

Monitoraggio satellitare della qualità delle acque dei mari Toscani: l'attività del progetto MOMAR

Chiara Lapucci (*,**), Fabio Maselli (**), Carlo Brandini (*,**),
Luca Massi (***), Caterina Nuccio (***), Alberto Ortolani (*,**), Bernardo Gozzini (*),
Francesca Polonelli (***)

(*) Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile (LaMMA), Firenze
(**) Istituto di Biometeorologia, Consiglio nazionale delle Ricerche (IBIMET-CNR), Firenze
(***) Laboratorio di Ecologia e Fisiologia Vegetale, Dipartimento di Biologia Evoluzionistica,
Via Micheli 1, 50121 Firenze

Abstract

Nell'ambito del progetto MOMAR l'attività di monitoraggio satellitare ha previsto la messa a punto di un sistema semioperativo di valutazione della qualità delle acque dei mari Ligure e Tirreno antistanti la Toscana, basato sulle concentrazioni della biomassa fitoplanctonica, stimata mediante la concentrazione della clorofilla (Chl), della sostanza organica disciolta cromoforica (CDOM) e del materiale particolato non fitoplanctonico (NAP). Sono state misurate *in situ* sia le proprietà ottiche del mare che le concentrazioni dei principali componenti attivi nel determinare il colore del mare e sono state valutate le loro relazioni con la biomassa fitoplanctonica con lo scopo di calibrare localmente algoritmi esistenti o proporre di nuovi per migliorare l'efficienza delle stime di Chl, CDOM e NAP. In particolare è stata valutata la stima della Chl da satellite tramite l'applicazione di diversi algoritmi ad immagini MODIS. Gli algoritmi considerati (OC3M, MedOC3, OC5, SAM_LT) hanno mostrato diversi livelli di accuratezza nelle acque costiere ed in quelle al largo. Questo studio ha consentito di definire alcune linee guida preliminari che saranno utili per il monitoraggio operativo dell'area marina in esame.

Abstract

In the framework of the Momar project, the activity concerning satellite monitoring concerned the development of a semioperational system of water quality monitoring of the Ligurian and Tyrrhenian Seas in front of Tuscany. The system is based on the concentrations of phytoplankton biomass, estimated by Chlorophyll (Chl), Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) and Non-Algal Particulate Matter (NAP). Optical properties of the sea were measured *in situ*. The concentrations of the main active components in determining the color of the sea were evaluated together with their relationships with phytoplankton biomass, in order to calibrate locally existing algorithms or proposing new ones, with the aim to improve the estimation efficiency of Chl, CDOM and NAP. In particular, satellite Chl estimation through the application of different algorithms to MODIS images was evaluated. The algorithms taken into consideration (OC3M, MedOC3, OC5, SAM_LT) showed varying degrees of accuracy in coastal waters and in those offshore. This study made allowed to define some preliminary guidelines that will be useful for operational monitoring of the studied area.

Introduzione

Il progetto MOMAR (sistema integrato per il Monitoraggio e il controllo dell'ambiente MARino) è un progetto di cooperazione transfrontaliera che ha avuto luogo nel periodo 2010-2011, ed ha avuto come obiettivo quello di creare un percorso unico sul monitoraggio marino e costiero tra la Toscana, la Liguria, la Sardegna e la Corsica. In questo contesto, in collaborazione tra LaMMA,

Università di Firenze e CNR-IBIMET, è stato creato un sistema di monitoraggio delle acque nell'area marina di fronte alla Toscana, tra mar Ligure e Tirreno Settentrionale, che prevede sia attività monitoraggio puntuale in situ, ossia la valutazione delle concentrazioni della biomassa fitoplanctonica, stimata mediante la concentrazione della clorofilla (Chl), della sostanza organica disciolta cromoforica (CDOM) e del materiale particolato totale (SPM), che il monitoraggio satellitare, una catena operativa che tratta i dati satellitari di *ocean color* e fornisce mappe di concentrazione di clorofilla. Le più recenti Direttive Quadro europee, la Water Framework Directive (2000/60/EC) e la Marine Strategy (2008/56/EC) richiedono la caratterizzazione dello stato ecologico del mare, e indicano la clorofilla *a* come un parametro utile a tale scopo.

Campagne di misura, area di studio ed analisi effettuate

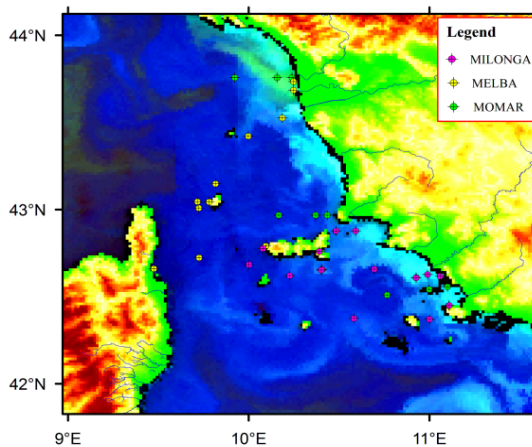


Figura 1

Le acque dell'Arcipelago Toscano mostrano evidenti peculiarità ottiche in gran parte legate alle caratteristiche geomorfologiche ed idrodinamiche dell'area dell'Arcipelago Toscano. Queste acque insistono sulla piattaforma continentale che si estende molto davanti alla costa toscana, costituendo un bacino con ridotti idrodinamismo e scambi rispetto alla circolazione generale tirrenica e ligure. In questa situazione gli apporti dei principali fiumi della Toscana ed i fenomeni di risospensione danno un contributo significativo di SPM, CDOM e nutrienti nelle acque superficiali. Questi contributi influenzano quindi l'ecologia e le proprietà ottiche dell'area.

Durante il progetto MOMAR sono state svolte alcune campagne di rilevamento, durante le quali sono stati analizzati diversi parametri biogeochimici e correntometrici, qui riportiamo solo quelli utili ai fini di questo studio. L'Università di Firenze ha effettuato 5 campagne stagionali (definite qui "campagna MOMAR") su tre transetti per ciascuno dei quali sono state effettuate misure e campionamenti in tre stazioni poste a 3, 10 e 30 km dalla costa Toscana: in prossimità della foce dell'Arno, di fronte a Piombino e nella zona di Talamone (Figura 1).

Il LAMMA, in collaborazione con l'Università di Firenze, il CNR Ibimet e l'Ifremer, ha partecipato a due campagne oceanografiche all'interno del progetto MOMAR, MELBA e Milonga, che sono state strutturate allo scopo di monitorare la variabilità dei principali parametri oceanografici (temperatura, salinità, correnti marine) e biogeochimici (clorofilla *a*, CDOM, SPM, fitoplancton, nutrienti) dell'area oggetto dello studio. In Figura 1 si riportano le stazioni in cui sono stati fatti rilievi biogeochimici sia per le campagne MELBA e Milonga che per la campagna MOMAR. Le analisi di tutti i campioni sono state effettuate dal Laboratorio di Ecologia e Fisiologia Vegetale dell'Università degli Studi di Firenze. Nel corso della campagna MELBA i rilievi biogeochimici

sono stati effettuati nella prima settimana di maggio 2011, nella zona di mare che va dalla foce dell'Arno verso l'isola di Capraia, fino alla parte nord est della costa di Corsica (Figura 2), e sono stati raccolti campioni biogeochimici in 11 stazioni. Nel corso della campagna Milonga, i campionamenti biogeochimici sono stati effettuati durante l'ultima settimana di settembre e l'ultima settimana di ottobre 2011 (Figura 2), e sono stati raccolti 34 campioni nella zona dell'arcipelago Toscano a sud del Golfo di Follonica, completando così le misure fatte durante la campagna MELBA. Per tutte le campagne i campioni di acqua di mare (di superficie) sono stati raccolti tramite una bottiglia Niskin. Sono state effettuate le seguenti analisi: l'analisi quali-quantitativa dei pigmenti algali (Clorofilla a e altri pigmenti algali mediante HPLC, fluorimetro e spettrofotometro), assorbimento del particolato (fitoplancton e NAP "Non Algal Particle"), SPM (Suspended Particulate Matter), Colored Dissolved Organic Matter (CDOM), solo per la campagna MOMAR sono state effettuate misure di irradianza quantica PAR superficiale e sottomarina; spettri dell'irradianza discendente sulla superficie marina ed a varie profondità nella colonna d'acqua (5, 10, 25 e 50 m) e spettri dell'irradianza ascendente a 5 e 10 m (spettroradiometro LI-COR LI 1800UW). Da queste misure in ogni stazione sono stati ricavati il coefficiente di attenuazione verticale dell'irradianza ($k(\lambda)$) e la riflettanza subsuperficiale ($R(\lambda)$).

I dati satellitari

I dati satellitari utilizzati in questo studio sono stati acquisiti dal sensore multispettrale MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) installato sul satellite NASA Aqua. Il sensore MODIS è costituito da 36 bande spettrali ed acquisisce dati in un'area compresa fra 400 e 14400 nm, dal visibile all'infrarosso. La risoluzione spaziale per canale va da 250 (per poche bande) a 1000m. I canali comunemente utilizzati per l'osservazione dell'ocean color sono nello spettro del visibile e nel vicino infrarosso, che hanno un'alta sensibilità e una risoluzione spaziale di 1 km circa al nadir. In questo studio sono stati utilizzati prodotti standard di livello 2 (riflettanza, Remote Sensing Reflectance), e sono stati acquisiti 16 file (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) contenenti l'intera area di studio o una parte di essa, in corrispondenza ai giorni in cui sono avvenuti i campionamenti durante le tre campagne oceanografiche.

Confronto tra riflettanze in situ e satellitari

Allo scopo di affiancare il monitoraggio satellitare al monitoraggio classico è necessario valutare la bontà dei dati osservati dal satellite ed elaborati come riflettanze. Così si confrontano i dati di riflettanza misurati a livello della superficie del mare durante la campagna MOMAR con i corrispondenti dati di riflettanza provenienti dal satellite MODIS. I dati di riflettanza sono utili per valutare l'effetto della correzione atmosferica: circa il 90% del segnale elettromagnetico che arriva dal mare al satellite, infatti, deriva dalle interazioni di esso con l'atmosfera stessa. Tale processo, la correzione atmosferica, per la sua complessità rende necessaria una verifica tramite rilievi di riflettanza *in situ* effettuati al momento del passaggio satellitare. Le riflettanze misurate sopra la superficie del mare, qui chiamate "riflettanze *in situ*", si possono così confrontare con le riflettanze da satellite, qui chiamate "riflettanze MODIS".

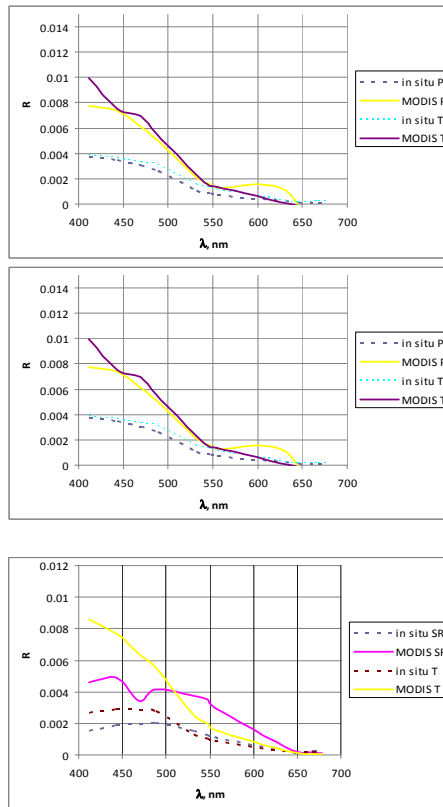


Figura 2. Confronto tra riflettanze *in situ* e MODIS, le linee tratteggiate corrispondono ai dati *in situ*, le linee continue corrispondono ai dati MODIS.

Le forme spettrali in cui sono state raggruppate le riflettanze *in situ* trovano una buona corrispondenza con le forme spettrali delle corrispondenti riflettanze MODIS. Come si vede nella Figura 2, nelle lunghezze d'onda rosso e blu si verificano le maggiori discrepanze tra dati di riflettanza *in situ* e satellitari. Nelle lunghezze d'onda blu i dati MODIS sovrastimano fortemente rispetto a quelli *in situ* (Figura 2), e ciò è dovuto a problemi nella correzione atmosferica: a tali lunghezze d'onda infatti lo scattering atmosferico è difficilmente eliminabile. Inoltre per quel che riguarda le lunghezze d'onda nel rosso ci sono molti valori di riflettanza satellitare addirittura negativi, dovuti all'*atmospheric overcorrection*. Dato che a queste lunghezze d'onda i valori di riflettanza delle acque marine sono molto bassi il contributo dell'atmosfera diventa dominante e difficile da correggere tramite procedure standard. Gli spettri MODIS di alcuni campioni mostrano dunque valori negativi di R_{rs} alle lunghezze d'onda più alte, e tali valori sono stati conservati al fine di valutare la robustezza dei quattro algoritmi nei confronti di queste fonti di errore.

Confronto tra algoritmi per la stima della clorofilla

Algoritmi selezionati

Allo scopo di individuare un algoritmo per la stima della clorofilla a adatto per l'area di studio del progetto MOMAR, confrontando i dati di clorofilla a stimati da algoritmi con i dati *in situ* di clorofilla a rilevati durante le campagne oceanografiche, sono stati selezionati quattro algoritmi:

OC3M, MedOC3, OC5, e SAM – LT. OC3M è un algoritmo globale messo a punto dalla NASA, su dati satellitari MODIS, calibrato su un dataset scelto su tutti i mari del globo, valido solo per le acque di caso 1 (O'Reilly et al., 2000). L'algoritmo OC3M è un algoritmo bio-ottico empirico, basato quindi su semplici relazioni statistiche che mettono in relazione il *rapporto di riflettanza* con la concentrazione di clorofilla *a*. I dati di clorofilla *a* ottenuti con l'algoritmo OC3M sono distribuiti dalla NASA insieme agli altri prodotti di Livello 2. MedOC3 è una versione dell'algoritmo OC3M ricalibrata sul Mar Mediterraneo, su dati satellitari MODIS, (Santoleri et al., 2008) valido solo per le acque di Caso 1. OC5 è un'estensione dell'algoritmo globale OC3M alle acque di Caso 2 proposto da Ifremer (Gohin et al., 2002). Tale algoritmo prende in considerazione altri due canali oltre ai tre dell'OC3M: il canale a 412 nm, che permette di valutare il contributo della CDOM, e quello a 555 nm, che permette di valutare il contributo del SPM. SAM – LT è un algoritmo bio-ottico semianalitico (Maselli et al., 2009), che si basa su relazioni matematiche tra proprietà ottiche inerenti e proprietà ottiche apparenti, tramite inversione di modelli bio-ottici. L'algoritmo SAM_LT è valido solo per le acque di Caso 2, è regionale (calibrato solo su dati di acque costiere toscane), e permette di ottenere dati di clorofilla *a*, SPM e CDOM. È in corso una ricalibrazione dell'algoritmo anche sulle acque di Caso 1 da parte degli autori di tale algoritmo.

Dati *in situ*

Campagna	Periodo	Numero di stazioni	[Chl_a] Media (mg m ⁻³)	[Chl_a] Deviazione standard (mg m ⁻³)	[Chl_a] minimum (mg m ⁻³)	[Chl_a] maximum (mg m ⁻³)
MOMAR (Università di Firenze)	16 aprile 2010 – 29 luglio 2011	28	0.4360	0.6556	0.0407	2.7869
MELBA	02 – 06 maggio 2011	11	0.2081	0.1499	0.0787	0.5107
MILONGA	21 – 22 settembre, 12, 18 ottobre 2011	18	0.1837	0.1622	0.0492	0.6677

Tabella 1. Statistiche relative alle concentrazioni di clorofilla rilevate durante le tre campagne: MOMAR, MELBA, Milonga.

Le tre campagne (Figura 1) sono state caratterizzate da diverse condizioni ambientali e stagionali, che si rispecchiano nella presenza di diversi livelli di concentrazione di clorofilla *a*. I dati di clorofilla *a* rilevati nella campagna MOMAR sono stati analizzati per HPLC, mentre quelli rilevati nelle campagne Melba e Milonga sono stati analizzati per spettrofotometro e fluorimetro. Statistiche riassuntive di queste concentrazioni sono riportate nella Tabella 1. La campagna MOMAR svolta nel mare antistante la regione Toscana presenta la più alta concentrazione di clorofilla *a* trovata, questi valori appartengono specialmente alle stazioni più costiere (3 Km) ed in prossimità della foce dell'Arno nel periodo invernale. La campagna MELBA è stata condotta nel Mar Ligure, che presenta normalmente caratteristiche di acque oceaniche durante la maggior parte dell'anno, ed anche agli inizi di maggio, periodo durante il quale si è svolta la missione. I valori più alti di clorofilla *a* tra questi campioni sono stati rilevati vicino alla foce dei fiumi Arno e del Serchio, stazioni neritiche dove la concentrazione di clorofilla *a* risente dell'apporto fluviale. La campagna Milonga è stata effettuata nel settore nord del Mare Tirreno tra la fine di settembre e la fine di ottobre 2011, in stazioni per la maggior parte situate in mare aperto, e mostrano concentrazioni di clorofilla *a* basse, simili a quelli della campagna MELBA; i valori di clorofilla *a* più alti che coincidono con i massimi riportati nella Tabella 1, si trovano in corrispondenza di due stazioni situate vicino alla foce del fiume Ombrone.

Confronto tra dati *in situ* e telerilevati relativi alla campagna MOMAR

Analisi di regressione sono state effettuate per confrontare le stime di concentrazione di clorofilla *a* *in situ* e telerilevate. In particolare, *scatter plot* sono stati elaborati (Figura 3 a-d) per tutti e quattro gli algoritmi considerati, e la precisione corrispondente è stata valutata utilizzando il coefficiente di determinazione (R^2), il Root Mean Square Error e il Mean Bias Error percentuale (RMSE e %MBE, rispettivamente). In generale, le stime di concentrazione di clorofilla *a* ottenute da tutti gli algoritmi sono significativamente correlate con le corrispondenti misurazioni *in situ* al livello di confidenza del 99%. Questi algoritmi, tuttavia, mostrano diversi livelli di accuratezza. In generale, l' R^2 è simile per tutti. L'errore quadratico medio (RMSE) è più alto è per il MedOC3 (1.1 mg m^{-3}). Il %MBE mostra che OC3M e MedOC3 sovrastimano più degli altri (rispettivamente del 21 e 41%), mentre l'OC5 sovrastima poco (8%) e il SAM addirittura sottostima del 4%.

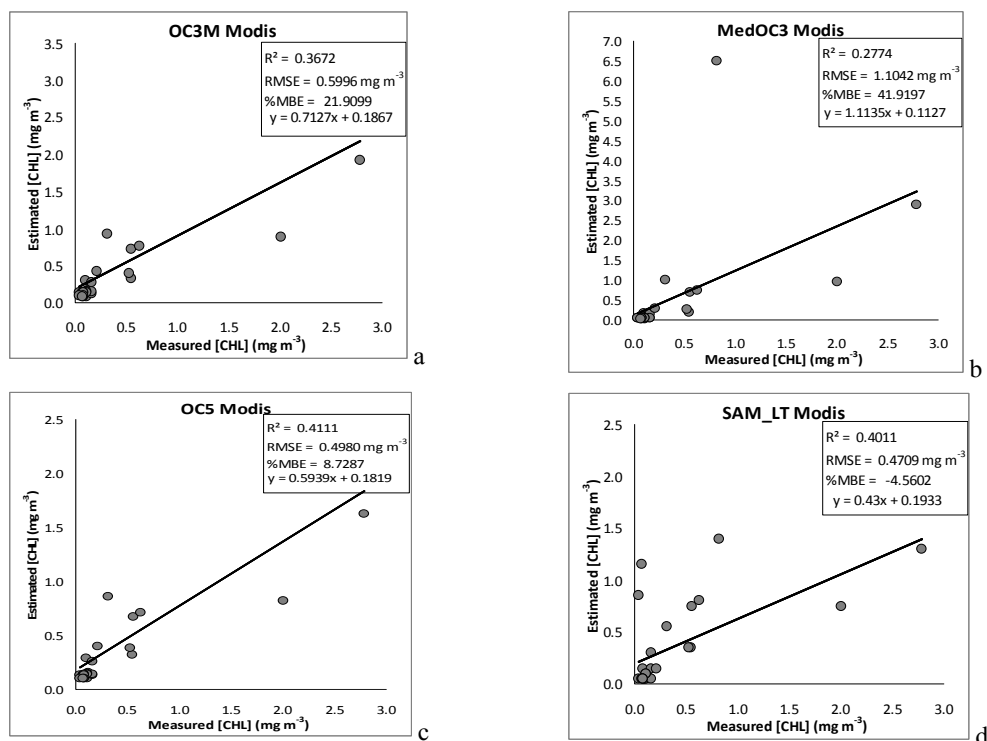


Figura 3 a-d. Scatter plot – confronto di dati di clorofilla *a* ottenuti tramite HPLC con valori di clorofilla *a* ottenuti da dati satellitari MODIS tramite 4 algoritmi (OC3M, MedOC3, OC5, SAM_LT).

L'ultimo *scatter plot* evidenzia poi la scarsa sensibilità dell'algoritmo SAM a concentrazioni basse di clorofilla *a*, tipiche di acque oligotrofiche. Gli algoritmi MODIS che stimano la clorofilla *a* dal colore dell'oceano, basati sul rapporto di riflettanza (R_{rs}) nel blu e nel verde, sono noti sovrastimare nella zona del Mediterraneo. Questi risultati confermano infatti una certa tendenza degli algoritmi convenzionali (OC3M e MedOC3) a sovrastimare la concentrazione di clorofilla *a*. Tale tendenza è tuttavia meno accentuata di quella riscontrata in lavori precedenti (Lapucci et al., in stampa). I due algoritmi considerati mostrano infatti prestazioni migliori in questi casi, mentre tendono a sovrastimare fortemente la concentrazione di clorofilla *a* in acque costiere. A tale riguardo bisogna ricordare che i campionamenti della campagna MOMAR selezionati per i confronti sono prevalentemente estivi, quando le acque del Mediterraneo, avendo caratteristiche più oligotrofiche,

somigliano maggiormente a quelle oceaniche: queste sono appunto le condizioni in cui OC3M e MedOC3 hanno performance migliori. Per quanto riguarda gli altri due algoritmi, essi mostrano in genere prestazioni soddisfacenti, producendo errori quadratici e globali piuttosto ridotti. La sovrastima è inferiore infatti nel caso dell'OC5 che, al contrario di OC3M e MedOC3, è calibrato anche per le acque di Caso 2. L'algoritmo SAM_LT, in particolare, produce stime più basse degli altri e generalmente più vicine alle misure *in situ*, soprattutto per le acque più torbide. Tuttavia l'algoritmo è scarsamente sensibile a concentrazioni di clorofilla *a* medio – basse, infatti è localmente calibrato per acque di Caso 2 del mar Ligure – Tirreno. Per tale ragione sono stati recentemente effettuati ulteriori studi tesi a migliorare le prestazioni dell'algoritmo in acque di Caso 1, particolarmente per quanto riguarda la stima della concentrazione di clorofilla *a*. Una sintesi di tali studi, che sono ancora in corso, è riportata in Massi et al., (2011).

Confronto tra dati *in situ* e telerilevati relativi alle campagne MELBA e Milonga

Riportiamo qui *scatter plot* tra dati di clorofilla *in situ* per spettrofotometro e dati ottenuti dai quattro algoritmi tramite riflettanze satellitari. I risultati osservabili negli *scatter plot* (Figura 5 a – d) sono solo parzialmente in accordo con quelli ottenuti in precedenza. I due algoritmi classici sovrastimano in maniera notevole la concentrazione di clorofilla *a*. Questo problema è ridotto dall'OC5, e del tutto eliminato dal SAM_LT, che però mostra la consueta scarsa sensibilità a basse concentrazioni di clorofilla *a*. Tali diversi risultati possono in parte essere attribuiti al diverso sistema di misura delle concentrazioni *in situ* (spettrofotometro invece di HPLC). Un'altra parte delle differenze riscontrate può essere attribuita alle diverse caratteristiche ottiche delle acque indagate rispetto a quelle delle campagne MOMAR, legate verosimilmente alle relative differenze stagionali.

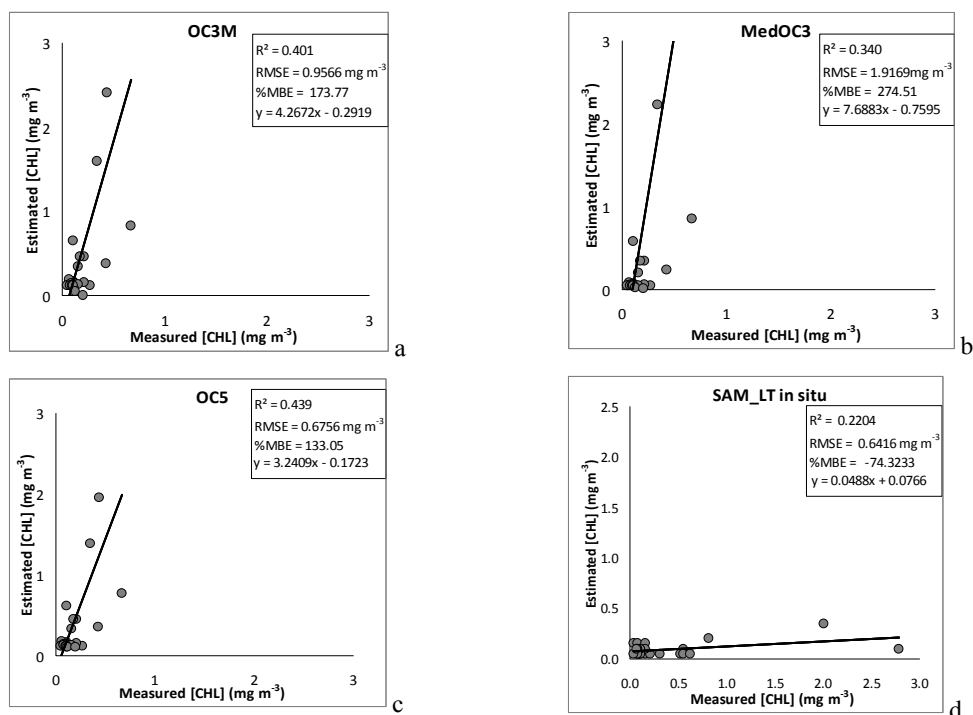


Figura 5 a-d. Scatter plot – confronto di dati di clorofilla *a* ottenuti tramite HPLC con valori di clorofilla *a* ottenuti da dati satellitari MODIS tramite 4 algoritmi (OC3M, MedOC3, OC5, SAM_LT).

Conclusioni

I risultati confermano che gli algoritmi standard OC3M e MedOC3, calibrati su dati di acque oceaniche con basse concentrazioni di clorofilla, non danno buone stime di clorofilla nell'area di studio presa in considerazione: ciò è vero soprattutto per le acque costiere e nei periodi primaverili e invernali (Lapucci et al., in stampa). Gli algoritmi OC5 e SAM_LT mostrano performance migliori rispetto ai primi due, e sono perciò buoni candidati per essere utilizzati a fianco del monitoraggio puntuale. L'algoritmo OC5, costruito sia per acque di Caso 1 che per acque di Caso 2, potrebbe essere reso ancora più adatto all'area del Mediterraneo, in quanto mostra buoni risultati nonostante che la *look up table* su cui si basa comprenda solo pochi dati del Mar Mediterraneo (Gohin, 2011). L'algoritmo SAM_LT, calibrato per acque costiere, dovrebbe pure essere reso più sensibile alle basse concentrazioni dei costituenti ottici. Le considerazioni sopra esposte indicano comunque che entrambi gli algoritmi OC5 e SAM_LT potrebbero essere resi più appropriati nell'area di studio MOMAR, in modo da poter produrre stime accurate di clorofilla *a*.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'ARPAT e l'Istituto Tecnico Statale Alfredo Cappellini di Livorno.

Bibliografia

- Gohin F., Druon J. N., Lampert L. (2002), "A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters", *Int. J. Remote Sensing* 23, 8, 1639 – 166.
- Gohin F. (2011), "Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters", *Ocean Sci.* 7, 705-732, doi:10.5194/os-7-705-2011.
- Lapucci C., Ampolo Rella M., Brandini C., Ganzin N., Gozzini B., Maselli F., Massi L., Nuccio C., Ortolani A., Trees C. (2012), "Evaluation of empirical and semi-analytical chlorophyll algorithms in the Ligurian and North Tyrrhenian seas", *Journal of Applied Remote Sensing*, in press.
- Maselli F., Massi L., Pieri M., Santini C (2009), "Spectral angle minimization for the retrieval of optically active seawater constituents from MODIS data", *Photogramm. Eng. Rem. S.* 75 (5): 595-605.
- O'Reilly J. E., and 24 Coauthors (2000), "SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3", *NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11*, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49 pp.
- Santoleri R., Volpe G., Marullo S., Buongiorno Nardelli B. (2008), "Open waters optical remote sensing of the Mediterranean Seas", *Remote sensing of the European Seas*, 103-116, Springer Netherlands.