

La radiazione solare globale nei modelli di Produzione Primaria dei mari della Toscana

Maurizio Pieri (*), Carolina Santini (*), Piero Battista (*), Fabio Maselli (*),
Luca Massi (**), Caterina Nuccio (**), Christian Marchese (***), Luigi Lazzara (***)

(*) CNR – Istituto di Biometeorologia (IBIMET)

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

(***) Università di Firenze – Dipartimento Biologia Evoluzionistica “Leo Pardi”

Riassunto

La Produzione Primaria (PP) marina si basa prevalentemente sull'assorbimento della radiazione fotosintetica attiva (PAR) da parte della clorofilla fitoplanctonica. I raggi solari attraversano la superficie marina, attivano la fotosintesi e la produzione primaria di nuova materia organica. In questo lavoro abbiamo valutato l'uso di differenti tipi di radiazione solare per la stima di PP nei mari della Toscana dal 2005 al 2008. Le tipologie di radiazione solare comprendono la radiazione misurata presso alcune stazioni meteorologiche e la radiazione stimata da osservazioni satellitari. I prodotti satellitari considerati sono i valori giornalieri di *Surface Solar Irradiance* (SSI), derivato dall'*Ocean & Sea Ice Satellite Application Facility* (O&SI SAF), e di PAR del sensore SeaWiFS, ottenuto dal sito *Ocean Color* della *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Un modello locale di PP è stato infine applicato con la PAR ottenuta dai due prodotti satellitari. Il confronto fra i tre tipi di radiazione mostra una debole superiorità del prodotto O&SI SAF rispetto al SeaWiFS. Il primo è, infatti, più coerente con i dati misurati nelle stazioni meteorologiche, senza mostrare i trend di degrado che sono tipici nelle misure radiometriche terrestri. Tuttavia, le differenze di PP ottenute usando i due tipi di prodotti PAR sono marginali e limitate a casi particolari. Infine, sono discusse le principali caratteristiche dei tipi di radiazione esaminati in vista di un loro possibile utilizzo all'interno di un sistema operativo per il monitoraggio della PP nell'area in studio.

Abstract

Marine Primary Production (PP) is mostly based on the absorption of photosynthetically active radiation (PAR) by phytoplankton chlorophyll. The solar beams passing through the marine surface activate photosynthesis and the production of new living matter. In this work we evaluate the use of different sources of solar radiation for estimating PP in the Tuscany seas from 2005 to 2008. These sources comprise the solar radiation measured at some meteorological stations and the solar radiation estimated from satellite observations. The considered satellite products are the daily Surface Solar Irradiance (SSI), derived from the Ocean & Sea Ice Satellite Application Facility (O&SI SAF), and the PAR product of the SeaWiFS sensor, derived from the Ocean Color site of the National Aeronautics and Space Administration (NASA). A local model of PP has finally been fed with the PAR obtained from the two satellite products. The comparisons between the radiation data from the three sources show the slight superiority of the O&SI SAF over the SeaWiFS product. The former is in fact more consistent with the data taken at the weather stations, without showing the degradation patterns which are typical of land radiation measurements. The PP differences obtained by using the two PAR products are, however, marginal and limited to particular cases. The main features of the radiation sources examined are finally discussed in view of their possible utilization within an operational system for monitoring PP in the study area.

Introduzione

La Produzione Primaria (PP) dei mari è un parametro di grande importanza dal punto di vista ecologico sia per la comprensione dei cicli marini del carbonio ed i loro effetti sul clima della Terra, sia per lo studio delle produzioni secondarie e in generale della distribuzione temporale e spaziale delle risorse ittiche che hanno notevoli implicazioni di natura sociale ed economica. Da alcuni anni un gruppo di ricercatori dell'Università e del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Firenze sta definendo un modello di Produzione Primaria applicabile alle acque dei mari Ligure e Tirreno prospicienti la Regione Toscana (Lazzara et al., 2008). Il modello, di tipo *Wavelength Resolved Models* (WRMs), stima la PP giornaliera in $gC/m^2/giorno$ integrata su tutta la colonna d'acqua fino alla profondità eufotica. Il modello è composto dall'unione del modello semianalitico di Morel (1991) per la stima di PP pelagica, del modello atmosferico di Tanrè et al., (1979) e di un modello bio-ottico di Morel (1988), che consente la stima della radiazione fotosintetica sulla superficie del mare e la sua attenuazione lungo la colonna d'acqua e, con una parametrizzazione dei principali processi fisiologici, permette di calcolare la PP partendo dalla distribuzione di biomassa algale. Recentemente al modello originario sono state apportate delle modifiche permettendo il calcolo di PP, a livello di ciascun pixel della matrice che copre l'area di studio, a partire da dati di clorofilla e temperatura superficiale, dati di radiazione fotosintetica (PAR), che può essere ricavata anche da osservazioni satellitari, e da dati batimetrici. La conoscenza della batimetria, insieme alla profondità eufotica, migliora la stima della PP nelle acque marine poco profonde e, quindi, risulta appropriata anche per la gran parte delle zone costiere della Regione Toscana.

Fra gli *input* del modello un'importanza particolare assume la radiazione fotosintetica (PAR) che giunge sulla superficie del mare e che si ridistribuisce lungo la colonna d'acqua in funzione della trasparenza dell'acqua marina. La radiazione fotosintetica può essere ottenuta sia da misure di radiazione solare globale nelle stazioni meteorologiche a terra che da misure di radiazione da sensori satellitari, come nel caso del prodotto standard PAR del sensore SeaWiFS, installato a bordo del satellite OrbView2 o del prodotto SSI (Irradianza Superficiale Marina) ottenuto, per l'area in studio, da osservazioni del sensore SEVIRI, installato a bordo del satellite geostazionario Meteosat. Lo scopo di questo lavoro è stato quindi di valutare quale tipo di PAR inserire nel modello di PP e valutare la differenza di PP ottenuta con i diversi tipi di PAR disponibile.

Area di studio

Da un punto di vista geografico l'area marina di interesse corrisponde a una vasta porzione del Mar Ligure e alla parte settentrionale del Mar Tirreno (Figura 1). Nella parte settentrionale dell'area di studio, le coste della Liguria sono prevalentemente alte e rocciose ed al largo, verso Ovest, si raggiungono le massime profondità, fino a circa 2800 metri. La parte terminale del fiume Magra si trova in prossimità del confine fra la Regione Liguria e la Toscana. La costa toscana, da Nord verso Sud, è caratterizzata da un litorale principalmente basso e sabbioso ad eccezione di alcuni promontori rocciosi. Alcune ampie pianure costiere sono formate dai più importanti corsi d'acqua della Toscana: Arno, Ombrone e Serchio. La porzione di mare costiera è interessata dalla presenza di sedimenti sospesi fluviali che formano ampi pennacchi in occasione delle piene dei corsi d'acqua. Le correnti marine sottocosta sono generalmente dirette da Sud verso Nord, specialmente in inverno ed in primavera, permettendo uno scambio di acqua fra il Mar Ligure ed il Mar Tirreno.

Fra la costa toscana e la Corsica ci sono numerose isole che costituiscono il Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano (Isola d'Elba, Giglio, Capraia, Montecristo, Gorgona, Giannutri e Pianosa).

Nei mari dell'area di studio il ciclo annuale della biomassa fitoplanctonica è caratterizzato da due massimi di fioritura algale, uno maggiore in primavera ed uno minore in autunno (Lenzi Grillini e Lazzara, 1980; Innamorati et al., 1995). Frequentemente, intorno ad Aprile, la vasta fioritura algale che si sviluppa nelle acque del Mar Ligure occidentale influenza anche tutta la parte settentrionale della costa toscana come confermano anche le ricerche basate su osservazioni satellitari (Bosc et al., 2004).



Figura 1 – Area di Studio con le stazioni LaMMA (X) di misura della radiazione solare globale

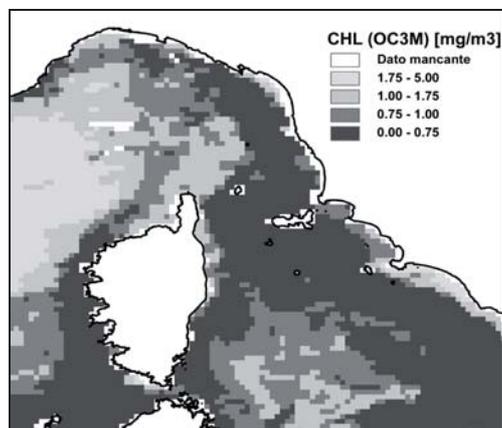


Figura 2 – Mappa CHL-OC3M da prodotto standard MODIS, Livello 3, media su 8 giorni: 30 marzo-6 aprile 2006

Le stazioni meteorologiche del LaMMA ed i sensori di misura della radiazione solare globale

Nella configurazione standard le stazioni meteorologiche LaMMA misurano temperatura, umidità dell'aria, radiazione solare globale, pioggia, direzione e intensità del vento. Le stazioni meteo acquisiscono ogni minuto i segnali dei sensori, memorizzando sull'intervallo prescelto dall'utente (15', 30', 60') i dati elaborati in funzione della grandezza in esame (valori minimo, medio, massimo, cumulato, direzione prevalente, direzione raffica). Per la trasmissione in remoto dei dati il sistema può utilizzare un modem GSM o Satellitare, secondo il grado di copertura della rete GSM. Il sensore di radiazione globale utilizza come elemento sensibile una fotocella al silicio ed ha le seguenti caratteristiche: Sensibilità spettrale 400 ÷ 1100 nm; Range di misura 0 ÷ 1400 W/m²; Risoluzione 0.1 W/m²; Temp. di funzionamento -20 ÷ 75 °C; Linearità ≤ 5%. La risposta spettrale delle fotocelle presenta, a parità di potenza radiativa incidente, un massimo intorno a 900 µm (infrarosso vicino) e tende ad annullarsi sopra i 1200 µm e sotto i 400 µm. Ovviamente questo conferisce loro una minore precisione rispetto ai sensori a termopila nei confronti dei quali però hanno una risoluzione più elevata. Nel corso degli anni si sono evidenziati problemi di degrado della copertura difondente della fotocella (cupoletta realizzata in *Delrin*®) dovuti all'azione nel tempo sia dell'aerosol marino sia di fattori inquinanti, ove presenti, con effetti non trascurabili sul coefficiente di conversione (mV/W/m²). Questo ha comportato la necessità di incrementare la frequenza delle verifiche della calibrazione del sensore di radiazione.

Dall'archivio meteorologico del LaMMA sono stati estratti i valori di radiazione solare globale (in J/m²/giorno) per le seguenti stazioni meteorologiche: Porto Azzurro (10.402, 42.765), Pianosa (10.083, 42.580), Montecristo (10.291,42.332) e Firenze (11.202,43.819), relativi al periodo: 01/01/2005–31/12/2008. I valori di radiazione solare globale misurati da queste stazioni sono stati convertiti in PAR usando il coefficiente di 0.464 proposto da Iqbal (1983).

La radiazione fotosintetica (PAR) derivata da dati satellitari

Dati SeaWiFS

Il sensore SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), lanciato nel 1997 è attualmente ancora operativo e gestito dalla società GeoEye. Il sensore, installato a bordo del satellite OrbView2, è stato costruito appositamente per lo studio del colore degli oceani in rapporto anche alla presenza del fitoplancton oceanico. Il sensore SeaWiFS è caratterizzato da 8 bande di cui le prime 6 centrate nel visibile e le ultime due nell'infrarosso vicino.

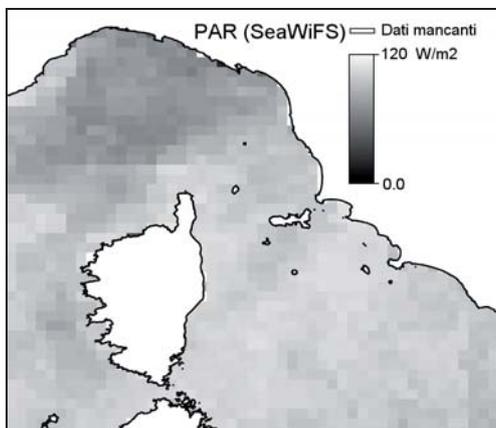


Figura 3 – Mappa PAR da prodotto standard SeaWiFS, Livello 3, media su 8 giorni: 30 marzo-6 aprile 2006

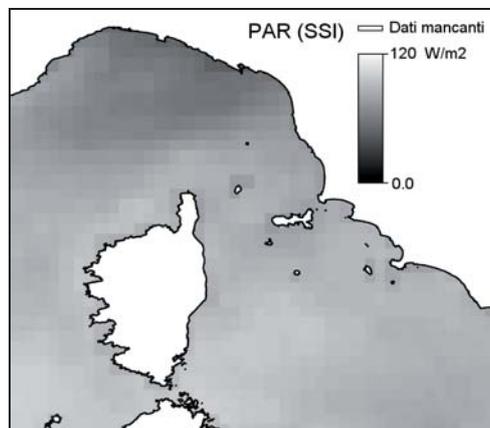


Figura 4 – Mappa PAR da dati SSI, media su 8 giorni: 30 marzo-6 aprile 2006

La risoluzione temporale del satellite è giornaliera mentre la risoluzione spaziale al nadir è di circa 1,13 km. Il prodotto standard PAR derivato da dati SeaWiFS è fornito dal sito web dell'*Ocean Color* (<ftp://oceans.gsfc.nasa.gov>). È un prodotto di Livello 3, con risoluzione spaziale di 9 km e disponibili con diverse risoluzioni temporali: media giornaliera, 8 giorni, mensile, annuale, ecc.. L'algoritmo che stima la media giornaliera di PAR in Einstein/m²/giorno viene descritto nel lavoro di Frouin et al., (2001). Nel nostro caso, sono stati scaricati i dati giornalieri, nel periodo 2005-2008 ed anche un esempio di media su 8 giorni (30/03-06/04/2006). Il valore di PAR successivamente è stato convertito in J/m²/giorno.

Dati SSI

L'organizzazione degli stati europei EUMETSAT, in collaborazione con i Servizi Meteorologici Nazionali ed alcuni istituti di ricerca, ha creato dei servizi, denominati SAF (*Satellite Application Facilities*), che forniscono dati, prodotti ed applicativi riguardanti alcuni aspetti specifici delle osservazioni eseguite con i satelliti meteorologici.

Il SAF *Ocean & Sea Ice* (O&SI) è un consorzio europeo gestito dal servizio meteorologico francese (*Meteo-France*) e fornisce un insieme di prodotti specifici riguardanti l'interfaccia mare-atmosfera di fondamentale importanza nella meteorologia marina, nel monitoraggio del clima e degli ambienti costieri, nelle ricerche in oceanografia, ecc. I prodotti O&SI utilizzati in questo lavoro sono quelli relativi alla stima giornaliera di irradianza solare superficiale (SSI) che giunge alla superficie marina nella banda 0.3-4 μm con risoluzione di 0.1 gradi. I dati di irradianza sono in W/m². L'algoritmo che stima la media giornaliera dell'irradianza solare SSI è stato presentato da Brisson et al., (1999) e descritto anche nel manuale di riferimento del prodotto SSI (Meteo-France, 2005). I file SSI contengono anche uno strato informativo, a livello di pixel, sulla qualità dei dati. I file giornalieri, in formato HDF, relativi al periodo in studio (2005-2008) sono stati scaricati dal server ftp di IFREMER (<ftp.ifremer.fr>). Anche in questo caso il valore PAR è stato calcolato come il 46.4% del valore di SSI ed è stato convertito in J/m²/giorno. Inoltre, per completare il confronto con i dati SeaWiFS, è stato calcolato il valor medio a 8 giorni per il periodo 30/03-06/04/2006.

Analisi dei dati ed applicazione del modello di PP nel periodo 30 marzo – 06 aprile 2006

Le serie di dati estratti dalle stazioni meteorologiche mostrano un andamento irregolare con tipici trend decrescenti e con salti improvvisi dei valori di radiazione solare globale.

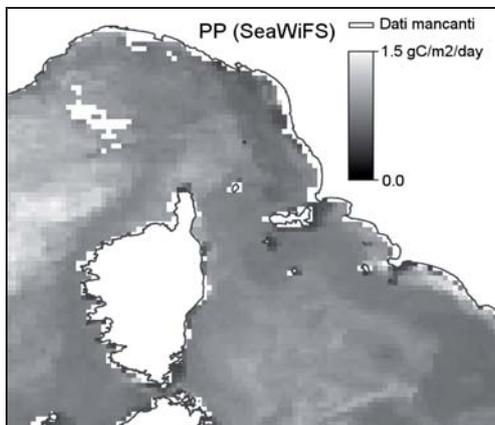


Figura 5 – Mappa PP con PAR stimata da dati SeaWiFS, media su 8 giorni: 30 marzo-6 aprile 2006

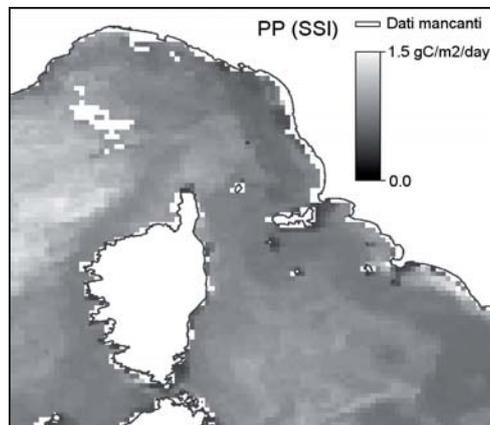


Figura 6 – Mappa PP con PAR stimata da dati SSI, media su 8 giorni: 30 marzo-6 aprile 2006

Ciò dipende dalla degradazione del segnale e dalle operazioni di ricalibrazione avvenute nel periodo considerato. Questo appare evidente se si confrontano i dati con quelli della stazione di Firenze, dove la manutenzione è praticamente continua e l’affidabilità è sensibilmente più elevata.

Dalle immagini PAR (SeaWiFS e SSI) sono stati estratti i valori in corrispondenza dei pixel che contengono le tre stazioni meteorologiche vicine al mare. Dalla serie di dati SSI sono stati estratti solo i valori definiti con qualità eccellente o buona. Nella Tabella 1 si riportano i valori dei coefficienti di determinazione (r^2), degli scarti quadratici medi (RMSE) e degli errori medi normalizzati (MBE_N, in percentuale) calcolati fra le serie di dati PAR delle stazioni e quelle di dati PAR satellitari (SeaWiFS e SSI). I periodi esaminati per il confronto dei dati PAR (Tabella 1) sono stati individuati tenendo conto delle operazioni di ricalibrazione dei radiometri delle stazioni eseguite nel periodo 2005-2008. A causa della minore frequenza dei passaggi SeaWiFS ed anche dell’aumento nel corso degli ultimi anni di frequenti guasti del sensore SeaWiFS le serie di dati SSI hanno meno dati mancanti.

Periodi esaminati per il confronto PAR satellite (SeaWiFS o SSI) e PAR (Stazioni)								
Porto Azzurro	2006, mesi:06-09-12; 2007, mesi:03-06-09-12; 2008, mesi:03-06-09							
Pianosa	2005, mesi:03-06-09-12; 2006, 02/03-03/04; 2007, 12/02-12/03; 2008, 23/12-31/12							
Montecristo	2005, 26/07-26/08; 2008, 03/07-03/08							
	PAR SeaWiFS / Stazioni				PAR SSI / Stazioni			
	Np	r^2	RMSE [J/m ² /giorno]	MBE_N [%]	Np	r^2	RMSE [J/m ² /giorno]	MBE_N [%]
Porto Azzurro	142	0.861	2158158	26.5	169	0.979	962274	12.1
Pianosa	46	0.852	1011038	6.4	56	0.984	354485	-0.9
Montecristo	25	0.673	2718294	27.6	61	0.828	1054357	5.3
Totale punti	213	0.853	2047711	23.6	286	0.967	899374	8.0

Tabella 1 – Periodi esaminati e confronti statistici fra valori giornalieri di radiazione fotosintetica misurata a terra (Stazioni) e stimata da satellite (SeaWiFS e SSI). Np è numero di punti (giorni) effettivi utilizzati nelle analisi.

Infine, è stata eseguita un’applicazione del modello di produzione primaria nell’area in studio per il periodo 30/03-06/04/2006 e con risoluzione di 4 km. A tal fine si è utilizzato come *input* la temperatura superficiale del mare (SST) e la clorofilla (Figura 2) derivati entrambi dai prodotti standard MODIS Aqua, di Livello 3 e con risoluzione di 4 km. Il calcolo della PP è stato eseguito utilizzando la PAR ottenuta da dati SeaWiFS (Figura 3) o da dati SSI (Figura 4), entrambi ricampionate a 4 km,

ed i risultati ottenuti sono mostrati nelle Figure 5-6. Queste figure mostrano che la stima di PP ottenuta a partire dai due tipi di PAR è molto simile ($r^2=0.980$).

Conclusioni

Nei modelli di stima di PP, l'utilizzazione della PAR, derivata dalle misure di radiazione nelle stazioni meteorologiche risulta essere molto problematica. Non solo per la natura puntuale dei dati che costringe a complesse procedure di interpolazione ma anche perché, spesso, la copertura diffondente della fotocella tende ad opacizzarsi e le serie presentano quindi dei trend decrescenti intervallati da improvvisi salti di misura che si verificano al momento della ricalibrazione delle stazioni. La PAR derivata da dati satellitari ha il vantaggio di essere di tipo sinottico ma tende a sovrastimare quella misurata nelle stazioni (24% SeaWiFS e 8% SSI). Le due serie di dati, tuttavia, sono in ottimo accordo, come dimostrato dalle elevate correlazioni ottenute (Tabella 1). Le due PAR satellitari (SeaWiFS e SSI) sono molto correlate ($r^2=0.889$) e possono essere considerate equivalenti, tuttavia la PAR (SSI) ha una migliore correlazione con i dati misurati a terra. Dato che la PAR (SSI) si basa sulle osservazioni del satellite Meteosat, questo prodotto riproduce in maniera più efficace la reale variabilità giornaliera della radiazione rispetto al prodotto PAR derivato dall'unico passaggio giornaliero del sensore SeaWiFS. Inoltre, un altro vantaggio del prodotto SSI è la sua continua validazione da parte del consorzio O&SI SAF, che viene eseguita in confronto con i dati di alcune stazioni meteorologiche fra cui quella di Ajaccio, in Corsica, è vicina alla nostra area di studio (Meteo-France, 2005).

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ente Cassa di Risparmio di Firenze che dal 2007 finanzia parte dell'attività di studio.

Bibliografia

- Bosc E., Bricaud A., Antoine D. (2004), "Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from 4 years of SeaWiFS observations", *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1005, doi:10.1029/2003GB002034.
- Brisson A., LeBorgne P., Marsouin A. (1999), *Development of algorithms for Surface Solar Irradiance retrieval at O&SI SAF low and Mid Latitude, February 1999*, Météo-France/DP/Centre de Météorologie Spatiale, BP 147, 22302 Lannion, France.
- Frouin R., Franz B., Wang M. (2001), *Algorithm to estimate PAR from Sea-WiFS data*. Version 1.2 Documentation (Sito web: http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/seawifs_par_wfigs.pdf).
- Innamorati M., Lazzara L., Nuccio C., Mori G., Massi L. (1995), "Nutrienti biomassa e produzione fitoplanctonica nell'Alto Tirreno toscano", *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. serie A*, 102 (suppl.):137-150.
- Iqbal M. (1983), *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, New York, 7, 169-213.
- Lazzara L., Marchese C., Maselli F., Massi L., Nuccio C., Pieri M., Santini C., Sorani V. (2008), "Studio della produzione primaria delle acque marine toscane", *Atti della 12^o Conferenza Nazionale ASITA*, L'Aquila 21-24 ottobre 2008.
- Lenzi Grillini C., Lazzara L. (1980), "Ciclo annuale del fitoplancton nelle acque costiere del Parco Naturale della Maremma, II. Flora e variazioni delle comunità," *Giorn. Bot. Ital.*, 114, 5, 199-215.
- Meteo-France, (2005), *Ocean & Sea Ice SAF - Surface Solar Irradiance*, Manuale Prodotti, Versione 1.5, Novembre 2005.
- Morel A. (1988), "Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 water)", *Journal of Geophysical Research*, 93, 10749-10768.
- Morel A. (1991), "Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications", *Prog. Oceanog.*, 2, 263-306.
- Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., De Lefte A. (1979), "Atmospheric modelling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties", *Applied Optics*, 18, 3587-3594.