

## IL CONTRIBUTO DEL MIVIS NELLO STUDIO ECOLOGICO DELLE ACQUE E DELLA VEGETAZIONE DEI LAGHI DI MANTOVA

Micòl VASCELLARI (\*), Claudia GIARDINO (\*\*), Mariano BRESCIANI (\*\*\*),  
Daniele LONGHI (\*\*\*\*), Marco BARTOLI (\*\*\*\*), M. Antonietta DESSENA (\*)

(\*) Ente Acque Sardegna (ENAS) - Servizio Salvaguardia del Territorio e Tutela delle Acque,  
viale Elmas 116, Cagliari, tel. 340/8342537, fax 1782245759; e-mail: micolvasc@tiscali.it

(\*\*) CNR-IREA, via Bassini 15 Milano, tel. 02-23699298, fax 02-236999300, e-mail: giardino.c@irea.cnr.it

(\*\*\*) CNR-Stazione Sperimentale di Sirmione "Eugenio Zilioli", via Punta Staffalo 16 Sirmione (Bs),  
tel. 030-916556, fax 030-916556, e-mail: bresciani.m@irea.cnr.it

(\*\*\*\*) Università di Parma, Dipartimento di Scienze Ambientali, viale G. P. Usberti 11A, Parma,  
tel. 0521-906000, e-mail: marco.bartoli@unipr.it

### Sommario

Questo studio è nato dall'esigenza di un ampliamento delle conoscenze sulle caratteristiche delle acque e della vegetazione dei laghi di Mantova, contraddistinti da una situazione ipertrofica delle, disequilibri nella presenza delle macrofite acquatiche e con problematiche d'interramento. L'applicazione delle tecniche di telerilevamento hanno come obiettivo la mappatura dei parametri di qualità della colonna d'acqua e delle specie di macrofite per ottimizzare la gestione dell'area, al fine di migliorare la qualità ecologica. Nel 2007 sono state effettuate misure radiometriche di campo con spettrometro e da piattaforma aerea tramite il sensore iperspettrale MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer), con risoluzione 4 m, associate a misure limnologiche delle acque del sistema lacustre. Il dato MIVIS è stato geocodificato e corretto atmosfericamente, successivamente sono state applicate tecniche di inversione di modelli bio-ottici per la stima dei parametri di qualità dell'acqua. Lo studio del comparto vegetale è stato eseguito sia valutando la separabilità spettrale delle specie di macrofite dominanti, sia attraverso l'applicazione di indici di vegetazione abitualmente utilizzati dal telerilevamento. Le mappe dei parametri otticamente attivi della colonna d'acqua, di temperatura e di NDVI della vegetazione acquatica emersa ha confermato il precario stato di salute dei laghi mantovani.

### Abstract

Mantova's lakes are characterised by hypertrophic conditions, anomalous growth of macrophyte and problematic organic matter sedimentation. A deeper knowledge of the water quality characteristics and of vegetation conditions is therefore necessary for protecting this vulnerable ecosystem. Remote sensing techniques can be used to derive the characteristics of the water column quality and macrophyte species to improve the ecological quality of natural ecosystems. In 2007 we carried out field campaigns in order to collect data on the Mantova's lakes. We collected field radiometric measurements with a portable spectroradiometer and an airborne image over the lakes with the MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer) hyperspectral sensor that is characterised by a spatial resolution of 4 m. At the same time we carried out laboratory measurements of the limnological properties of the lake waters. MIVIS images were geocoded and atmospherically corrected before applying inversion techniques of the bio-optical model. The analysis of the vegetation compound has been done by evaluating spectral separability of the dominant macrophyte species and by using vegetation indices. Maps of optical properties of the water column, temperature and NDVI of aquatic surface vegetation confirmed the precarious conditions of the Mantova's lakes.

### Area di studio

L'area di studio è l'area di divagazione fluviale del Mincio che include tre laghi intercomunicanti denominati: Lago Superiore, Lago di Mezzo, Lago Inferiore. Nel caso specifico, i risultati del progetto sono riferiti al lago Superiore e al lago di Mezzo. Questi laghi sono caratterizzati da elevata trofia ed accumulo di materiale organico dovuto alla crescita di macrofite emergenti o di comunità pleustofitiche (Telò et al., 2007). L'eccesso dei nutrienti favorisce fioriture microalgali che attenuano la penetrazione della luce nell'acqua ed inibiscono la crescita delle macrofite sommerse. Il lago di maggiori dimensioni è il lago Superiore con una superficie pari a 3,80 km<sup>2</sup>, mentre il lago di Mezzo e il lago Inferiore hanno un'estensione pari a 1,07 km<sup>2</sup> e 1,45 km<sup>2</sup> rispettivamente (Franchini, 2000). Il perimetro del primo lago è di circa 10 km e quello dei due bacini a valle di circa 6 km. Il volume di invaso dei tre laghi da monte a valle è rispettivamente 14,5 Mm<sup>3</sup>, 3,27 Mm<sup>3</sup> e 4,36 Mm<sup>3</sup>, il tempo teorico medio di residenza idraulica è di 0,028 anni (Osservatorio dei Laghi Lombardi, 2004). La vegetazione delle sponde è caratterizzata da canneti, saliceti e cariceti; nei corpi d'acqua alle macrofite autoctone (*Trapa natans*, *Nuphar luteum* e *Nymphaea alba*) si associano specie alloctone, in particolare, nel lago Superiore, è massiccia la presenza del fiore di loto (*Nelumbium nucifera*). A causa della capacità infestante di questa, e di altre specie esotiche, sono necessari massicci interventi periodici di sfalcio per preservare l'integrità dei laghi e per tutelare le specie autoctone.

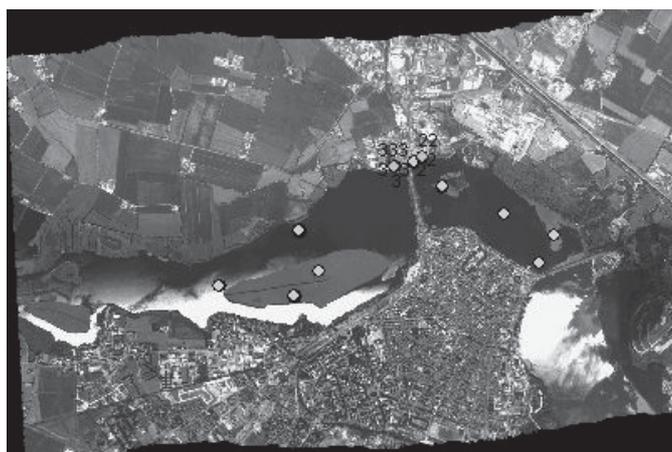
### Metodologia

Date le ridotte dimensioni areali dei laghi mantovani e la necessità di studiare sia la componente acquatica che quella vegetale, per questo studio è stato scelto il sensore iperspettrale MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*) per la sua elevata risoluzione spaziale (4 m al suolo) e spettrale. Il dato MIVIS è stato acquisito il 26-07-2007 alle ore 13:45 (ora locale) dalla CGR di Parma. Al fine di validare il dato iperspettrale nel giorno del passaggio sono state effettuate misure fotometriche, radiometriche e limnologiche. L'approccio utilizzato per lo studio delle proprietà ottiche delle acque dei laghi di Mantova è di tipo semianalitico, il quale utilizza specifiche regioni degli spettri dell'immagine e che richiede la conoscenza delle caratteristiche spettrali delle sostanze otticamente attive ricercate nell'acqua, per sviluppare gli algoritmi per questi componenti. Attraverso l'utilizzo di protocolli di misura (Fargion, Mueller, 2000), dalle misure radiometriche di campo effettuate sulla colonna d'acqua, sono state calcolate le grandezze ottiche (figura 1) utili per derivare le proprietà ottiche apparenti.

MISURE per il calcolo di Rrs (Remote sensing reflectance) (Protocollo SeaWifs)	MISURE per il calcolo di R(0-) (Subsurface radiance reflectance) e Q-factor	MISURE per il calcolo di t (0+) Air/water Transmittance interface
$Rrs(0+) = (LW 40^\circ - Lsky 40^\circ) p / WR$	$R(0-) = E_u(0-) / E_d(0-)$ $Q(0-) = E_u(0-) / L_u(0-)$	$t(0+) = E_d(0-) / E_d(0+)$
Median WR	Median $L_u(0-)$	Median $L_u(0+)$
Median Sky 40°	Median $E_d(0-)$	Median $E_d(0+)$
Median Water 40°	Median $E_u(0-)$	

**Figura 1: Misure radiometriche effettuate durante le uscite in campo per il calcolo delle grandezze ottiche utili per derivare le proprietà ottiche apparenti della colonna d'acqua.**

Lo studio della vegetazione acquatica è stato effettuato misurando esclusivamente la riflettanza delle singole specie presenti; per la vegetazione non acquatica (canneti) sono state effettuate misure di radiazione fotosinteticamente attiva. Il dato iperspettrale MIVIS è stato elaborato secondo le comuni operazioni di pretrattamento dell'immagine (georeferenziazione, ricampionamento delle bande), delle 200 bande sono state utilizzate le prime 20 bande della regione del Visibile e la banda 96 dell'Infrarosso termico (9,57535 nm). Successivamente, l'immagine MIVIS, espressa in valori di radianza, è stata corretta empiricamente forzando il dato iperspettrale da remoto a rispondere al dato di campo, tramite la creazione di ROI (Region Of Interest) con il programma ENVI 4.3.



**Figura 2:** Ubicazione delle stazioni di misura di acqua e di vegetazione (in giallo) e di terra (in verde).

Le firme spettrali delle 9 ROI di acqua sono state associate al dato di *remote sensing reflectance*  $R_{rs}$  delle firme spettrali coincidenti con le stazioni di campo. La stessa procedura è stata ripetuta per la calibrazione delle firme spettrali delle ROI di terra con le firme spettrali di campo. La calibrazione eseguita sul dato MIVIS ha permesso, quindi, di determinare i valori effettivi di riflettanza  $R_{rs}$  e  $R(0^-)$  a livello di pixel dell'immagine, cui è seguita l'applicazione di tecniche di inversione semi-analitiche per la stima della concentrazione dei parametri di qualità della colonna d'acqua. Sull'immagine corretta empiricamente, è stata applicata una maschera sulla vegetazione che, sfruttando il principio di discriminazione di radianza tra acqua e vegetazione, ha permesso di lavorare solo sui pixel ricadenti nell'acqua. Per ricavare dall'immagine i parametri otticamente attivi della colonna d'acqua ed i risultati di validazione (*Root Mean Square Error*) rispetto al dato di campo (ROI) sono stati applicati algoritmi specifici per le diverse proprietà ottiche della colonna d'acqua (clorofilla, solidi sospesi, sostanze gialle). È da precisare che purtroppo alcune aree dell'immagine MIVIS dei laghi non sono state studiate poiché interessate da *sun glittering*. Questo disturbo causato dall'assetto di volo dell'aereo rispetto alla posizione relativa sensore-specchio d'acqua-sole, è stato parzialmente corretto tramite il programma di correzione *deglintv*, ma i pixel coinvolti e corretti sono rimasti troppo disturbati per essere utilizzati. Per stimare il quantitativo di clorofilla è stato utilizzato un algoritmo idoneo per i laghi ipertrofici (Gitelson et al., 2008).

Algoritmo	$\lambda$	RMSE [G/M3]	RMSE %
<b>CHL= (235.9152*(1/b12-1/b14)*b16)+10.6981</b>	0.67 - 0.71 - 0.74	17,3 mg/m <sup>3</sup>	14%
<b>TSS = 132,376 (b6/b8) -112,447</b>	0,54 - 0,58	2,9 g/m <sup>3</sup>	14%
<b>CDOM = b19/b1</b>	0,44 - 0,79	Abbondanza relativa	
<b>T= b21</b>	9,57	0,9 (T sup. °C)	3% (T sup. °C)
		4,0 (T fluo. °C)	15% (T fluo. °C)

**Figura 3:** Algoritmi utilizzati e valori di validazione dei risultati per le proprietà ottiche della colonna d'acqua e per la temperatura superficiale.

A differenza di CHL-a e TSS, per la stima del CDOM nei laghi di Mantova non si disponeva di un sufficiente numero di dati di campo per la calibrazione di un modello semi-analitico. Per estrapolare una quantificazione delle sostanze gialle presenti si è quindi operato secondo un approccio relativo valutando l'andamento di un rapporto tra la banda 19 (non risente delle variazioni di CDOM) e la

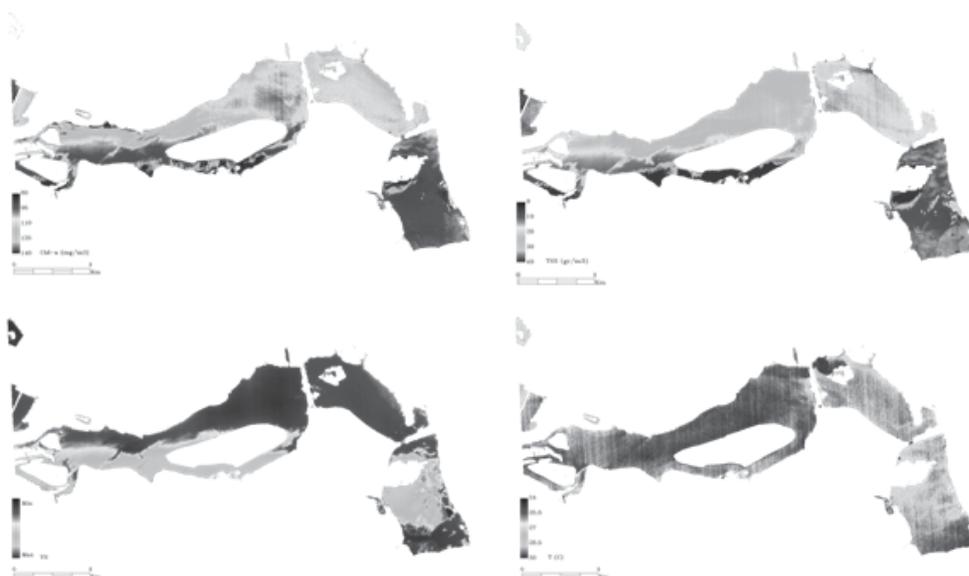
banda 1 (risente fortemente delle variazioni del CDOM). Lo studio del comparto vegetale è stato eseguito valutando la separabilità spettrale delle specie di macrofite dominanti, sia a partire dalle misure radiometriche di campo sia attraverso il confronto del dato di campo con le ROI dell'immagine corrispondenti alle stazioni di misura delle differenti specie di macrofite. Ai pixel di vegetazione è stato applicato l'indice NDVI, "Normalized Difference Vegetation Index" (Rouse, 1974).

Algoritmo	$\lambda$	RMSE [G/M3]	RMSE %
$NDVI = (p \text{ NIR} - p \text{ IR}) / (p \text{ NIR} + p \text{ IR})$	0,68 (b13) -0,81(b20)	<b>0,1</b>	<b>10%</b>

**Figura 4: Algoritmo utilizzato per le macrofite emerse e valore della validazione dei risultati.**

### Risultati

Il risultato finale è la creazione di mappe dei parametri d'acqua e di vegetazione. Le mappe, sono state inserite in un GIS, opportunamente strutturato per raccogliere tutte le informazioni relative ai dati del lavoro effettuato. Le mappe dei parametri ottici della colonna d'acqua ottenuti da MIVIS (figura 5) sono state create attraverso il tool di ENVI "Histogram parameters", che consente di equalizzare l'immagine per un predefinito range di valori, corrispondenti ai valori massimi e minimi dei parametri (figura 7). Le mappe mostrano chiaramente le condizioni d'ipertrofia dei laghi mantovani, dove nessuna area presenta una concentrazione di clorofilla inferiore a 75 mg/l (secondo i limiti OECD la condizione di ipertrofia si raggiunge quando il massimo della concentrazione supera i 75 mg/l). In particolare, è molto elevata la concentrazione nelle zone in cui si ha una minore circolazione delle acque. Le minori concentrazioni, nel lago superiore, si sono registrate in corrispondenza del canale principale del Mincio in cui sono presenti in elevata quantità praterie di macrofite emerse (canneti) e sommerse. Anche la mappa di concentrazione dei solidi sospesi totali denota la capacità della cannuccia di palude e delle altre piante acquatiche di filtrare le acque e di ridurre le concentrazioni dei solidi sospesi. Un discorso contrario emerge invece dalla mappa del CDOM: le quantità maggiori seguono il trasporto fluviale, o meglio le aree vegetate, poichè la parte vegetale che ogni anno, una volta secca, cade e si accumula nelle acque e nei sedimenti rilascia, a causa delle condizioni d'anossia, acidi umici e fulvici.



**Figura 5: Prodotti di qualità dei quattro parametri ricercati nella colonna d'acqua (clorofilla-a, solidi sospesi, sostanze gialle e temperature).**



**Figura 6:** *Mappa di NDVI, nella parte centrale del lago Superiore si nota l'isola del fior di loto caratterizzata da alti valori legati alle notevoli dimensioni e spessore delle foglie e all'elevata biomassa.*

Parametro telerilevato	Min	Max	n° di classi
CHL-a [mg/m <sup>3</sup> ]	80	140	5
TSS [g/m <sup>3</sup> ]	0	40	5
CDOM	abbondanza relativa		
T [°C]	24	30	5
NDVI	0,3	1	7

**Figura 7:** *Valori di massimo e minimo dei parametri ottici*

	AREA LAGO (m <sup>2</sup> )	AREA Macrofite (m <sup>2</sup> )	%
superiore	2564000	616800	24.06
mezzo	1081120	216720	20.05

**Figura 8:** *Attraverso l'applicazione dell'indice NDVI, supportato dalle misure di LAI (Leaf Aerea Index) effettuate nelle zone costiere, è stato possibile quantificare la copertura areale di macrofite all'interno dei laghi superiore e di mezzo, non è stato possibile in quello inferiore poiché non presente interamente nell'immagine a disposizione.*

### Conclusioni e sviluppi futuri

È purtroppo noto che la qualità delle acque dei laghi mantovani è scadente, sono troppo elevate le concentrazioni di clorofilla e di sedimenti; la maggiore circolazione delle acque, la rimozione della frazione organica che ogni anno precipita nei sedimenti, l'azione di fitodepurazione ad opera di specie vegetali (non solo dal Mincio ma da tutti gli immissari), la regolazione delle temperature e dei carichi di nutrienti apportati a lago, e la gestione della biomassa vegetale potrebbero essere azioni utili al fine di limitare le problematiche acquatiche dei laghi mantovani. In tale contesto, questo studio basato su innovative tecniche di telerilevamento iperspettrale ha confermato lo stato di degrado dell'ecosistema delle acque dei laghi. Le caratteristiche dell'ecosistema dei laghi di Mantova ha inoltre permesso di sfruttare tutte le potenzialità del sensore MIVIS per la caratterizzazione delle proprietà ottiche, sia della colonna d'acqua che della vegetazione. La mappa della concentrazione di clorofilla-a si è rivelata utile per apprezzare la distribuzione spaziale degli elevati livelli di trofia dell'ecosistema; le mappe dei solidi sospesi, di CDOM e di clorofilla-a per valutare la loro distribuzione areale in funzione delle isole di macrofite; la mappa di temperature per individuare le differenze termiche tra i laghi e gli effetti di attività industriali (zone della cartiera Burgo). La mappa di vegetazione collegata all'indice NDVI) ha permesso di discriminare con

accuratezza le praterie macrofite monospecifiche (isola fior di loto, isola di castagna d'acqua, aree a canneto), mentre non ha permesso di discriminare accuratamente quelle aree caratterizzate da più specie di macrofite che si intersecano in spazi molto ridotti (nel lago di mezzo ninfea, calamo aromatico, nannuferi, ceratofillo si alternano in pochi metri quadrati di superficie). In particolare, i risultati dell'indagine sul comportamento spettrale delle diverse specie di macrofite, si pone come nuova prospettiva per l'uso del telerilevamento nello studio di questi indicatori, il cui monitoraggio è di fatto previsto anche dalla direttiva quadro WFD 2000/60/EC.

### **Ringraziamenti**

Si desidera ringraziare Monica Pinardi dell'Università degli Studi di Parma e GianLuca Fila del Centro Rilevamento Ambientale del Comune di Sirmione per l'aiuto durante le campagne di misure. Si desidera ringraziare la Compagnia Generale delle Riprese Aeree di Parma (CISIG-CGR) per l'acquisizione dell'Immagine MIVIS.

### **Bibliografia**

- Fargion, G. S., & Mueller, J. L., (2000). Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, *Revision 2. NASA/TM-2000-209966*, Greenbelt, Maryland, USA.
- Franchini D.A., 2000, Il bacino del Mincio ed i laghi di Mantova: Batimetria dei laghi e caratteristiche qualitative delle acque. *Report Parco del Mincio*.
- Gitelson A., Dall'Olmo G., Moses W., Rundquist D., Barrow T., Fisher T., Gurlin D e Holz J., 2008, A simple, semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: validation, *Remote Sensing of Environment*, accepted.
- Osservatorio dei Laghi Lombardi, 2004, Qualità delle acque lacustri in Lombardia. Progetto a cura della Regione Lombardia, in collaborazione con: ARPA Regionale, FLA e IRSA-CNR Milano.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. e Deering D.W., 1974, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, NASA, Greenbelt, MD, pp. 301-317.
- Telò R., Pinardi M., Bartoli M., Bodini A., Viaroli P., Racchetti E., Cuizzi D., Vannuccini M., Previdi L., 2007, Caratterizzazione dello stato ambientale del fiume Mincio e analisi della strategia di riqualificazione integrata e partecipata. *Relazione conclusiva Forum del Mincio*, pp. 435.