a_{NAP}^* + [YS] \cdot a_{YS}^*} \quad [3]$$

dove  $b_{bw}$  è il coefficiente di backscattering dell'acqua di mare pura,  $b_{b_{PH}}^*$  e  $b_{b_{NAP}}^*$  sono rispettivamente i coefficienti specifici di backscattering del fitoplancton e delle particelle non algali;  $a_w$  è il coefficiente di assorbimento dell'acqua di mare pura mentre  $a_{PH}^*$ ,  $a_{NAP}^*$  e  $a_{YS}^*$  rappresentano i coefficienti specifici di assorbimento del fitoplancton, delle particelle non algali e della sostanza gialla; [CHL], [SS] e [YS] sono le concentrazioni di clorofilla, sedimenti sospesi ed il valore di assorbimento della sostanza gialla.

### Area di studio

L'area di studio è costituita dalla porzione di mare antistante la regione Toscana e comprende il Mar Ligure a Nord ed il Mare Tirreno a Sud (Figura 1). In quest'area sono stati effettuati campionamenti a mare e misure. Le coste principalmente basse e sabbiose danno luogo alla ri-sospensione dei sedimenti di fondo, che influenzano il colore delle acque costiere: le acque sono tipicamente di caso 2. Nella fascia costiera ampie estensioni litoranee sono influenzate da pennacchi fluviali e talvolta i sedimenti in sospensione sono trasportati verso il mare aperto. In mare aperto la trofia delle acque si presenta bassa ed il colore delle acque è di caso 1.

Ad inizio primavera a Sud le concentrazioni massime di clorofilla-*a* possono essere di 0.5-1 mg/mc. A Nord questi valori possono arrivare fino a 2.5 mg/mc. Le concentrazioni minime si verificano tipicamente d'estate con valori da 0.07 a 0.15 mg/mc. Ad aprile a Nord una vasta fioritura algale si sviluppa nelle acque di largo del Mar Ligure.

### Verità a mare

Per ottenere i coefficienti regionali di assorbimento e le concentrazioni dei parametri marini nel mare antistante la Toscana, durante l'anno 2003 sono state eseguite mensilmente uscite in mare per campionamenti e misure.

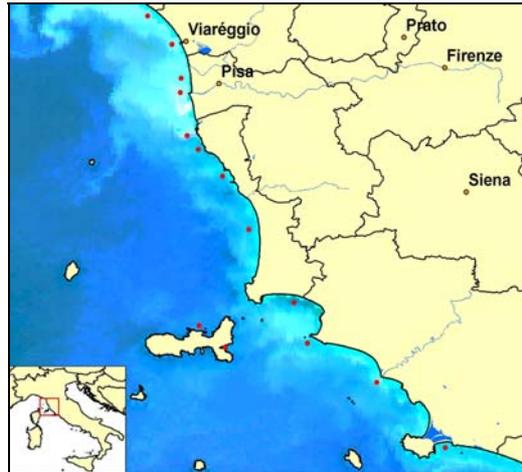


Figura 1- Area di studio con indicate le stazioni di campionamento

Le stazioni di prelievo sono state localizzate lungo 14 transetti perpendicolari alla linea costiera (Figura 1). Per ogni transetto, sono state campionate 2 stazioni a circa 500 m ed a 3000 m dalla costa. Per evitare l'effetto del fondale nel lavoro presentato soltanto le stazioni a 3 km dal litorale sono state considerate per la successiva estrazione delle firme spettrali dalle immagini satellitari. Le concentrazioni dei costituenti marini (clorofilla-*a* e sedimenti sospesi) ed il coefficiente di assorbimento della sostanza gialla sono stati valutati. Inoltre i coefficienti specifici di assorbimento sono stati derivati dalle misure di assorbimento. I valori medi dei coefficienti specifici di assorbimento per i 3 tipi di costituente marino sono stati calcolati da tutti i campioni di mare aperto e tabulati in Maselli et al. (2007). Il contributo delle particelle non algali e del fitoplancton al backscattering totale è stato valutato indirettamente. I valori dei coefficienti specifici di backscattering sono stati determinati da alcune misure di riflettanza e attenuazione dell'irradianza *in situ* ottenute da misure di irradianza effettuate con lo spettroradiometro LI-COR LI 1800UW, prese sporadicamente alla superficie del mare e sott'acqua. I coefficienti specifici di backscattering delle particelle non algali e del fitoplancton calcolati da tutti i campioni di mare aperto sono riportati in Maselli et al. (2007).

### Dati da satellite

Sono state selezionate 112 immagini giornaliere del sensore MODIS Aqua nel 2006 disponibili sul sito web Ocean Color della NASA. La selezione delle immagini è stata basata principalmente sul grado di copertura nuvolosa che non doveva superare la soglia del 50 % dell'area di studio totale. Le immagini di secondo livello contengono le *normalized water leaving radiances* in 6 bande discrete (412 nm, 443 nm, 488 nm, 531 nm, 551 nm, 667 nm) dello spettro del visibile.

Le immagini con una maglia di 1 km di lato sono state corrette geometricamente con il software Envi usando le informazioni geografiche contenute nei file hdf forniti dalla NASA. Tali informazioni spaziali hanno permesso la geocorrezione tramite *geographic lookup table* che contengono per ogni pixel le coordinate geografiche. Le *remote sensing reflectance* sono state calcolate dall'equazione 1 dividendo la *normalized water leaving radiance* per l'irradianza solare ( $F_0$ ) misurata al top dell'atmosfera con i valori di  $F_0$  relativi al sensore MODIS Aqua riportati nel sito web dell'Ocean Color. Le immagini giornaliere sono state mediate per ogni intervallo mensile. In seguito le 12 immagini mensili ottenute sono state sottoposte ad un filtro cosmetico per eliminare le brusche variazioni di riflettanza dovute principalmente alla presenza di copertura nuvolosa. Ogni immagine ottenuta è stata mascherata per la terra. Per effettuare un confronto di monitoraggio tra le immagini elaborate ed i corrispondenti prodotti standard OC3M di livello 3 mensili, le immagini con 1 km di maglia sono state poi ricampionate con 4 km di lato.

## Metodologia

La metodologia utilizzata in questo lavoro è descritta dettagliatamente in Maselli et al. (2007). Qui descriveremo a grandi linee l'approccio utilizzato. Partendo dal modello esemplificato nell'equazione 3 sono state individuate le costanti regionali dei principali parametri ottici partendo da misurazioni a mare. L'adattamento del modello alle caratteristiche spettrali dell'area in studio ha permesso l'inversione delle grandezze ottiche apparenti quali le misure di riflettanza ottenute dalle misure da satellite per le 6 bande MODIS Aqua. La stima delle concentrazioni dei parametri marini è stata eseguita tramite un programma appositamente scritto che, per ogni pixel, seleziona da 1 milione di possibili combinazioni di concentrazioni quella che riproduce più fedelmente le riflettanze misurate da MODIS. L'inversione è stata conseguita utilizzando una tecnica di minimizzazione dell'errore tra misure di riflettanza e stime simulate dal modello. Il criterio di minimizzazione si avvale di un algoritmo basato sul calcolo del coseno dell'angolo spettrale tra i vettori delle riflettanze stimate e di quelle simulate (*Spectral Angle Mapping*). Tale algoritmo è insensibile alle variazioni di ampiezza delle riflettanze misurate, che possono derivare da diversi fattori di disturbo (correzioni radiometriche ed atmosferiche non accurate, variabilità spaziale delle caratteristiche ottiche dei costituenti marini, ecc.). La tecnica è pertanto più efficace rispetto a quelle convenzionali, come è stato dimostrato dal lavoro sopra menzionato (Maselli et al., 2007).

## Discussione e Conclusioni

Per validare i prodotti ottenuti dalla procedura di inversione del modello ed in mancanza di una campagna di misure a mare di verifica delle concentrazioni di clorofilla stimate nel 2006, sono state prese in considerazione le riflettanze e le misure della campagna di calibrazione (2003) per una rappresentazione statistica delle concentrazioni ottenute sia dalla nuova procedura sia dall'algoritmo globale OC3M. Le misure raccolte a mare nel 2003 ed i valori estratti dai pixel campionati corrispondenti sono state rappresentate nel diagramma di Figura 2.

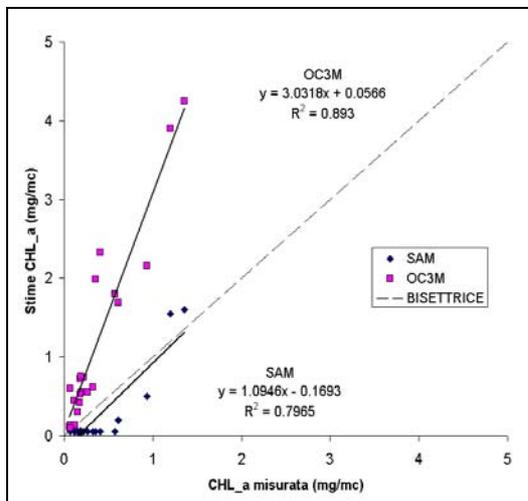


Figura 2 - Diagramma di dispersione dei valori di concentrazione di clorofilla-a misurati e quelli stimati dall'algoritmo globale OC3M e dalla procedura qui descritta (SAM)

Dal diagramma si osserva la sovrastima dei valori ottenuti dall'algoritmo OC3M in tutto il range di valori misurati. Le stime ottenute dalla procedura ed indicate con l'acronimo SAM sono molto simili alle misure se non per una leggera sottostima nel range di concentrazioni inferiore ad 1 mg/m<sup>3</sup>. Sono inoltre qui rappresentate le concentrazioni di clorofilla medie del mese di aprile 2006 fornite dall'algoritmo OC3M (Figura 3) e quelle ottenute dalla procedura SAM (Figura 4). Il confronto fra le stime è effettuato mediante il loro rapporto (Figura 5). Il valore del rapporto è stato suddiviso in livelli discreti tra 0 e 3. I valori di sovrastima della SAM tra 0.0 e 0.5 sono dovuti alla diversa maschera di terra utilizzata per le immagini di livello 2 e 3. La sovrastima della SAM tra 0.5 e 1.0 a Nord è attribuibile a singolari caratteristiche spettrali delle acque. Le concentrazioni di clorofilla delle acque del largo sono sostanzialmente omogenee (intervallo tra 1.0 - 1.5) mentre con

un gradiente crescente la sovrastima dell'OC3M aumenta verso costa presumibilmente per l'effetto spettrale peculiare delle acque costiere prodotto nella procedura di correzione atmosferica (Siegel et al., 2000; Darecki e Stramski, 2004). La correzione atmosferica che utilizza la tecnica del *dark pixel* per correggere le bande del visibile dallo scattering atmosferico sovracorreggono la componente diffusiva nel blu rendendo instabile l'algoritmo di stima della clorofilla basato su rapporti tra le riflettanze del blu e del verde. La tecnica qui proposta corregge proprio le differenze di riflettanza tra stime e misure, causate da variazioni di ampiezza spettrali imputabili all'inadeguatezza della correzione atmosferica utilizzata per le acque torbide.

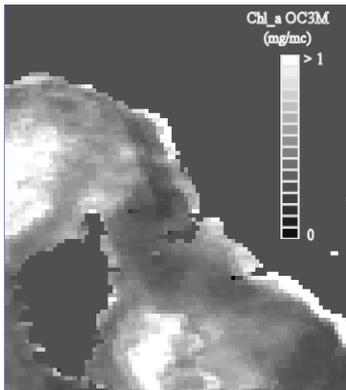


Figura 3 - Valori medi di concentrazione di clorofilla nel mese di aprile 2006 stimati dall'algoritmo globale OC3M

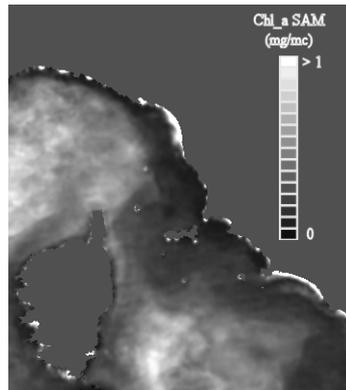


Figura 4 - Valori medi di concentrazione di clorofilla nel mese di aprile 2006 stimati dalla procedura (SAM)

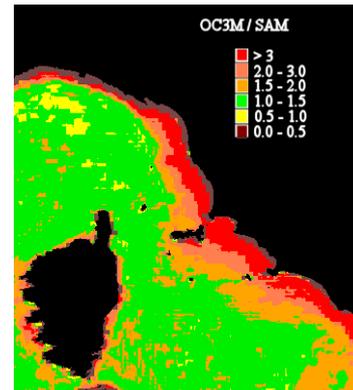


Figura 5 - Slicing del rapporto tra i valori di clorofilla forniti dall'algoritmo OC3M e quelli ottenuti dalla procedura (SAM)

In mancanza di una campagna di rilievi a mare di validazione il confronto delle immagini medie mensili di clorofilla-*a* ottenute con la procedura descritta e quelle di livello 3 ottenute dall'algoritmo standard OC3M ha evidenziato i vantaggi di valutazione offerti dalla procedura ottimizzata per evitare soprattutto nelle aree costiere una sovrastima delle concentrazioni di clorofilla.

### Bibliografia

- Darecki M., Stramski D. (2004), "An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea", *Remote Sensing of Environment*, 89, 326–350.
- Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H., Brown J.W., Smith R.C., Baker K.S., Clark D.K. (1988) "A semi-analytic model of ocean color," *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 10909–10924.
- Gordon H.R., Voss K.J. (1999), "MODIS Normalized Water-leaving Radiance", *ATBD (MOD 18)*, ver. 4, pp 100.
- Maselli F., Massi L., Pieri M., Santini C. (2007) "Spectral Angle Minimization for the Retrieval of Optically Active Seawater Constituents from MODIS Data", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (sottoposto in Luglio 2007).
- Mobley C.D. (1994) *Light and Water. Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, San Diego, USA, pp 592.
- Morel A., Prieur L. (1977) "Analysis of variations in ocean color", *Limnology and Oceanography*, 22, pp 709-722.
- O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C. (1998), "Ocean color algorithms for SeaWiFS", *Journal of Geophysical Research*, 103, C11, pp 24937-24953.
- Siegel D.A., Wang M., Maritorena S., Robinson W. (2000), "Atmospheric Correction of Satellite Ocean Color Imagery: The Black Pixel Assumption", *Applied Optics*, 39, pp 3582-3591.