

ANALISI MULTITEMPORALE DELLA TORBIDITÀ NELLA LAGUNA DI VENEZIA UTILIZZANDO IMMAGINI STORICHE DEI SATELLITI LANDSAT

Luigi ALBEROTANZA (*), Angelo ZANDONELLA (**)

(*) CNR-ISMAR, Castello 1364/A, 30122 Venezia, e-mail: luigi.alberotanza@ismar.cnr.it

(**) Consulente in Remote Sensing, Via Usodimare 46, 00154 Roma, e-mail: angelo.zandonella@ieee.org

Riassunto

L'evoluzione della torbidità nella laguna di Venezia è stata ricostruita sulla base di dati di stima della Concentrazione dei Sedimenti in Sospensione ottenuta dall'elaborazione di 40 immagini Landsat TM ed ETM+ acquisite nel periodo 1984-2001.

Per rendere comparabili immagini acquisite in tempi diversi, le immagini sono state normalizzate rispetto ai parametri di geometria dell'illuminazione solare ed agli oggetti della scena scuri.

Abstract

Venice lagoon water turbidity evolution was studied by using Suspended Sediment Concentration estimation data, retrieved by 40 Landsat TM and ETM+ images collected from different years in the period 1984-2001. To compare images acquired in different time periods, selected images were normalized with respect solar illumination geometry parameters and dark scene objects.

Introduzione

La presenza di torbide in sospensione nella Laguna di Venezia dipende da un certo numero di fattori che influiscono in modo diverso su tale fenomeno anche in relazione alle loro concomitanze.

Tali fattori sono: le immissioni dei vari corsi d'acqua che in essa vi sfociano; le correnti di marea; il vento ed il conseguente moto ondoso da esso generato; l'azione dell'uomo.

L'azione antropica è determinante nella mobilitazione dei sedimenti sia nella immissione che, soprattutto, nella rimessa in sospensione. Concorrono a tale azione molteplici contributi individuabili in: scarichi industriali e urbani; moto ondoso causato dal transito delle navi e dei natanti; sistemi di pesca, per lo più abusiva, praticata nei bassi fondali con sistemi meccanici; lavori di banchinamento lungo le barene con terminazioni di ricostruzione morfologiche.

Lo scopo di questo lavoro consiste nel contribuire a delineare, da un punto di vista qualitativo, l'andamento storico della torbidità delle acque della laguna di Venezia, nel periodo 1984 – 2001, utilizzando immagini storiche acquisite dai satelliti della serie Landsat con i sensori TM ed ETM+.

L'evoluzione della torbidità è stata ricostruita sulla base di dati di stima della CSS (Concentrazione dei Sedimenti in Sospensione) ottenuta dall'elaborazione di tali immagini.

Le immagini utilizzate (40) provengono dall'archivio del Servizio Informativo del MAV (Magistrato alle Acque di Venezia). La selezione è stata svolta secondo criteri di assenza di copertura nuvolosa, di limitato degrado residuo dovuto al sensore e di interpretabilità per lo studio dei sedimenti in sospensione. Ciò ha portato a privilegiare immagini acquisite tra la tarda primavera e la stagione estiva (minore copertura nuvolosa) e tra esse quelle acquisite in marea di sizigie, condizioni in cui la maggiore escursione di marea e le correnti associate rendono più marcata la variabilità spazio-temporale della torbidità.

Il lavoro è suddiviso in due parti. La prima riguarda la metodologia usata per la produzione degli elaborati. La seconda l'analisi della distribuzione delle torbide mediante interpretazione visiva.

Stima della CSS

I dati di stima della CSS sono ottenuti dall'immagine sintetica della **somma delle riflettanze normalizzate** delle bande del verde e dell'infrarosso vicino: bande 2 e 4 dei sensori TM ed ETM+. La relazione fra CSS e riflettanza spettrale nelle regioni del verde e infrarosso vicino è riportata in letteratura da numerosi Autori (cfr., ad esempio, Wezernak et al., 1996, Han, 1997, Tolk et al., 2000). In tali regioni la correlazione fra riflettanza spettrale e CSS risulta massima mentre la correlazione fra clorofilla e riflettanza spettrale risulta minima. Nella regione del verde le stime della CSS vengono effettuate lungo la colonna d'acqua fino ad una profondità correlata, a sua volta, alla concentrazione dei sedimenti ed alla penetrazione della luce nel corpo idrico. Nella regione dell'infrarosso vicino le stime della CSS vengono effettuate sulla superficie dell'acqua.

Le mappe prodotte della CSS sono a livello qualitativo: vanno da bassa ad alta concentrazione.

Normalizzazione delle riflettanze

I dati di radianza dei sensori TM ed ETM+ possono essere facilmente convertiti in dati di riflettanza spettrale al sensore, utilizzando le procedure riportate in Chander e Markham, 2003 per il TM e NASA, 2004 per l'ETM+.

Nella stima della riflettanza spettrale un grosso peso è dato dall'angolo solare zenitale. Tale dato, riportato nei file di header delle varie bande, è calcolato per il centro della scena acquisita. Questo dato varia dal centro verso i bordi della scena con implicazioni non trascurabili sulla accuratezza dei valori di riflettanza. Per questa ragione l'angolo solare zenitale, utilizzato nel lavoro per la stima delle riflettanze, è stato calcolato nel punto di coordinate Lat N 45:23 e Lon E 12:25.

Lo scopo della normalizzazione delle riflettanze, rispetto ai parametri di geometria dell'illuminazione solare e agli oggetti più scuri della scena, è quello di rendere comparabili le immagini acquisite in tempi diversi, riducendo o eliminando, dalle stime della CSS, gli effetti di fattori estranei come: fondali sabbiosi, vegetazione del fondo emersi, macroalghe in marcescenza, aree anossiche o fortemente eutrofizzate, effetto dello scintillio del sole sulla superficie dell'acqua.

Una descrizione formale della procedura è riportata in ALLEGATO.

Analisi dei fattori influenzanti la torbidità dell'acqua

Alcuni esempi di tali fattori, riscontrati nelle varie immagini, sono riportati nel seguito.

Immagine acquisita il 26 giugno 1990 alle ore 9:34. Il basso livello mareale (- 7 cm. a Punta della Salute) mostra ampie coperture di vegetazione del fondo (Figura 1). Aree anossiche sono presenti in alcune zone nel Bacino Centrale nonché tra S. Erasmo e Tesserà (Figura 3). I sedimenti rimessi in sospensione (colori rosso e arancione nelle mappe di stima della CSS) lungo i canali di Tesserà, S. Secondo, V. Emanuele, Petroli-Fusina sono dovuti al *traffico acqueo*. Quelli lungo il canale di S. Spirito sono dovuti ai *lavori di ricostruzione delle barene e della morfologia lagunare* (Figura 2).

In tale Figura si può anche osservare che, nella mappa della CSS, sono escluse le zone anossiche e con presenza di vegetazione del fondo. Ciò è dovuto alla normalizzazione delle riflettanze.

Immagine acquisita il 7 maggio 1995 alle ore 9:00. Il livello di marea e basso (- 16 cm. a Punta della Salute), nella fase di stanca dopo il deflusso, con vento debole da E di 3 nodi. I sedimenti rimessi in sospensione lungo i canali di Tesserà e S. Secondo sono dovuti al *traffico acqueo* ed alla *marea uscente*; lungo i canali di S. Spirito, V. Emanuele e dei Petroli al *traffico acqueo* (Figura 4).

Immagine acquisita il 20 aprile 1998 alle ore 9:35. La marea è in fase calante (+ 11 cm. a Punta della Salute) con debole vento da SSE di 3 nodi. Sono osservabili nel Bacino Centrale vistose tracce di *pesca abusiva* con effetti sulla messa in sospensione dei sedimenti. L'alta torbidità nel canale di Tesserà è dovuta al *traffico acqueo* ed ai *lavori di ricostruzione delle barene* (Figura 5).

Immagine acquisita il 16 marzo 2000 alle ore 9:51. La marea è calante con un livello ancora sostenuto (+ 31 cm. a Punta della Salute). Il forte vento da SSE di 8 nodi concorre a mantenere e addossare la torbidità nelle aree controvento come lungo i bordi della Laguna. L'*effetto del vento* accelera i fenomeni di messa in sospensione dei materiali delle gengive dei canali (canale di S. Spirito, canale S. Felice, ecc.) (Figura 6).



Figura 1 – Particolare dell'immagine acquisita il 26 giugno 1990 alle ore 9:34.

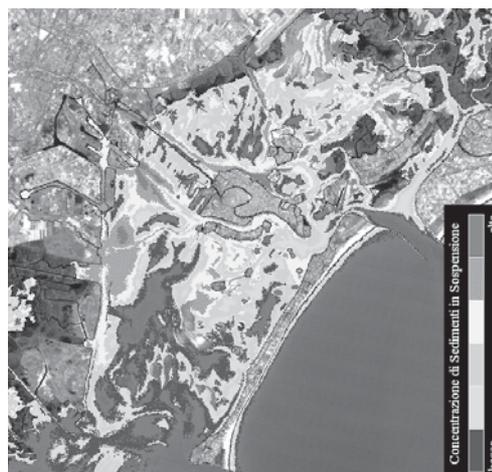


Figura 2 – Particolare della mappa della CSS dell'immagine del 26 giugno 1990.

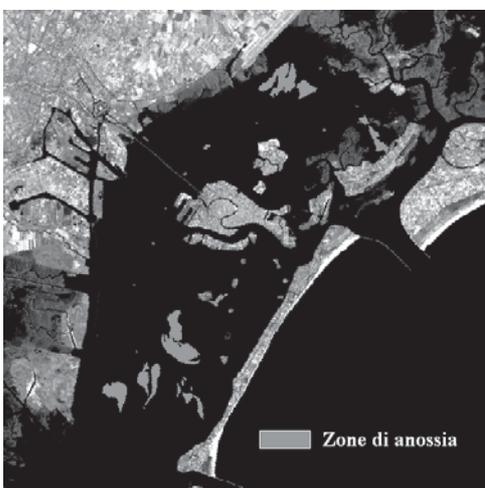


Figura 3 – Particolare della mappa delle zone di anossia dell'immagine del 26 giugno 1990.

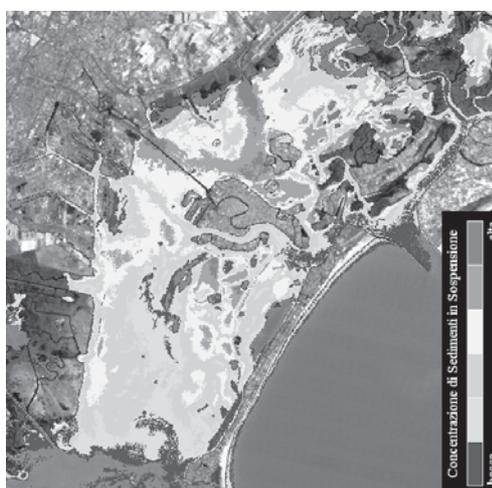


Figura 4 – Particolare della mappa della CSS dell'immagine del 7 maggio 1995.

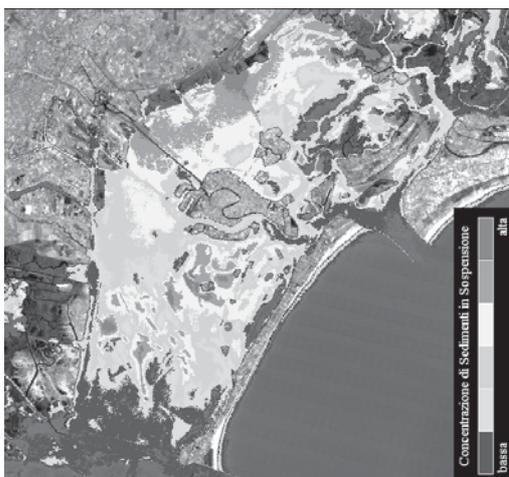


Figura 5 – Particolare della mappa della CSS dell'immagine del 20 aprile 1998.



Figura 6 – Particolare della mappa della CSS dell'immagine del 16 marzo 2000.

Altri fenomeni che contribuiscono alla torbidità delle acque lagunari sono i *fenomeni di ipossia o anossia* nella colonna d'acqua, osservabili nelle immagini a colori quasi naturali come acque bianche, e le *macroalghe in marcescenza* (Figure 7 e 8). Questi fenomeni sono, come è noto,

imputabili alla decomposizione macroalgale ed erano osservabili in particolare negli anni di grossa diffusione macroalgale.



Figura 7 – Particolare dell'immagine acquisita il 3 agosto 1984 alle ore 9:33.

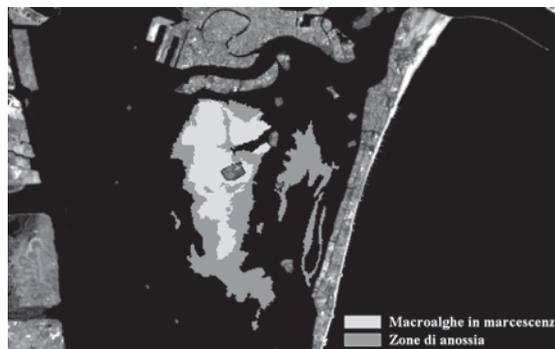


Figura 8 – Mappa delle Macroalghe in marcescenza e delle Zone di Anossia.

Considerazioni sull'evoluzione della torbidità ricavate dall'analisi storica delle immagini

A partire dagli anni '90 vi sono state le maggiori variazioni ambientali. Le più evidenti riguardano:

- Le grandi quantità di *biomasse macroalgali* presenti. Probabilmente il periodo parossistico è stato a metà degli anni '80. Da tale periodo le macroalghe tendono gradatamente a diminuire come pure i fenomeni di anossia. Questo ha comportato una graduale messa a nudo di parte dei fondali rendendoli, di conseguenza, molto più vulnerabili all'azione del vento e del moto ondoso, soprattutto da quello generato dal traffico acquico.
- Il miglioramento ambientale coincide con tutta una serie di elementi quali l'entrata in funzione del depuratore consortile di Fusina, una diminuzione delle attività industriali e, probabilmente, da mutate condizioni climatologiche (limitate precipitazioni, forti periodi di insolazione, ecc.).
- In tale periodo sono iniziati anche i lavori per la *ricostruzione della morfologia lagunare e di barene artificiali* (canale Poveglia-S.Spirito) con l'obiettivo di far ravvivare la circolazione originaria lagunare fortemente modificata dalla costruzioni di grandi canali di navigazione e di proteggere alcune aree dallo smantellamento dovuto al *moto ondoso del traffico acquico*.
- Il *traffico acquico* è notevolmente aumentato in particolare lungo alcune direttrici come il Canale di S. Secondo e quello di Tessera. Appare sempre sostenuto nel bacino di S. Marco ed alle Fondamente Nuove.
- La *pesca abusiva delle vongole*, mediante sistemi meccanici di aratura dei fondali, diventa invasiva a partire dal '94. Inizia in maniera alquanto estensiva nel Bacino Centrale per poi estendersi anche nella Laguna Nord (area antistante Tessera).
- Continui apporti di torbide fluitate si hanno da parte del fiume Dese, generalmente nella palude a nord di Burano attraverso i profondi ghebbi.

Evoluzione temporale delle torbide nel periodo 1984-2001

Ai fini di valutare l'evoluzione temporale dei livelli di torbidità in Laguna, per ognuna delle 40 immagini elaborate è stata calcolata l'estensione degli areali delle diverse classi di torbidità, eseguendo questa analisi separatamente per ognuno dei quattro sottobacini lagunari (Figura 9).

Considerando l'oscillazione residua degli areali, legata a numerose variabili, si nota un chiaro incremento dell'estensione delle aree a media-alta torbidità (classi da 4 a 6) per il sottobacino centro-settentrionale (da 1500 - 3000 ha a 4000 - 6000 ha) e per quello settentrionale (da 500 - 2000 ha a 2000 - 5000 ha), mentre la distribuzione della torbidità nei due sottobacini meridionali appare sostanzialmente invariata nel tempo (Figure 12 e 13). In particolare il sottobacino Sud risulta caratterizzato da una permanente larga predominanza di aree a bassa torbidità.

La Figura 14 riporta infine l'estensione delle aree a diversa torbidità nei quattro sottobacini, così come risultante dalle immagini selezionate, relative al triennio 1999-2001.

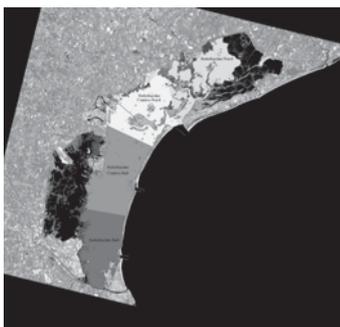


Figura 9 – Sottobacini lagunari.

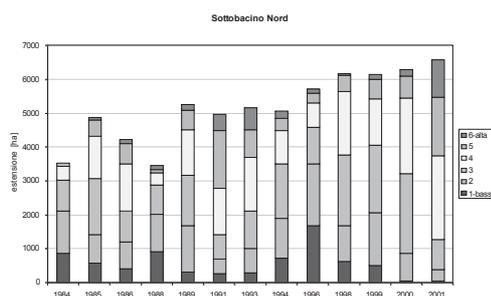


Figura 10 - Sottobacino Nord: estensione degli areali a diverso grado di torbidità.

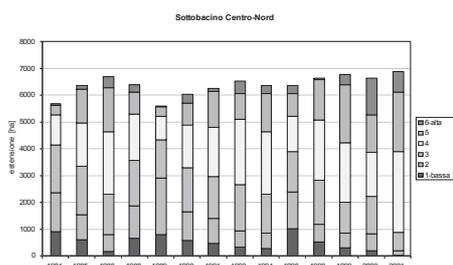


Figura 11-Sottobacino Centro-Nord: estensione degli areali a diverso grado di torbidità.

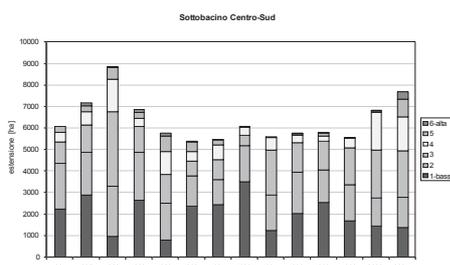


Figura 12- Sottobacino Centro-Sud: estensione degli areali a diverso grado di torbidità.

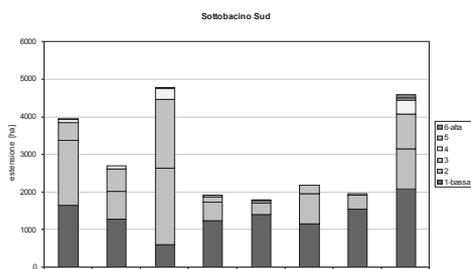


Figura 13 – Sottobacino Sud: estensione degli areali a diverso grado di torbidità.

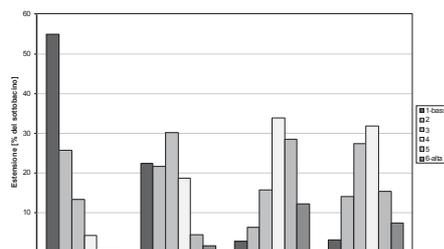


Figura 14 - Estensione recente (1999 – 2001) delle aree a diversa torbidità nei quattro sottobacini lagunari.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto DPSIR-2005 (stato ecosistema lagunare) del MAV. Si ringraziano: Thetis S.p.A. per il finanziamento e coordinamento del lavoro, il Consorzio Venezia Nuova – Servizio Ambiente committente del progetto, il Servizio Informativo del MAV per la fornitura delle immagini.

Riferimenti Bibliografici

- Chander G., Markham B. (2003), "Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges", *IEEE Trans. On Geoscience and R. S.*, Vol. 41, 11: 2674 – 2677.
- Chaves P. S. (1988), "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, 3: 459 – 479.
- Han L. (1997), Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 63, 6:701-705.
- NASA (2004), *Landsat 7 Science Data Users Handbook. Chapter 11 – Data Products.*
- Tolk B.L., Han L., Rundquist D.C. (2000), *The impact of bottom brightness on spectral reflectance of suspended sediments*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, 11:2259-2268.
- Wezernak C.T., Turner R.E., Lyzenga D.R. (1996), *Spectral reflectance and radiance characteristics of water pollutants*, NASA Technical Report, CR-2665.

ALLEGATO

Descrizione formale della procedura di calcolo e normalizzazione delle riflettanze.

FASE DELLA PROCEDURA:

FASE 1 - Conversione dei dati di radianza (o Digital Number) in radianze spettrali al sensore. La formula è la seguente:

$$L_{\lambda} = DN * gain + offs \quad [1]$$

dove:

- L_{λ} : è la radianza spettrale al sensore in $W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$ alla lunghezza d'onda ' λ ' (adimensionale).
 DN : Digital Number corretto, per le bande del visibile, della costante di velo (Chavez, 1988).
 gain , offs : sono i coefficienti di guadagno e di offset.

FASE 2 - Conversione dei dati di radianza spettrale in dati di riflettanza al sensore (combinazione della riflettanza della superficie terrestre ed atmosferica), assumendo la superficie terrestre lambertiana (Chander e Markham, 2003 per il TM e NASA, 2004 per l'ETM+).

La formula è la seguente:

$$R_{\lambda} = (\pi * d^2 * L_{\lambda}) / (ESUN_{\lambda} * \cos \theta_z) \quad [2]$$

dove:

- R_{λ} : è la riflettanza al sensore alla lunghezza d'onda ' λ ' (adimensionale).
 d : è la distanza fra sole e terra (espressa in unità astronomiche).
 $ESUN_{\lambda}$: è l'irradianza solare media globale in $W/(m^2 \mu m)$. Irradianza diretta più quella diffusa.
 θ_z : è l'angolo zenitale del sole (in gradi).

FASE 3 - Normalizzazione delle riflettanze di una immagine rispetto ai parametri di geometria dell'illuminazione solare ed agli oggetti più scuri della scena di una o più immagini di riferimento.

La formula è la seguente:

$$R_{\lambda}(\text{out}) = R_{\lambda}(\text{norm}) * GAIN + OFFS \quad [3]$$

per:

$$GAIN = [\cos \theta_z(\text{ref}) * 1/d^2(\text{ref})] / [\cos \theta_z(\text{norm}) * 1/d^2(\text{norm})] \quad [4]$$

$$OFFS = - D_{\lambda}(\text{norm}) * GAIN + D_{\lambda}(\text{ref}) \quad [5]$$

dove:

- out : indica l'immagine di 'output' o 'normalizzata'.
 ref , norm : indicano l'immagine di 'riferimento' e l'immagine da 'normalizzare'.
 GAIN, OFFS : sono fattori di correzione moltiplicativo ed additivo.
 D_{λ} : è il valore medio dei dati di riflettanza dei pixel più scuri della scena alla lunghezza d'onda ' λ '.

Si osserva che: i dati di riferimento dell'angolo solare zenitale e del fattore di cambiamento delle distanza fra sole e terra sono estratti dall'immagine, fra quelle selezionate, con il più alto angolo di elevazione solare; il dato di riferimento dell'oggetto della scena più scuro è estratto da una o più immagini aventi, nel tempo, i valori più bassi di riflettanza dello stesso oggetto della scena.