

## **Studio degli effetti dell'intrusione del cuneo salino sulla vegetazione costiera mediante dati satellitari**

Maurizio Barbarella (\*), Michaela De Giglio (\*\*), Alessia Avantaggiato (\*)

(\*) DICAM, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, maurizio.barbarella@unibo.it

(\*\*) CIRI ICT, Università di Bologna, Via Venezia 52, 47521 Cesena, michaela.degiglio@unibo.it

### **Riassunto**

Le Pinete costiere ravennati (Emilia-Romagna, Italia) costituiscono una delle maggiori aree boschive residue della pianura padana, rappresentando un patrimonio naturalistico e turistico di grande importanza. Studi recenti hanno dimostrato che l'acquifero costiero e i corsi d'acqua superficiali, presenti nell'area, sono interessati dal fenomeno dell'intrusione del cuneo salino, di origine sia antropica che naturale. Dato che la salinizzazione del suolo influisce sulle caratteristiche della vegetazione, il ricorso ai dati telerilevati ha rappresentato un nuovo approccio alla problematica analizzata: alterazioni relativamente piccole della concentrazione di sali inducono infatti cambiamenti, nelle proprietà delle foglie e della copertura vegetale, che sono osservabili attraverso misure eseguite con diverse lunghezze d'onda dello spettro.

In particolare sono stati utilizzati dati multispettrali Aster (acquisiti tra il 2002 e 2010), che uniscono economicità e un sufficiente numero di bande (14), per studiare la variazione del comportamento spettrale delle specie vegetali costituenti le Pinete, verificando eventuali situazioni di stress, di malattia e anomalie riconducibili a prolungate modifiche delle normali condizioni di salinità. A questo scopo e con il supporto di diversi dati ancillari, come dataset idrogeologici, stratigrafici e altri, l'indagine ha previsto principalmente il calcolo di indici di vegetazione e il ricorso ad alcune valutazioni statistiche.

### **Abstract**

The coastal pine forests of Ravenna (Emilia-Romagna, Italy) are parts of remaining wooded areas within the Po Valley and represent a natural heritage and a touristic appeal. Recent studies demonstrated that the coastal aquifer and surface water are affected by the intrusion of salt wedge. Since the salinization of soil and underlying strata affects vegetation health, further studies has been realized through the analysis of remote sensing data: relatively small changes in the concentration of salts are able to induce changes in the properties of the leaves and vegetation cover. In particular, a dataset acquired by the ASTER sensor between 2002 and 2010 were used due to the sufficient number of bands designed in the infrared spectrum. The variation of the spectral behavior of plant species forming the pine forests are the main interest of this project being able to detect possible state of stress, disease and abnormalities due to prolonged changes of normal salinity. Various ancillary data, such as geological, stratigraphic and others, have been used in addition to the calculation of vegetation indices and conclusions drawn through the use of basics statistical evaluations.

### **Area di studio**

Le aree boschive in esame (Fig.1), caratterizzate da diverse tipologie di ambienti (fiumi, canali, dune, zone umide) che le rendono topograficamente e morfologicamente complesse, sono la pineta di San Vitale e la pineta di Classe, situate rispettivamente a nord (estensione di circa 1133 ha) e a sud (estensione di circa 900 ha) della città di Ravenna.

Entrambe si insediano su antiche paleodune, la cui formazione è legata alle fluttuazioni eustatiche del mare e ai forti fenomeni di subsidenza cui è soggetta la zona, che hanno portato, nel corso dei millenni, al progressivo avanzamento e arretramento della linea di costa modificando continuamente l'ambiente costiero: dapprima in palustre ad acqua dolce e successivamente in lagunare ad acqua salmastra. Nella morfologia delle pinete è possibile infatti osservare l'alternanza tra "staggi" (dossi sabbiosi) e "basse o bassure" (depressioni interdunari) dove l'acqua ristagna più o meno permanentemente. La ricarica dell'acquifero freatico avviene tramite precipitazioni meteoriche, corsi d'acqua e canali. Mentre gran parte della pineta S.Vitale risulta essere sotto il livello del mare per l'intero anno, per la pineta di Classe, avendo una quota più elevata, i valori del livello di falda sono quasi ovunque superiori al livello del mare, sia d'estate che di inverno, creando un battente di acqua dolce che contrasta l'intrusione del cuneo salino. Per brevità, avendo ottenuto risultati analoghi per entrambe le pinete, si riportano di seguito solo quelli relativi a S.Vitale.

### Intrusione salina

L'intrusione salina viene definita come il movimento continuo o temporaneo di acqua salata all'interno della terra con conseguente spostamento di acqua dolce che provoca la formazione del cuneo salino, ovvero una massa di acqua salata con sezione cuneiforme appoggiata sulla base dell'acquifero e con il vertice verso l'interno (Custodio, 1996). Data l'interazione tra due fluidi miscibili, non esiste una netta superficie di separazione ma una zona dinamica di miscelamento che dipende dalle proprietà chimiche e idrauliche dei fluidi, dalla diffusività e dispersività del mezzo e dalle caratteristiche del movimento: l'acqua infatti si muove anche per variazioni del livello piezometrico dei due liquidi. L'intrusione all'interno dell'acquifero, ma anche dei corsi d'acqua superficiali, ha origini sia antropiche che naturali. Le dune che in passato proteggevano il territorio dal mare, sia come barriere naturali, sia perché garantiscono, con la ricarica superficiale di acqua piovana, un innalzamento della falda freatica, sono state in gran parte distrutte. L'altra causa che ha contribuito al fenomeno osservato è la subsidenza naturale cui è soggetta l'area del ravennate che, nel corso degli anni, è stata favorita dallo sfruttamento incontrollato della falda acquifera e dall'estrazione di gas naturale.

### Dati disponibili

L'analisi delle immagini satellitari è stata preceduta dalla rielaborazione di dati raccolti durante una campagna annuale di monitoraggio (ottobre 2004 - ottobre 2005), condotta dal CIRSA -Università di Bologna, sia in una rete di 22 piezometri distribuita nell'area di San Vitale, che lungo scoli, canali, chiari e fiumi, e da cui sono state ottenute mappe mensili di salinità superficiale (maggio, giugno, luglio e agosto, Fig.2). La salinità, maggiore nelle stagioni calde a causa della minore piovosità e dell'evapotraspirazione più intensa, aumenta da Ovest verso Est, verso la Piailassa (zona umida, Parco del Delta del Po) e le aree più depresse (10-15 g/l). La parte settentrionale della Pineta, data la quota più elevata e la mancanza di una diretta influenza della Piailassa, risulta essere la zona meno soggetta all'intrusione dell'acqua salata (< 7 g/l).

Per quanto riguarda i dati multispettrali sono state utilizzate immagini Aster, coeve alle misure a

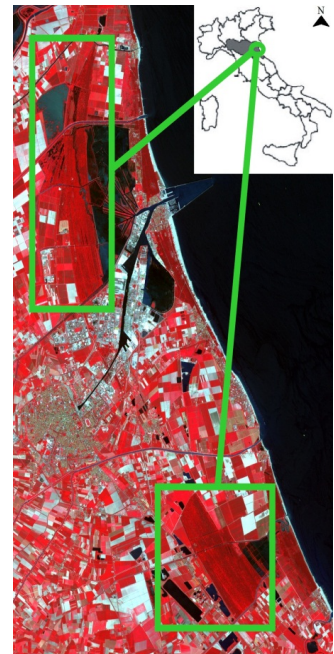


Figura 1. Area di studio (Parco del Delta del Po): Pineta di S.Vitale (a nord) e Pineta di Classe (a sud).

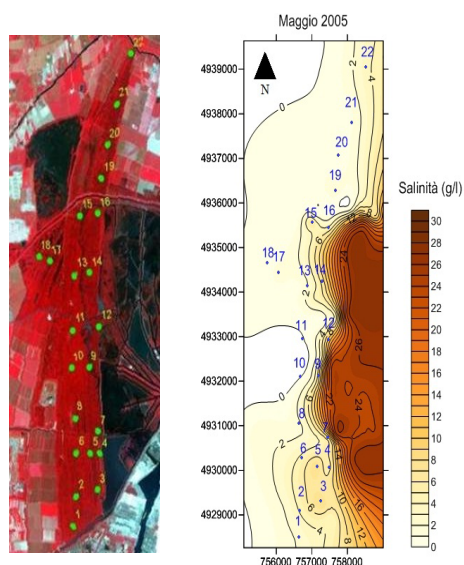


Figura 2. Rete piezometri S.Vitale (sinistra),  
Mappa salinità maggio 2005 (destra).

Pineta San Vitale	
ANNO 2005	Giugno (diversi anni)
26/05/2005	19/06/2002
02/06/2005	08/06/2004
11/06/2005	14/06/2006
29/07/2005	24/06/2007
30/08/2005	26/06/2008
	09/06/2010

Figura 3. Dati Aster utilizzati.

terra, acquisite con cadenza mensile per il 2005 e annuale, in corrispondenza del mese di giugno, dal 2002 al 2010 (Fig.3).

### Vegetazione presente ed effetti della salinità

I diversi habitat presenti rendono la pineta di San Vitale una zona di transizione tra terra e mare. La vegetazione xerofila (tipica dei climi aridi), situata sui cordoni dunosi, è costituita da farnia, roverella, pino domestico e marittimo, e latifoglie (tipo mesofilo e termofilo). Nelle bassure, dove l'umidità è medio elevata, la vegetazione è di tipo meso-igrofila, idrofittica di acqua dolce e salmastra con la presenza di un bosco igrofilo (pioppo bianco, frassino, olmo campestre). A nord, le specie arbustive sono ampiamente presenti in comunità pre-forestali o come sintomo di degradazione del bosco.

La salinizzazione del suolo e della falda freatica è una delle principali cause che portano ad un progressivo degrado delle pinete con diminuzione e cambiamento delle specie vegetali, alterandone crescita, fotosintesi, sintesi delle proteine e metabolismo. Gli effetti morfologici che si riscontrano sono variazioni nella colorazione delle foglie, ispessimento dello spessore fogliare e diminuzione della lunghezza degli steli; inoltre, sempre sulle foglie, si possono manifestare bruciature marginali e necrosi.

Si ricorda che la varietà della vegetazione, oltre a comportare diversi livelli di tollerabilità alla salinità, implica anche una maggiore difficoltà nell'interpretazione della risposta spettrale.

### Indici di vegetazione

Gli indici spettrali di vegetazione sono combinazioni algebriche dei valori di riflettanza acquisiti dai sensori satellitari a diversi intervalli di lunghezze d'onda, calcolati pixel per pixel su l'intera immagine. Sfruttano il tipico comportamento della vegetazione ad avere una bassa riflettività nel visibile (0.4-0.7 μm), con un picco di assorbimento nel rosso (0.66 μm), dovuto all'attività dei pigmenti fogliari, in contrapposizione ad una forte riflettività nell'infrarosso vicino (0.75-1.3 μm) a causa delle strutture vegetali (mesofillo). Il più utilizzato è l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), che si basa sulla differenza normalizzata dei valori di riflettività ρ nel vicino infrarosso e nel rosso:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rosso}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rosso}}$$

La funzione, per definizione, è delimitata nell'intervallo [-1,1]: valori negativi o bassi corrispondono ad acqua, suolo o roccia nuda, valori da 0.2 – 0.6 indicano presenza di vegetazione con un massimo di 0.8 per superfici con vegetazione abbondante. L'incremento della riflettività

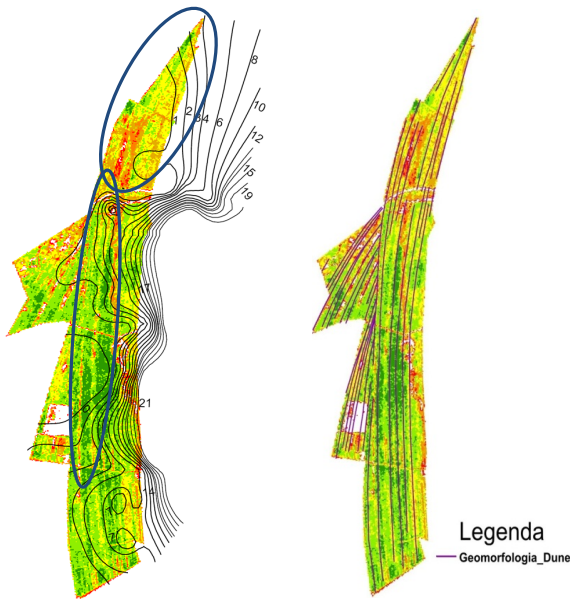


Figura 4. Mappa Salinità (mg/l) maggio 2005 (sfondo NDVI 26/05/2005).

Figura 5. Morfologia delle paleodune (sfondo NDVI 26/05/2005).

nel rosso e la sua riduzione nel vicino infrarosso, sono considerati come elementi segnalatori della diminuzione del contenuto di clorofilla e del danneggiamento della struttura cellulare di vegetazione sottoposta a stress salino (Carter, 1993; Wang et al., 2002).

✓ Distribuzione spazio-temporale mensile di NDVI (2005): le zone meno sensibili alla salinità sono la fascia centro-occidentale e l'area settentrionale con vegetazione per lo più arbustiva (Fig.4). Da una visione complessiva dell'NDVI (calcolato sulle immagini, contemporanee ai dati a terra, di maggio, giugno, luglio e agosto), la vegetazione più rigogliosa sembra concentrarsi nella parte centrale della pineta: tende a distribuirsi lungo fasce longitudinali seguendo l'andamento degli antichi cordoni dunari presenti (Fig.5). Le dune infatti, permettendo un locale abbattimento del cuneo salino e favorendo l'accumulo di acqua dolce, costituiscono un ambiente favorevole

per un florido sviluppo delle piante; le interruzioni, tra le fasce vegetate, corrispondono alle bassure

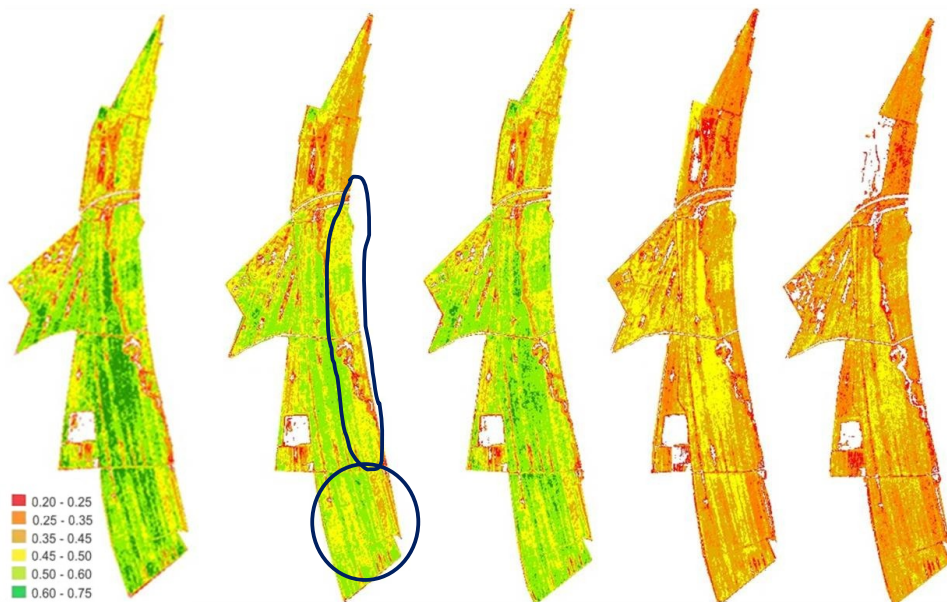


Figura 6. NDVI 2005: da sinistra verso destra, 26/05/05, 02/06/05, 11/06/05, 29/07/05, 30/08/05. I cerchi evidenziano la fascia orientale in prossimità della Piallassa e la zona meridionale, a cui corrispondono bassi valori di NDVI.

dove la quota più bassa e l'elevata salinità compromettono la vegetazione. La minore risposta lungo i corsi d'acqua potrebbe essere dovuta sia al fenomeno di risalita di acqua salata proveniente dalla Piallassa, che aumenta nei mesi estivi, sia al tipo di vegetazione prevalentemente legnosa. In prossimità della Piallassa (fascia orientale) e nella zona meridionale, si hanno in generale valori bassi di NDVI (da 0.2 a 0.5) rispetto alle realtà circostanti. Si sottolinea inoltre che al degrado della risposta della vegetazione (Fig.6), visibile di mese in mese, contribuisce il naturale progredire della stagione estiva.

Dopo un'analisi dell'NDVI in tutta l'area della pineta si sono scelte tre zone omogenee (Nord, Sud e Centro) per poter studiare in ciascuna l'andamento dell'indice di vegetazione medio (Fig.7). Nella zona nord il basso valore NDVI è legato alla presenza di una vegetazione diversa rispetto le altre aree e l'andamento dell'indice non è connesso con il problema della salinità. Nell'area centrale, dove la vegetazione non è particolarmente coinvolta dallo "stress salino", il valore dell'indice medio è sempre il maggiore mentre nell'area sud, zona interessata dal fenomeno della salinità, l'NDVI medio si esplicita con valori minori. Le tre curve seguano lo stesso trend con una diminuzione generale dell'NDVI medio da maggio ad agosto, legata all'aumento delle temperature.

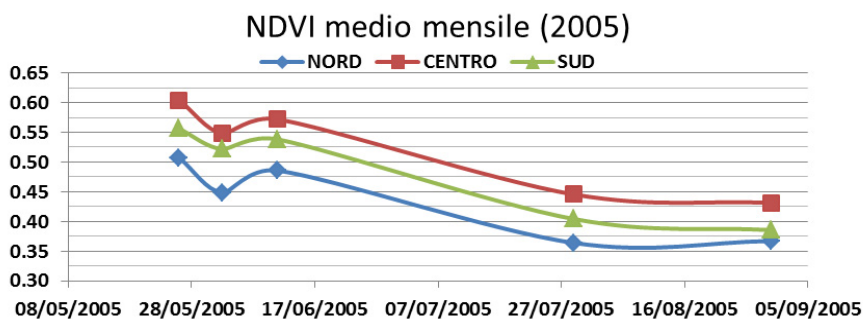
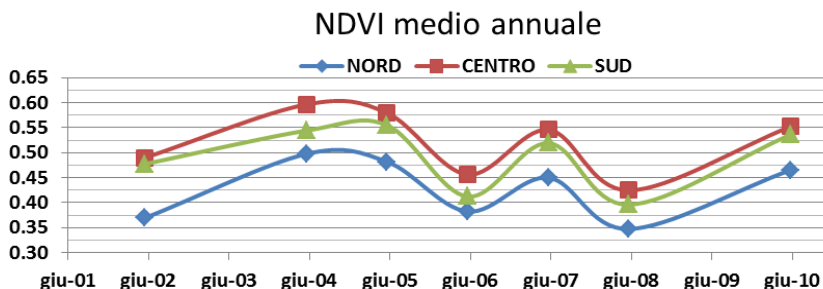


Figura 7. Aree utilizzate per il calcolo dell'NDVI medio (destra); andamento dell'NDVI medio, nei diversi mesi del 2005.

✓ **Distribuzione spazio-temporale annuale di NDVI (giugno):** E' stata eseguita anche un'analisi dell'NDVI, sulle stesse tre aree, considerando un arco temporale più ampio (mese di giugno per sette anni). L'indice, in ogni area, ha un andamento variabile di anno in anno testimoniando il cambiamento della risposta vegetazionale in base alle condizioni di temperatura e precipitazione. Si distingue un trend comune per tutti gli anni analizzati, con la zona centrale maggiormente vegetata mentre le aree meridionali e settentrionali presentano una minore attività vegetativa (Fig. 8).

Figura 8. Andamento dell'NDVI medio annuale (mese di giugno, 2002-2010). Le aree considerate sono riportate in Figura 7.



#### Analisi della distribuzione dei valori di NDVI

Per studiare la distribuzione dei valori di NDVI si è analizzato il dato del 26/05/2005, la cui vegetazione risulta meno interessata dal regime termo-pluviometrico, suddividendo in senso



Figura 9. Sottoaree.

longitudinale le aree precedentemente scelte (Fig.9). Dopo aver calcolato le statistiche dei campioni di pixel (media, deviazione standard) sono stati elaborati gli istogrammi di frequenza, da cui si è evidenziato un andamento asimmetrico, valutato successivamente con la funzione di *Skewness* di una variabile casuale monodimensionale.

✓ Sottoaree N1-N2 (Fig. 10): in entrambi i casi, i valori di NDVI medio sono inferiori rispetto alle altre zone analizzate, per la presenza di vegetazione arbustiva che, per le sue caratteristiche morfologiche, ha una riflettività minore. La positività del coeff. di asimmetria (Skew) nell'intorno dello zero mostra come i valori siano ben distribuiti attorno alla media, con tendenza a valori più alti di NDVI, anche se in N1 si evidenzia un andamento bimodale, corrispondente alle due principali risposte date dalla vegetazione (i due picchi si hanno a 0.51 e a 0.57).

✓ Sottoaree C1-C2-C3 (Fig. 11): nelle sottoaree C1, C2 e C3 i valori di NDVI medio coincidono (0.60) e confermano una situazione stabile per la vegetazione. In tutte e tre, la Skew assume valore negativo, indicando una tendenza dei valori a spostarsi a destra del valor medio (valori più bassi di NDVI). In C3, la maggiore frequenza nell'intorno di 0.4 rispetto al resto della coda, potrebbe segnalare una vegetazione sofferente, data la vicinanza alla Piallassa e l'aumento della salinità da est verso ovest, soprattutto nella zona più a sud (Fig 13).

✓ Sottoaree S1-S2-S3 (Fig. 12): rispetto all'area centrale, quella meridionale presenta valori di NDVI minori pur avendo circa la stessa vegetazione; una diminuzione probabilmente legata alla forte salinità cui è soggetta la zona. In S1, meno influenzata dalla vicinanza della Piallassa, il coefficiente di asimmetria è prossimo allo zero e quindi i valori sono distribuiti attorno al valore medio. In S2, la dispersione dei valori aumenta, così come la salinità; ma con frequenza bassa. Occorre sottolineare infatti che qui si hanno NDVI maggiori rispetto le sottoaree limitrofe, perché è quasi certamente collocata su un cordone dunare che garantisce una migliore condizione vegetativa. In S3, prossima alla Piallassa, si riscontrano indici di vegetazione minori, soprattutto nella fascia orientale. L'istogramma, caratterizzato da due picchi (compresi tra 0.4 – 0.5 e 0.55 - 0.62), evidenzia una coda a sinistra con frequenze alte: la concentrazione di molti pixel nel primo intervallo, con valori di NDVI molto inferiori a quelli tipici della vegetazione, potrebbe testimoniare la presenza di un'area di forte salinità (Fig 12).

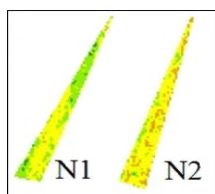


Figura 10. Mappa valori di NDVI, NDVI medio, Deviazioni Standard, skewness delle sottoaree N1 e N2 (sopra); Istogrammi di frequenza per i valori di NDVI dei pixel di N1 e N2 (sotto).

Aree	NDVI medio	Deviazione Standard	Skewness
N1	0.53	0.04	0.30
N2	0.48	0.04	0.35

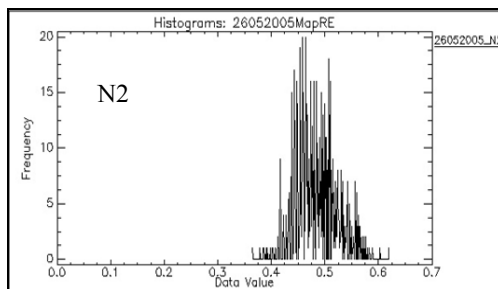
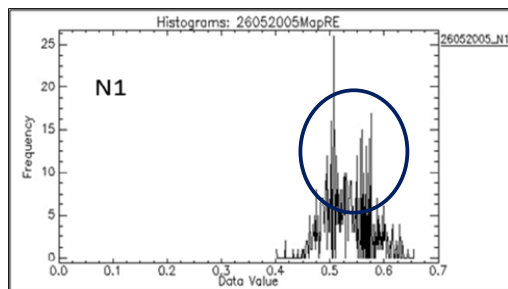


Figura 11. Mappa NDVI, Istogrammi di frequenza per i valori di NDVI dei pixel di C1, C2 e C3.

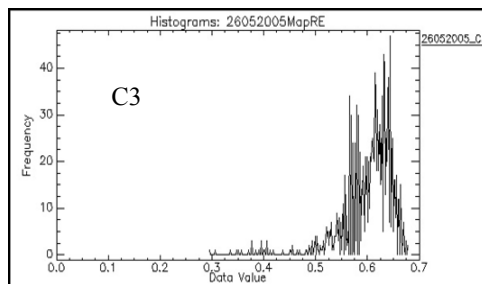
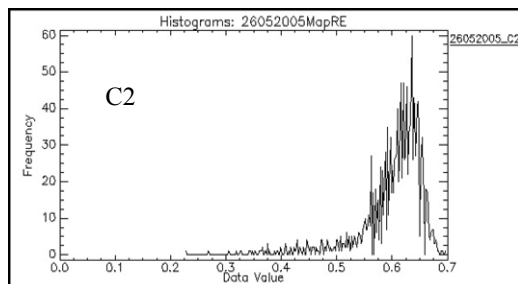
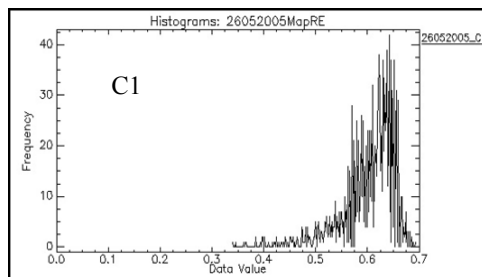
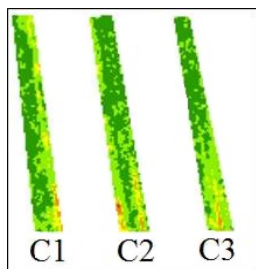


Figura 12. Mappa NDVI, Istogrammi di frequenza per i valori di NDVI dei pixel di S1, S2 e S3.

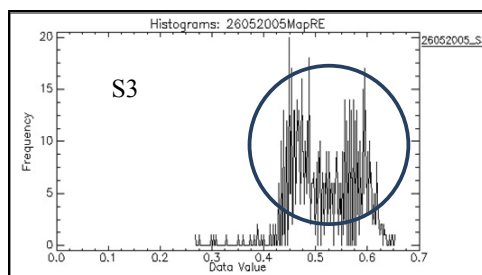
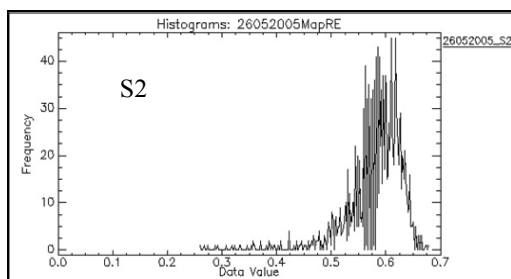
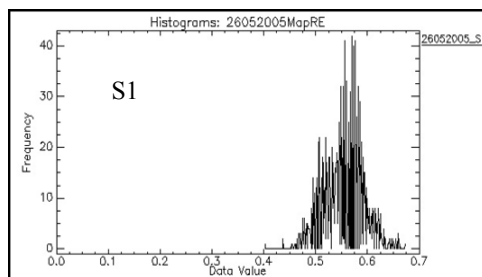
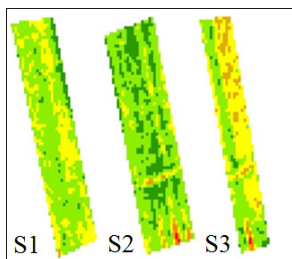
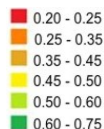


Figura 13. Valori NDVI medio, Deviazioni standard, Skewness nelle sottoaree C1, C2, C3, S1, S2 e S3.

Aree	NDVI medio	Deviazione Standard	Skewness
C1	0.60	0.05	- 1.56
C2	0.60	0.05	- 2.13
C3	0.60	0.04	- 2.08
S1	0.55	0.04	0.03
S2	0.58	0.05	- 2.04
S3	0.52	0.06	- 0.19

### **Considerazioni finali**

La pineta di San Vitale è fortemente interessata da un degrado della vegetazione causato dall'intrusione salina nelle acque di falda e superficiali. La disponibilità di dati di monitoraggio e di studi precedenti, ha permesso di creare un quadro riassuntivo delle caratteristiche delle Pinete, definendo un riferimento affidabile per lo studio degli effetti dello stress salino mediante le immagini satellitari. L'approfondimento proposto da questo lavoro ha avuto come obiettivo il riscontro dei danni provocati dal cuneo salino, attraverso tecniche proprie del Telerilevamento che introducono un diverso punto di osservazione e ampliano l'area di indagine. Il calcolo dell'NDVI, basato sulle bande del rosso e del vicino infrarosso, particolarmente sensibili alla risposta spettrale delle specie vegetate, ha portato alla realizzazione di mappe relative alla distribuzione spazio-temporale dei valori dell'indice, tramite le quali sono state individuate delle aree popolate da vegetazione definibile "sofferente". Il confronto con i dati a terra ha confermato poi la corrispondenza con le zone sensibili al problema della salinità, riportate anche in letteratura. Infine, il tracciamento dell'andamento degli NDVI medi nel tempo (in mesi successivi e in anni consecutivi nello stesso mese), calcolati su tre aree campione caratterizzate da una certa omogeneità vegetativa interna, è risultato coerente con le considerazioni fatte sulle aree a rischio. Inoltre, attraverso lo studio dell'asimmetria della distribuzione dei valori dell'indice, valutata sul solo dato di maggio 2005, si è potuto verificare intorno a quali livelli di NDVI si concentrano le piante dal comportamento anomalo.

Il passo successivo sarà quello di estendere ulteriormente, sia spazialmente che temporalmente, questo tipo di analisi, ricorrendo se possibile ad immagini a maggiore risoluzione geometrica, molto più onerose ma che permetterebbero di discriminare le singole specie vegetali coinvolte da tale problematica.

### **Ringraziamenti**

Si ringrazia il CIRSA (Università di Bologna–Ravenna) per i dati del monitoraggio 2004/2005 e diversi dataset informativi forniti.

### **Bibliografia**

- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2008), "Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy". *Hydrogeology Journal* 16: 1541–1556.
- Antonellini M., Mollema P. (2010), "Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy". *Hydrogeology Journal* 36 :1201–1211.
- Carter G., (1993), "Responses of leaf spectral reflectance to plant stress". *American Journal of Botany*, Vol. 80, No. 3, pp. 239-243.
- Avantaggiato A., (2012), "Utilizzo di dati satellitari per l'analisi degli effetti dell'intrusione di cuneo salino sulla vegetazione costiera". Tesi di laurea specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, A.A. 2011/2012 Università di Bologna.
- Giambastiani B. M. S. (2006). "Evoluzione idrologica ed idrogeologica della Pineta di SanVitale (Ravenna)". Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, XIX Ciclo, A/A 2006-2007, Università di Bologna.
- Gitelson A., Kaufman .Y, MerzlyakM.. (1996). "Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS", *Remote sensing environmental* 58: 289-298. Elsevier science inc., 1996.
- Pellegrini L. (2005). "Caratterizzazione idrologica dell'acquifero freatico della Pineta di Classe (Ravenna)". Tesi di laurea specialistica in Scienze per l'Ambiente e il Territorio. A.A. 2004/2005. Università di Bologna.
- Wang D., Poss J. A., Donovan T. J., M. C. Shannon, Lesch S. M., (2002), "Biophysical properties and biomass production of elephant grass under saline conditions", *Journal of Arid Environments* 52: 447–456.