

Utilizzo del modello OC-4 con dati iperspettrali per la caratterizzazione di acque lacustri

Gabriele Bitelli, Emanuele Mandanici

DICAM Università di Bologna, v. Risorgimento, 2 Bologna
(gabriele.bitelli ; emanuele.mandanici) @unibo.it

Riassunto

Il presente studio intende valutare l'applicabilità del modello OC4 (*Ocean Chlorophyll 4*), originariamente sviluppato per acque costiere, allo studio di acque lacustri, attraverso l'impiego di immagini satellitari iperspettrali e differenti modelli di correzione atmosferica. L'analisi è stata condotta su due casi di studio specifici, il lago di Garda ed il lago Qarun (Egitto), rappresentativi di due condizioni climatiche ed idrologiche opposte. I primi risultati mostrano un buon accordo tra i valori forniti dal modello OC4 e i dati di letteratura per il lago di Garda, mentre i valori appaiono sottostimati per quanto riguarda le acque del lago Qarun. Ulteriori approfondimenti sono necessari per interpretare correttamente tali discrepanze.

Abstract

The paper aims to evaluate the applicability of the OC4 (Ocean Chlorophyll 4) model, originally developed for coastal waters, to lake waters, through hyperspectral imagery and different atmospheric correction models. The analyses have been carried out on two case studies, which are representative of opposite climatic and hydrologic settings. Retrieved chl-a concentrations of Lake Garda are in agreement with data available in literature, instead concentration values of Lake Qarun seems to be underestimate. Further analyses are needed to properly explain these discrepancies.

Introduzione

Sebbene l'applicazione delle tecniche di telerilevamento al monitoraggio delle acque interne sia oggetto di ricerca da lungo tempo per le indubbe potenzialità di tale approccio, restano ancora aperti numerosi problemi, sia di ordine teorico che metodologico. Un fattore limitante per questa applicazione, rispetto al monitoraggio delle acque oceaniche, è la necessità di coniugare una risoluzione geometrica medio-alta con una buona risoluzione spettrale.

In generale gli approcci proposti per il monitoraggio dei parametri di qualità dell'acqua possono essere suddivisi in due categorie principali: i metodi empirici, che prevedono il calcolo per regressione di relazioni *ad-hoc* tra gli indicatori di interesse ed i valori di riflettanza di bande ritenute maggiormente sensibili, ed i metodi analitici, i quali tentano di approssimare con modelli fisici il trasferimento radiativo lungo la colonna d'acqua ed all'interfaccia aria-acqua (Lindell *et al.* 1999). Naturalmente i primi risultano difficilmente esportabili fuori dai siti di calibrazione, mentre i secondi richiedono informazioni ancillari non sempre disponibili. Entrambi gli approcci richiedono poi una procedura di correzione atmosferica, particolarmente delicata considerando i bassi valori di riflettanza propri delle superfici acquatiche, ma indispensabile ai fini della ripetibilità nel tempo di qualsiasi metodo. Sia per i metodi analitici, sia per quelli empirici, infine, non esistono procedure *standard* comunemente accettate.

Il presente lavoro si propone di valutare l'applicabilità del modello OC4 (*Ocean Chlorophyll 4*) ai corpi lacustri. Si tratta di un modello originariamente sviluppato per il sensore SeaWiFS nell'ambito

del progetto *Ocean Color*, il quale consente di calcolare la concentrazione di clorofilla-a (un importante indicatore dello stato trofico delle acque), mediante una relazione polinomiale del quarto ordine tra le riflettanze osservate in quattro bande del visibile (Reilly *et al.*, 2000). Il sensore SeaWiFS, tuttavia, è stato progettato per il monitoraggio globale delle masse oceaniche, pertanto all'appropriata risoluzione spettrale non unisce una adeguata risoluzione geometrica che ne consenta l'utilizzo per corpi lacustri, pur di grandi dimensioni. Per contro, il modello OC4 per il calcolo della clorofilla, pur essendo di tipo empirico, è stato calibrato su un *dataset* di oltre duemila siti, rappresentativo di una vasta gamma di ambienti (Reilly *et al.*, 2000).

Per una prima sperimentazione sono stati scelti due siti: il lago di Garda, in Italia, ed il lago Qarun, situato all'interno dell'oasi del Fayyum in Egitto. La scelta di questi siti è stata dettata da molteplici ragioni. Anzitutto i due laghi presentano caratteristiche limnologiche completamente differenti, sia per la diversa fascia climatica in cui si trovano, che per il diverso assetto idrologico.

Il Garda è un lago alpino, caratterizzato da acque dolci, mediamente di buona qualità dal punto di vista dell'inquinamento, il cui ricambio è garantito dalla presenza di un immissario ed un emissario. La qualità delle acque di questo lago è costantemente monitorata e sono stati pubblicati diversi studi che hanno fatto uso di dati telerilevati (Lindell *et al.* 1999; Giardino *et al.* 2007); esso pertanto può essere utilizzato come caso di riferimento.

Il Qarun, viceversa, è situato al margine orientale del Deserto Libico, in condizioni climatiche iper-aride. Occupando la porzione topograficamente più depressa dell'oasi del Fayyum, esso riceve le acque di scarico della rete di irrigazione servente le coltivazioni. In assenza di emissari, l'alto tasso di evaporazione favorisce l'accumulo delle sostanze inquinanti, in particolare dei nitrati e nitriti derivanti dall'uso massiccio di fertilizzanti chimici (Hussein, 2008). Il continuo deterioramento delle qualità delle acque, cui si assiste dall'inizio del secolo, consiste principalmente in un innalzamento della salinità (Adb-Ellah, 2009), prossima ormai al 38‰ (a fronte di una salinità media degli oceani pari al 34‰), nell'accentuazione dei fenomeni di eutrofizzazione e nell'accumulo biologico di metalli pesanti (Abbas *et al.*, 2007). Sebbene sia stato dichiarato area protetta nel 1989 e negli ultimi anni si stiano moltiplicando gli sforzi della comunità scientifica, manca ancora un piano organico di monitoraggio e gestione che possa mitigare l'impatto delle pressioni antropiche e preservare l'integrità dell'ecosistema.

Materiali e Metodi

La presente sperimentazione si avvale delle immagini iperspettrali e multispettrali della piattaforma Earth Observing 1. Più precisamente, per il lago di Garda è stata utilizzata un'immagine Hyperion del luglio 2003, per il lago Qarun due immagini Hyperion e due immagini ALI di archivio acquisite tra agosto e settembre 2002 e altrettante immagini Hyperion ed ALI acquisite su richiesta nel dicembre 2009 (fig. 1).

Il dato iperspettrale Hyperion è costituito da 242 bande, che coprono con continuità lo spettro del visibile e dell'infrarosso vicino con una risoluzione spettrale di circa 10 nm (Ungar *et al.*, 2003). Tuttavia i canali che coprono le lunghezze d'onda corrispondenti alle principali bande di assorbimento del vapore acqueo presentano un segnale troppo debole e non possono essere utilizzati. Eliminando anche le due bande di sovrapposizione tra il sensore del VNIR e quello dello SWIR, il cubo iperspettrale è stato ridotto a sole 179 bande. Queste sono state calibrate mediante il pacchetto *software* sviluppato dal CSIRO (*Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*): particolarmente delicata è la mitigazione degli effetti di "smile" e "streaking", difetti propri del sistema di acquisizione che possono compromettere l'estrazione di informazioni affidabili dall'immagine (Jupp e Datt, 2004). La correzione atmosferica è stata effettuata con due modelli di trasferimento radiativo: il FLAASH, basato sul codice Modtran (Cooleya *et al.*, 2002), ed il 6SV (Kotchenova *et al.*, 2006; Mandanici, 2010). Quindi, ai fini dell'applicazione del modello OC4, il dato iperspettrale è stato ricampionato, mediante il *software* ENVI, in modo da simulare le bande di acquisizione del sensore SeaWiFS per il quale il modello è stato sviluppato (fig. 2).

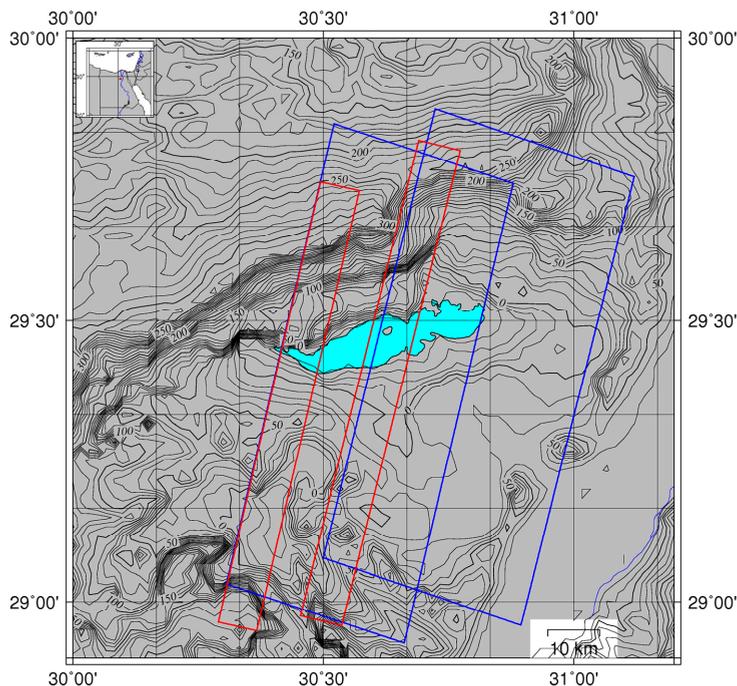


Figura 1 – Copertura delle immagini Hyperion (rosso) ed ALI (bleu) sul lago Qarun.

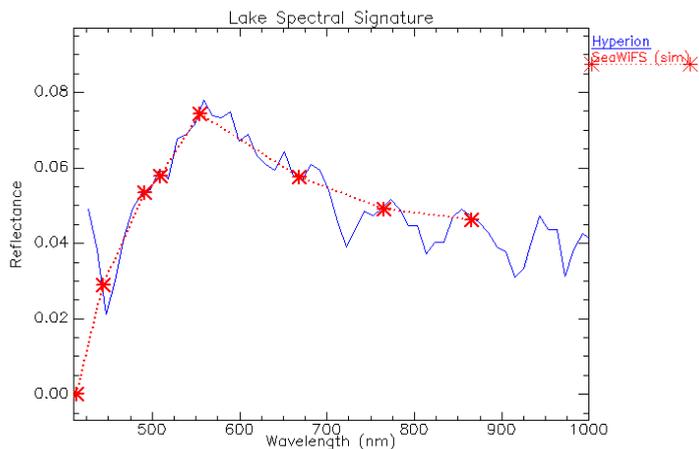


Figura 2 – Firma spettrale di un singolo pixel del lago Qarun. In bleu è rappresentata la firma estratta dall'originale immagine Hyperion, in rosso i valori ottenuti dal ricampionamento spettrale per simulare le bande del sensore SeaWiFS.

Poiché le immagini Hyperion consentono solo una copertura molto parziale del lago Qarun, è stato utilizzato anche il sensore ALI per avere una mappatura più completa. Il dato multispettrale ALI è costituito dalle tre bande del visibile più sei bande nell'infrarosso (Ungar *et al.*, 2003). Su queste immagini è stato applicato l'algoritmo OC2, considerando che le bande del SeaWiFS utilizzate da questo algoritmo trovano una corrispondenza di massima nelle bande del sensore ALI. Anche per questo sensore la correzione atmosferica è stata effettuata con i due codici FLAASH e 6SV.

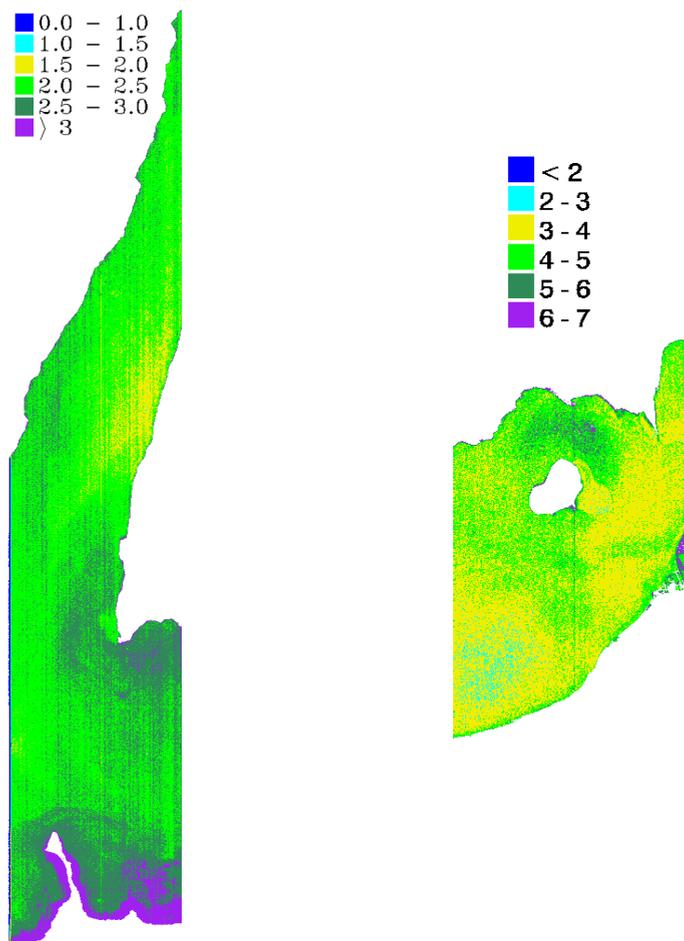


Figura 3 – Concentrazioni di clorofilla-a in mg/m^3 ottenute per il lago di Garda (a sinistra) e per il lago Qarun (a destra), applicando il modello OC4 alle immagini Hyperion ricampionate per simulare le bande del sensore SeaWiFS, rispettivamente del 22 luglio 2003 e del 15 dicembre 2009, e corrette con il codice 6SV.

Risultati

Per quanto riguarda il lago di Garda (fig. 3 sx), i valori di clorofilla-a ottenuti dall'immagine Hyperion risultano in buon accordo con i dati disponibili in letteratura, in particolare con i risultati di uno studio condotto con la stessa immagine, ma impiegando un modello analitico bio-ottico completo. Soltanto in una ristretta area al centro del lago appaiono differenze superiori ad $1 \text{ mg}/\text{m}^3$. Sul lago Qarun non sono disponibili dati dettagliati, ma solo valori medi per l'intero lago o sporadiche indicazioni puntuali, spesso non documentate in modo completo riguardo la posizione esatta ed il tempo di prelievo dei campioni; non è possibile pertanto effettuare una completa validazione. La distribuzione spaziale fornita dalle immagini multispettrali ALI (fig. 4) appare coerente con le informazioni disponibili, risultando più alta la concentrazione di clorofilla nel settore orientale, in vicinanza dei principali immissari che trasportano i nutrienti. I valori sono poi in accordo con quelli ottenuti dalle immagini Hyperion ricampionate, nelle aree di sovrapposizione (fig. 3 dx). Si evidenzia però una forte sottostima dei valori assoluti di concentrazione, rispetto ai

dati medi di letteratura (Hussein, 2008). La differenza, riscontrabile sia nelle immagini estive, sia in quelle invernali, può essere in parte attribuita ad oscillazioni stagionali, ma occorrono indagini più approfondite per stabilire l'origine di questo *bias*.

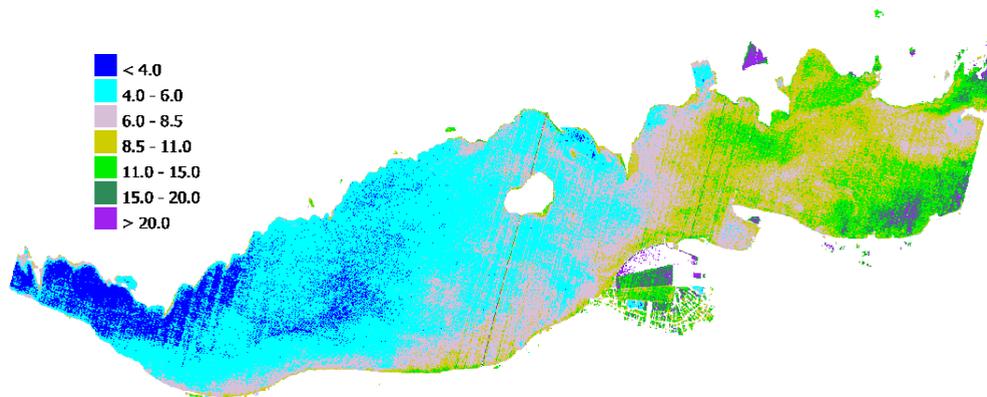


Figura 4 – Concentrazione di clorofilla-*a* in mg/m^3 nel lago Qarun, ottenuta dall'applicazione del modello OC2 sull'immagine ALI del 20 dicembre 2009, corretta con il codice 6SV. I valori più alti si rilevano nella porzione orientale, vicino al delta del canale El-Batt. (Bitelli e Mandanici, 2010).

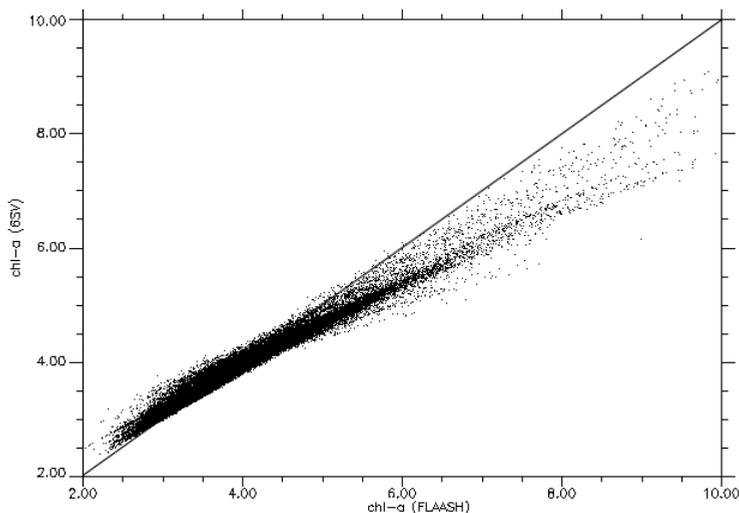


Figura 5 – Scatter plot dei valori di concentrazione di clorofilla-*a* in mg/m^3 ottenuti mediante la stessa immagine Hyperion corretta con due modelli di trasferimento atmosferico. La dispersione si discosta significativamente dalla linea a 45°.

Una considerazione particolare merita il confronto tra le soluzioni ottenute utilizzando i due diversi modelli di correzione atmosferica (Bitelli e Mandanici, 2010). Entrambi i codici implementano gli stessi profili atmosferici *standard*, mentre sono differenti i modelli di *aerosol*. Nel caso del lago Qarun, ad esempio, per il FLAASH è stato selezionato il modello “*rural*”, mentre nel 6SV si è scelto il “*background desert*”. Quest’ultimo probabilmente è più rispondente alle reali condizioni del sito, pertanto le soluzioni fornite dal 6SV sono state preferite. In fig. 5 è riportato un confronto tra i valori di concentrazione di clorofilla ricavati dalla stessa immagine Hyperion applicando i due

algoritmi di correzione descritti. Si nota che lo *scatter plot* dei valori si discosta dall'andamento lineare: il FLAASH fornisce valori più alti rispetto al 6SV sulle concentrazioni maggiori di 5 mg/m³, viceversa per concentrazioni più basse.

Conclusioni

È stato sperimentato, per corpi lacustri con differenti caratteristiche, l'uso di modelli empirici per il calcolo di parametri di qualità delle acque, originariamente sviluppati per lo studio degli oceani, in particolare la concentrazione di clorofilla-a; l'adozione dei modelli OC4 ed OC2 in questo ambito risulta possibile a patto che siano disponibili immagini con una adeguata risoluzione sia spaziale che spettrale, fornendo risultati che appaiono in generale in linea con le informazioni disponibili. La disponibilità di un maggior numero di dati di validazione coevi all'acquisizione satellitare potrà fornire migliori elementi di validazione, necessari in particolare per il caso del Lago Qarun: una campagna di rilievi in questo senso è stata predisposta per il prossimo futuro. La sperimentazione ha inoltre messo in luce la sensibilità dei risultati alla scelta dell'algoritmo di correzione atmosferica, ed anche tale aspetto potrà essere approfondito con la disponibilità di ulteriori osservazioni *in situ*.

Bibliografia

- Abbas H.H.H., Authman M.M.N. (2007), "Accumulation and Distribution of Copper and Zinc in Both Water and Some Vital Tissues of Two Fish Species (*Tilapia zillii* and *Mugil cephalus*) of Lake Qarun, Fayoum Province, Egypt", *Pakistan Journal of Biological Sciences* 10: 2106-2122.
- Abd-Allah R.G. (2009), "Outlook on Past, Present and Future Status of Water Salinity in Lake Qarun, Egypt", *World Journal of Fish and Marine Sciences* 1: 51-55.
- Bitelli G., Mandanici E. (2010), "Atmospheric correction issues for water quality assessment from Remote Sensing: the case of Lake Qarun (Egypt)", *Proc. SPIE* 7831-71.
- Cooleya T., Andersona G.P., Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowskia A.J., Chetwynd J.H., Gardner J.A., Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Berk A., Bernstein L.S., Acharya P.K., Milled D., Lewis P. (2002), "FLAASH, a MODTRAN4-based Atmospheric Correction Algorithm, Its Application and Validation", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. IEEE International* 3: 1414-1418.
- Giardino C., Brando E.B., Dekker A.G., Strömbeck N., Candiani G. (2007), "Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion", *Remote sensing of the environment* 109: 183-195.
- Hussein H., Amer R., Gaballah A., Refaat Y., Abdel-Wahab A. (2008), "Pollution Monitoring for Lake Qarun", *Advances in Environmental Biology* 2(2): 70-80.
- Jupp D.L.B., Datt B. (2004), "Evaluation of Hyperion Performance at Australian Hyperspectral Calibration and Validation Sites", *CSIRO Earth Observation Centre Report*.
- Kotchenova S.V., Vermote E.F., Matarrese R., Klemm F.J. (2006), "Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance", *Applied Optics* 45(26): 6762-6774.
- Lindell T., Pierson D., Premazzi G., Zilioli E. (1999), *Manual for monitoring European lakes using remote sensing techniques*, Report EUR 18665 EN.
- Mandanici, E. (2010), "Implementation of Hyperion sensor routine in 6SV radiative transfer code", *Proc. Hyperspectral Workshop ESA SP-683*.
- Reilly, J., E. (2000), "SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part3", *NASA Technical memorandum* 2000-206892(2): 9-23.
- Ungar, S., G., Pearlman, J., S., Mendenhall, J., A., Reuter, D. (2003), "Overview of the Earth Observing One (EO-1) Mission", *IEEE - Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(6): 1149-1159.