

## **Rilievo della vegetazione sommersa della laguna di Venezia utilizzando dati LDCM/OLI simulati con dati EO-1/ALI**

Angelo Zandonella

AdTec, via Usodimare 46, 00154 Roma, angelo.zandonella@adtec-sys.com

### **Riassunto**

OLI è un sensore multispettrale della nuova serie di satelliti Landsat ed ha una miglior sensitività radiometrica e rapporto segnale rumore dell'ETM+. Date le caratteristiche dello strumento, lo scopo del lavoro è di valutare la possibilità del rilievo della vegetazione sommersa della laguna Veneta, condizionata, in particolare, dalla torbidità dell'acqua e mescolanza di più specie. La metodologia usata si basa sul riconoscimento, dei pixel contenenti classi di vegetazione e relative mescolanze, dall'analisi dei profili spettrali, e successiva stima delle "abbondanze" con un modello di stima dei pixel misti. I dati usati sono OLI simulati con dati ALI.

### **Abstract**

*OLI is a multispectral instrument of the new Landsat satellite series and has a higher radiometric sensitivity and signal to noise ratio than ETM+ sensor. For these performances, the aim of this work is to assess the automatic identification of the Venice lagoon submerged vegetation, conditioned by water turbidity and mixture of more species. Methodology used is based on pixel recognition containing vegetation classes and mixtures, by means of spectral profile analysis, and "abundance" estimation by a mixture model. OLI simulated data with ALI data are used.*

### **Introduzione**

OLI (*Operational Land Imager*) è uno degli strumenti che sarà montato a bordo dei satelliti LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) del nuovo programma Landsat. OLI è un sensore multispettrale che opera con modalità *push-broom*. Le tecnologie usate in OLI, che derivano da ALI (*Advanced Land Imager*) della missione EO-1 (*Earth Observing-1*), il nuovo disegno dello strumento, la sensitività radiometrica e rapporto segnale rumore superiore a quelli dell'ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), dovrebbero migliorare la raccolta di informazioni della superficie terrestre rispetto ai vecchi sensori della serie Landsat.

Date le caratteristiche di questo nuovo strumento, lo scopo di questo lavoro consiste nel valutare la possibilità di rilievo della vegetazione sommersa della laguna di Venezia utilizzando dati OLI simulati con dati ALI.

Le tecniche di mappatura della vegetazione sommersa della laguna Veneta, correntemente in uso, si basano ancora su rilievi *in situ* da natante ed interpretazione di foto aeree.

Anche le tecniche di telerilevamento, sia da aereo che da satellite con sensori multispettrali ed iperspettrali, sono stati utilizzati a questo scopo e da lunga data.

L'alto livello di torbidità dell'acqua, presente in alcuni bacini lagunari, la variabilità dello strato d'acqua sovrastante la vegetazione sommersa, continuamente modificato dalle condizioni di flusso e deflusso mareale, influenzano la radianza emergente della vegetazione sommersa: le differenze fra firme di specie vegetate diverse sono deboli e rilevabili solo con sensori iperspettrali (Salviato et al., 2005). Altri fattori che influenzano la radianza emergente sono: le caratteristiche granulometriche del substrato, lo stadio di crescita, lo stato di salute e la densità dei talli o delle piante. A questi si aggiungono gli effetti atmosferici, quelli speculari della superficie dell'acqua e la mescolanza fra

più specie. La mescolanza, rilevabile anche in pixel di pochi metri di risoluzione, ed il grado di copertura entro un pixel di medie dimensioni (come quelli dell'ETM+ ed OLI) generano firme composte e, quindi, pone il problema dei pixel misti (Alberotanza et al., 2006).

## Materiali e metodi

### Dati utilizzati

L'immagine EO-1 ALI utilizzata è stata acquisita il 7 giugno 2001 alle ore 9:45 sulla laguna Veneta. Per la simulazione sono state selezionate le bande ALI, corrispondenti alle bande OLI, del visibile (da 0,433 a 0,690  $\mu\text{m}$ ) per le caratteristiche di penetrazione ottica in acqua, dell'IR vicino (da 0,845 a 0,890  $\mu\text{m}$ ) per la discriminazione fra acqua torbida e pulita a livello superficiale, dell'IR medio riflesso (da 2,080 a 2,350  $\mu\text{m}$ ) per il mascheramento del corpo idrico (Tabella 1).

La risoluzione spaziale di queste bande è, per entrambi gli strumenti, la stessa di 30 m. x 30 m.

Tabella 1. Confronto fra bande EO-1/ALI e bande LDCM/OLI.

Banda #	EO-1/ALI Lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ )	Banda #	LDCM/OLI Lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ )	Denominazione Banda
ALI 1	0,480 – 0,690			Pancromatico
ALI 2	<b>0,433 – 0,453</b>	OLI 1	<b>0,433 – 0,453</b>	Blu/Aerosol
ALI 3	<b>0,450 – 0,515</b>	OLI 2	<b>0,450 – 0,515</b>	Blu
ALI 4	<b>0,525 – 0,605</b>	OLI 3	<b>0,525 – 0,600</b>	Verde
ALI 5	<b>0,630 – 0,690</b>	OLI 4	<b>0,630 – 0,680</b>	Rosso
ALI 6	0,775 – 0,805			IR Vicino
ALI 7	<b>0,845 – 0,890</b>	OLI 5	<b>0,845 – 0,885</b>	IR Vicino
ALI 8	1,200 – 1,300			IR Medio Riflesso
ALI 9	1,550 – 1,750	OLI 6	1,560 – 1,660	IR Medio Riflesso
ALI 10	<b>2,080 – 2,350</b>	OLI 7	<b>2,100 – 2,300</b>	IR Medio Riflesso
		OLI 8	0,500 – 0,680	Pancromatico
		OLI 9	1,360 – 13,90	IR Medio Rifl./Cirri

I dati di verità (specie vegetate e percentuale di copertura) sono stati rilevati, da natante, l'8 giugno 2001 per le macroalghe bentiche, mentre per le fanerogame marine sono stati usati quelli rilevati durante la campagna di maggio-settembre del 2002 (Rismondo et al., 2003).

### Condizioni ambientali

Al momento dell'acquisizione era presente un velo atmosferico abbastanza denso. Nei bacini lagunari Settentrionale e Centrale era presente un alto livello di torbidità, dovuta ai sedimenti rimessi in sospensione dallo stress superficiale del vento, tale da non permettere il riconoscimento della vegetazione sommersa in alcune zone della laguna. La marea era in fase crescente con un livello medio mareale, rilevato dal mareografo di Punta della Salute, di 45 cm. Lo spessore d'acqua stimato, sovrastante la vegetazione sommersa a diverse profondità, era mediamente di 80-90 cm.

### Correzioni atmosferiche

Sono state effettuate utilizzando il modulo FLAASH di ENVI™.

FLAASH è un modulo software di correzioni atmosferiche basato su MODTRAN4. Dalle proprietà atmosferiche (albedo e altitudine superficiale, colonna del vapor acqueo, profondità ottica di nuvole e aerosol, temperatura atmosferica e superficiale) viene ricavata fisicamente la riflettanza apparente della superficie terrestre.

FLAASH opera nell'intervallo spettrale fra 0,35 – 2,50 micron di lunghezza d'onda.

Il modello di derivazione delle proprietà atmosferiche e della superficie terrestre utilizza MODTRAN4, inoltre, tiene conto degli effetti del *mixing* delle radianze fra pixel vicini, dovuti allo *scattering* atmosferico. Una descrizione dettagliata del modello è riportata in FLAASH, 2005.

Le immagini a colori quasi naturali dell'area di studio prima e dopo le correzioni atmosferiche sono riportate nelle Figure 1a. e 1b.



Figura 1. Immagine a colori quasi naturali prima (a.) e dopo (b.) le correzioni atmosferiche.

### **Torbidità e strato d'acqua sovrastante la vegetazione**

Entrambi i fenomeni hanno come effetti una attenuazione del segnale. Un aumento della torbidità comporta anche uno spostamento delle riflettanze verso livelli più brillanti, mentre un aumento dello strato d'acqua uno spostamento delle riflettanze verso valori più scuri.

Questi fenomeni non modificano i profili (o andamenti) delle curve di riflettanza: i massimi, i minimi, i flessi rimangono invariati (Figure 2 e 3). Tale invarianza, nell'intervallo spettrale del visibile, trova conferma anche dalle 700 misure di riflettanza delle fanerogame marine rilevate *in situ* nella laguna di Venezia durante la campagna del 2002 (Salviato et al., 2005).

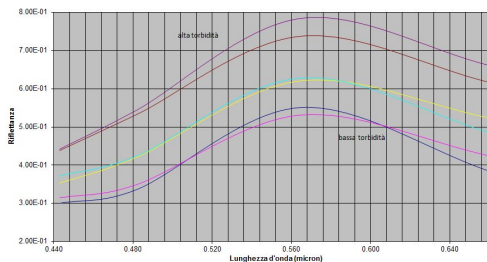


Figura 2. Macroalghe bentiche. Campione di spettri rilevati in varie condizioni di torbidità dell'acqua e stesso strato d'acqua sovrastante la vegetazione.

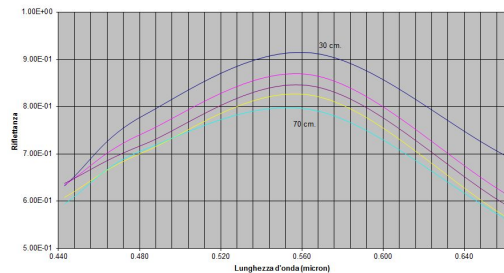


Figura 3. Fanerogame marine. Campione di spettri rilevati in condizioni di trasparenza dell'acqua e diverso strato d'acqua sovrastante la vegetazione.

L'alto livello di torbidità, presente soprattutto nei bacini Settentrionale e Centrale, può essere desunto dalla stima della CSS (Concentrazione dei Sedimenti in Sospensione). L'immagine di stima della CSS, ottenuta come somma delle riflettanze delle bande del verde (da 0,525 a 0,605  $\mu\text{m}$ ) e dell'IR vicino (da 0,845 a 0,890  $\mu\text{m}$ ), è riportata nella Figura 4.

Per le condizioni di torbidità dell'acqua non è stato possibile applicare metodi di compensazione degli effetti dello strato d'acqua sulle riflettanze della vegetazione sommersa per tutta la laguna. Questi metodi richiedono la conoscenza delle caratteristiche di attenuazione della colonna d'acqua. Il metodo di Lyzenga, 1981, ad esempio, richiede che il coefficiente di attenuazione diffuso sia spazialmente costante. Questo si ha in condizioni di trasparenza dell'acqua o di livelli minimi e costanti di torbidità, condizioni valide solo per alcune zone della laguna.

### Estrazione degli spettri puri dalle immagini

Per ciascuna specie di macroalghe bentiche (*Ulva rigida*, *Gracilaria confervoides*, *Chaetomorpha aerea*, *Enteromorpha*) e di fanerogame marine (*Zostera marina*, *Zostera noltii*, *Cymodocea nodosa*) sono stati estratti gli spettri puri da aree di campionamento con il 100% di copertura ed in condizioni di trasparenza dell'acqua. Le aree sono state identificate sulla base dei rilievi da natante. Gli spettri dei fondali privi di vegetazione sono stati estratti da aree di campionamento identificate dall'analisi delle immagini e dei rilievi accennati, sempre in condizioni di trasparenza dell'acqua. Gli spettri puri sono stati quindi composti ottenendo uno "spettro medio" delle macroalghe, delle fanerogame e dei fondali privi di vegetazione (Figura 5). Le differenze fra spettri medi delle macroalghe e delle fanerogame può essere dovuto alle diverse fasi di sviluppo vegetativo al momento dell'acquisizione dell'immagine.

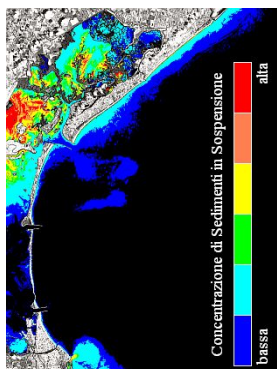


Figura 4. Immagine di stima della CSS.

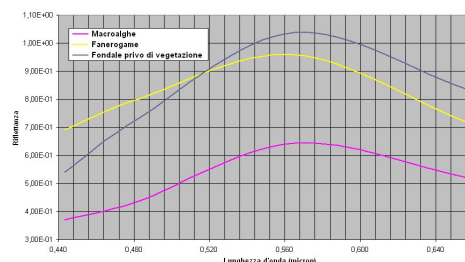


Figura 5. Spettri medi.

### Confronto fra profili spettrali di oggetti al suolo

Il metodo proposto si basa sulla distanza di Hamming fra differenze prime di curve di riflettanza. Per ciascun pixel, inteso come vettore dei valori di riflettanza di bande spettrali, viene associato un vettore di costanti (intere e positive) definite in relazione all'andamento di tali valori in successivi intervalli spettrali. Ciò si ottiene effettuando le differenze prime fra tali valori. Il vettore di costanti così definito viene comparato con l'analogo vettore di un pixel di riferimento. Formalmente siano:

$N$  Il numero di bande spettrali.

$[w_k]$  Il vettore di  $N-1$  costanti associato ad un dato pixel le cui componenti vengono ottenute dalle differenze prime fra i valori di riflettanza delle bande  $b_{i+1}$  e  $b_i$  per  $i = \{1, \dots, N\}$  e  $k = \{1, \dots, N-1\}$  nel modo seguente:

$$w_k = \begin{cases} 3 & \text{se } b_{i+1} - b_i > 0 & \text{andamento (nell'intervallo) crescente} \\ 2 & \text{se } b_{i+1} - b_i = 0 & \text{andamento costante} \\ 1 & \text{se } b_{i+1} - b_i < 0 & \text{andamento decrescente} \end{cases}$$

$[w_k^{\text{rif}}]$  Il vettore di costanti, definite in modo analogo, ottenuto dalle differenze prime fra le riflettanze delle bande  $b_{i+1}$  e  $b_i$  di un pixel di riferimento.

$\otimes$  L'operatore logico **XOR**.

Allora il profilo della curva di riflettanza del pixel è simile a quello del pixel di riferimento se:

$$\sum_{k=1}^{N-1} (w_k \otimes w_k^{\text{rif}}) = 0 \quad [1]$$

### **Analisi della similitudine spettrale fra pixel e pixel di riferimento**

Il metodo proposto è stato applicato a ciascun pixel del corpo idrico della laguna.

Solo i pixel con profilo spettrale simile a quello delle macroalghe, fanerogame e composizione di macroalghe, fanerogame, fondali privi di vegetazione presi a due a due, e presi a tre a tre sono usati per la stima delle “abbondanze” (frazioni di superficie del pixel dovute ai diversi contributi) mediante un modello di stima dei pixel misti.

Ogni pixel viene comparato con sei diversi pixel di riferimento, ottenuti dagli spettri medi delle macroalghe e fanerogame presi distintamente e dagli spettri medi composti delle macroalghe, fanerogame e fondali privi di vegetazione presi a due a due e presi a tre a tre.

Se vi è similitudine spettrale fra il pixel e almeno uno dei pixel di riferimento allora il pixel viene selezionato per la stima delle “abbondanze”.

Nella Figura 6a. è riportata l’immagine delle differenze prime e similitudine spettrale. Nella Figura 6b. viene evidenziato un particolare della vegetazione sommersa a diversi livelli di CSS.

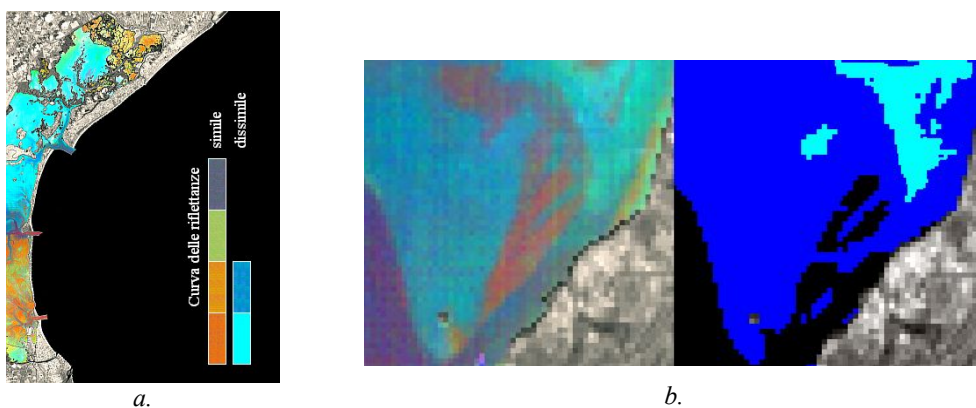


Figura 6. Immagine delle differenze prime e similitudine spettrale (a.) - Particolare (b.)

### **Modello di stima dei pixel misti**

I modelli di pixel misti proposti in letteratura sono, come è noto, di tipo lineare o non lineare.

I modelli lineari sono utilizzati da lungo tempo ed hanno permesso di ottenere anche risultati utili. L’ipotesi assunta in questi modelli è che ciascuna componente di materiale entro un dato pixel sia abbastanza grande da non creare riflessioni multiple della radiazione solare fra le componenti (Singer, McCord, 1979). Le riflettanze del pixel sono quindi assunte come combinazioni lineari di spettri puri di un insieme finito di componenti. Il modello viene rappresentato come un sistema di equazioni lineari vincolate. Per poter utilizzare questi modelli è richiesta l’ortogonalità spettrale delle componenti.

I modelli non lineari tengono conto delle riflessioni multiple fra le componenti di materiale: la radiazione solare incidente su una piccola superficie di una componente interagisce con più componenti prima di essere rilevata dal sensore. Questi tipi di modelli sono quindi un’alternativa per superare i limiti di quelli lineari. Molti sono i modelli non lineari proposti in letteratura. Vanno da quelli basati sulla riflettanza bidirezionale (Hapke, 1981) ai bilineari proposti in lavori più recenti (Halimi et al., 2011). Da un punto di vista formale questi modelli vengono rappresentati come dei sistemi di equazioni non lineari vincolate.

La scelta del modello non è semplice. Si può, infatti, incorrere in una errata specificazione del modello e/o in una errata specificazione della forma funzionale, con conseguenze sull’accuratezza dei risultati ottenibili. Precisamente:

- se vengono omesse delle variabili importanti (interazioni di vario ordine fra spettri puri dell’insieme di componenti) la stima del pixel misto è distorta;

- se vengono aggiunte variabili superflue (interazioni inesistenti fra spettri puri) la varianza del pixel misto stimato aumenta.

Per le difficoltà di conoscere le interazioni fra spettri puri il criterio, utilizzato in questa applicazione, consiste nella:

- definizione di una serie di modelli che tengano conto delle interazioni di primo, secondo e terzo ordine fra gli spettri puri delle componenti di materiale entro il pixel e quindi nella
- scelta del modello il cui coefficiente di variazione fra valori osservati (valori di riflettanza del pixel) e quelli stimati risulti minimo.

La forma funzionale scelta è quella di tipo polinomiale. Quelle proposte in letteratura sono polinomiali, sigmoidali e combinazioni fra polinomiali e sigmoidali. Formalmente, siano:

**N** Numero di bande spettrali.

**y** = [y<sub>i</sub>] Vettore dei valori di riflettanza del pixel (valori osservati), per i = {1,...,N}.

**y<sub>r</sub><sup>mix</sup>** = [y<sub>r</sub><sup>mix</sup>] Vettore dello spettro del pixel misto stimato con il modello non lineare misto 'r'.

**s<sub>m</sub>, s<sub>f</sub>, s<sub>b</sub>** Vettori degli spettri puri (endmember) delle macroalghe (**m**), delle fanerogame (**f**) e dei fondali privi di vegetazione (**b**).

**a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>** Fattori che contribuiscono agli effetti di mescolanza di primo ordine (riflessione singola della radiazione solare) fra spettri delle macroalghe (**m**), delle fanerogame (**f**) e dei fondali (**b**).

**b<sub>mf</sub>, b<sub>mb</sub>, b<sub>fb</sub>** Fattori che contribuiscono agli effetti di mescolanza di secondo ordine (riflessioni multiple della radiazione solare) fra spettri delle macroalghe e fanerogame (**mf**), macroalghe e fondale (**mb**), fanerogame e fondali (**fb**).

**c<sub>mfb</sub>** Fattore che contribuisce agli effetti di mescolanza di terzo ordine fra spettri delle macroalghe, fanerogame e fondali (**mfb**).

**Φ<sub>m</sub>, Φ<sub>f</sub>, Φ<sub>b</sub>, Φ<sub>mf</sub>, Φ<sub>mb</sub>, Φ<sub>fb</sub>, Φ<sub>mfb</sub>** Frazioni della superficie del pixel (abbondanze) dovute ai diversi contributi. La somma delle frazioni è uguale ad 1.

I modelli di stima del mescolanza entro un dato pixel presi in esame sono i seguenti:

$$y_1^{\text{mix}} = a_m s_m + a_b s_b + b_{mb} s_m s_b \quad [ 2 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>mb</sub> ≥ 0**

$$y_2^{\text{mix}} = a_m s_m + a_f s_f + b_{mf} s_m s_f \quad [ 3 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, b<sub>mf</sub> ≥ 0**

$$y_3^{\text{mix}} = a_f s_f + a_b s_b + b_{fb} s_f s_b \quad [ 4 ]$$

per **a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>fb</sub> ≥ 0**

$$y_4^{\text{mix}} = a_m s_m + a_f s_f + a_b s_b + b_{mf} s_m s_f + b_{mb} s_m s_b \quad [ 5 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>mf</sub>, b<sub>mb</sub> ≥ 0**

$$y_5^{\text{mix}} = a_m s_m + a_f s_f + a_b s_b + b_{mf} s_m s_f + b_{fb} s_f s_b \quad [ 6 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>mf</sub>, b<sub>fb</sub> ≥ 0**

$$y_6^{\text{mix}} = a_m s_m + a_f s_f + a_b s_b + b_{mb} s_m s_b + b_{fb} s_f s_b \quad [ 7 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>mb</sub>, b<sub>fb</sub> ≥ 0**

$$y_7^{\text{mix}} = a_m s_m + a_f s_f + a_b s_b + b_{mf} s_m s_f + b_{mb} s_m s_b + b_{fb} s_f s_b \quad [ 8 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>mf</sub>, b<sub>mb</sub>, b<sub>fb</sub> ≥ 0**

$$y_8^{\text{mix}} = a_m s_m + a_f s_f + a_b s_b + b_{mf} s_m s_f + b_{mb} s_m s_b + b_{fb} s_f s_b + c_{mfb} s_m s_f s_b \quad [ 9 ]$$

per **a<sub>m</sub>, a<sub>f</sub>, a<sub>b</sub>, b<sub>mf</sub>, b<sub>mb</sub>, b<sub>fb</sub>, c<sub>mfb</sub> ≥ 0**

La soluzione di ciascuno di questi sistemi di equazioni viene trovata con l'applicazione di un algoritmo di approssimazione al problema dei minimi quadrati non lineari vincolati.

Fra questi r-modelli viene scelto, per ciascun pixel, quello il cui coefficiente di variazione fra valori osservati e valori stimati sia minimo:

$$\min_r \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N y_{ri}^{\text{mix}}\right)/N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ri}^{\text{mix}})^2 / N} \quad \text{per } r = \{1, \dots, 8\} \quad [10]$$

Il modello viene “accettato” se il coefficiente di variazione risulta inferiore al valore convenzionale di 0,1. Nell’ipotesi contraria il pixel non viene classificato in quanto vi sono dubbi sulla significatività dell’accostamento e quindi sulla stima ed assegnazione delle abbondanze alle classi. Nell’ipotesi in cui venga “accettato” il modello  $r = 8$  [ 9 ] le frazioni di superficie del pixel, dovute ai diversi contributi, vengono così calcolate:

$$a_m + a_f + a_b + b_{mf} + b_{mb} + b_{fb} + c_{mfb} = M \quad [11]$$

$$\varphi_m = a_m/M, \quad \varphi_f = a_f/M, \quad \varphi_b = a_b/M, \quad \varphi_{mf} = b_{mf}/M, \quad [12]$$

$$\varphi_{mb} = b_{mb}/M, \quad \varphi_{fb} = b_{fb}/M, \quad \varphi_{mfb} = c_{mfb}/M$$

### Risultati

Le mappe di stima delle frazioni di macroalghe bentiche e fanerogame marine nel pixel sono riportate nelle Figure 7 e 8. La mappa di stima della distribuzione delle macroalghe, fanerogame e relative mescolanze nella Figura 9.

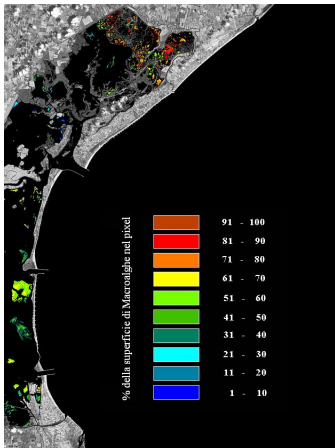


Figura 7. Macroalghe bentiche.

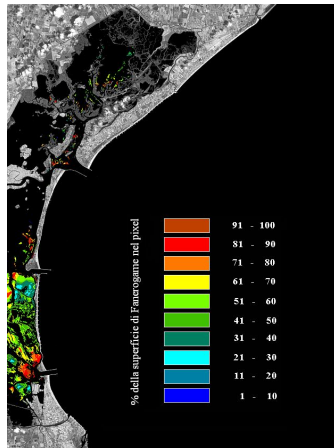


Figura 8. Fanerogame marine.

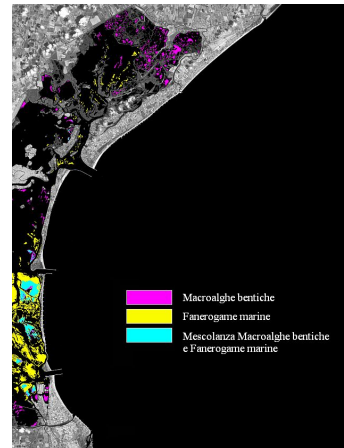


Figura 9. Macroalghe, fanerogame e mescolanze

Un’idea sull’accuratezza dei risultati ottenuti si può avere da un confronto fra particolari delle mappe di stima delle frazioni di macroalghe nel pixel dell’immagine acquisita il 7 giugno 2001 e le mappe dei rilievi da natante effettuati l’8 giugno 2001. Nelle Figure 10 e 11 sono riportati dei particolari nella zona di Chioggia. Nella Figura 12 è riportato, invece, un particolare di tali mappe, nella zona dell’aeroporto di Tesserà. L’alto livello di torbidità dell’acqua, osservabile dall’immagine della CSS, non ha permesso il riconoscimento di tutta la massa algale rilevata da natante. Le frazioni di macroalghe nel pixel corrispondono ai rilievi. Vi sono delle differenze nella forma della massa algale, presumibilmente attribuibili alle difficoltà di una restituzione planimetricamente corretta dai soli rilievi natante, ovvero senza l’ausilio di foto aeree.

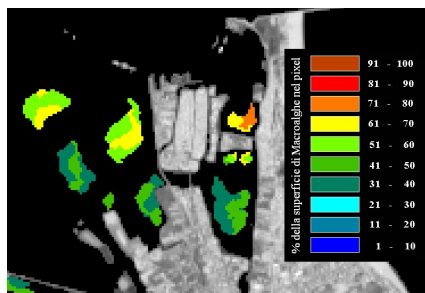


Figura 10. Frazioni di macroalghe nel pixel.

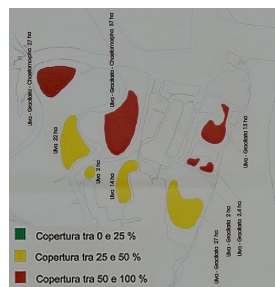


Figura 11. Macroalghe. Rilievi da natante.

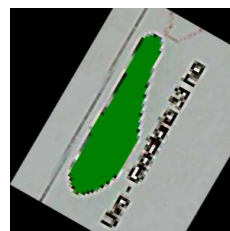
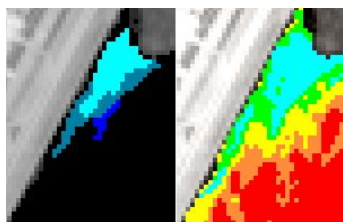


Figura 12. Frazioni di macroalghe nel pixel, stime della CSS e rilievi da natante.

## Conclusioni

La metodologia usata si basa sull'invarianza, nelle lunghezze d'onda del visibile, dei massimi, dei minimi e dei flessi dei profili delle curve di riflettanza della vegetazione sommersa agli effetti di una moderata torbidità e spessore d'acqua sovrastante. I pixel contenenti frazioni di vegetazione sommersa vengono identificati associando, a ciascun pixel, un vettore di costanti definite in relazione all'andamento delle riflettanze in successivi intervalli spettrali e mediante un particolare uso della distanza di Hamming. Ai pixel, così identificati, viene applicato un metodo di stima delle "abbondanze" disegnato per tener conto degli effetti delle riflessioni multiple fra spettri puri ed una corretta stima ed assegnazione delle "abbondanze" alle classi.

Il software del confronto fra profili spettrali è stato sviluppato in IDL (*Iterative Data Language*) mentre quello di stima dei pixel misti in ambiente MATLAB™, su un sistema *cloud computing*.

## Riferimenti bibliografici

- Alberotanza L., Cavalli R., Pignatti S., Zandonella A. (2006), "Classification of submersed aquatic vegetation of the Venice lagoon using MIVIS airborne data", *Annals of Geophysics*, 1:271-276.
- FLAASH (2005), "ENVI™ FLAASH Module User's Guide", [http://geol.hu/data/online\\_help/The\\_ENVI\\_FLAASH\\_Model.html](http://geol.hu/data/online_help/The_ENVI_FLAASH_Model.html)
- Halimi A., Altmann Y., Dobigeon N., Tourneret J-Y (2011), "Nonlinear unmixing of hyperspectral images using a generalized bilinear model", *IEEE Trans. On Geosc. and R. S.*, 11:4153-4162.
- Hapke B.W. (1981), "Bidirectional reflectance spectroscopy. I. Theory," *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, 3039-3054.
- Lyzenga D.R. (1981), "Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data", *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 2, 1:71-82.
- Rismondo A., Curiel D., Scarton F., Mion D., Caniglia G. (2003), "A new seagrass map of the Venice lagoon", *Proc. of the Sixth Int. Conf on the Mediterranean Coastal Env.*, vol. 2, 843-852.
- Salviato S., Barbaro J., Braga F., Alberotanza L. (2005), "Analisi spettrale delle fanerogame marine in laguna di Venezia", *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 33/34:91-107.
- Singer, R. B., McCord T.B. (1979), "Mars: Large-scale mixing of bright and dark surface materials and implications for analysis of spectral reflectance", *Proc. Lunar Sci. Conf.* 10:1835-1848.