

Dati ASTER per la valutazione dello stato di salute di aree costiere vegetate interessate da salinizzazione

Maurizio Barbarella (*), Michaela De Giglio (**), Nicolas Greggio (***)

(*) 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

(***) C.I.R.S.A., Lab. I.G.R.G., Università di Bologna, Via S. Alberto 163, 48100 Ravenna, nicolas.greggio2@unibo.it

Riassunto

Diversi studi hanno dimostrato che le pinete ravennati (Emilia-Romagna, Italia), così come l'intero sistema costiero di cui fanno parte, sono soggette ad un'intrusione di acque salate, nell'acquifero sottostante, causata da fattori sia naturali che antropici. Dato che, i cambiamenti nella concentrazione salina delle acque sotterranee sono in grado di indurre, nelle proprietà delle piante, variazioni riconoscibili nelle diverse bande spettrali, è stata sviluppata una procedura per individuare aree di vegetazione stressata, basata sui dati satellitari. L'obiettivo è quello di limitare i lunghi e costosi monitoraggi a terra, circoscrivendoli in zone ben definite. La metodologia ha previsto il calcolo dell'indice di vegetazione NDVI e una sua successiva analisi statistica, in corrispondenza di aree campione, su dati ASTER acquisiti tra maggio e agosto del 2005. Infine, i dati provenienti da una contemporanea campagna di misure a terra, hanno permesso la validazione del metodo. L'applicazione ha avuto come soggetti la Pineta di Classe e la Pineta di San Vitale che, pur avendo la stessa origine geo-morfologica, hanno subito nel tempo una diversa evoluzione.

Abstract

Several studies showed that the pine forests of Ravenna (Emilia-Romagna, Italy), as well as the entire coastal system to which they belong, are subject to a salt water intrusion in the aquifer below, caused by natural and human factors. Changes in groundwater salinity induce variations of the leaves properties and vegetation cover, recognizable by satellite sensors as response on different spectral bands. Therefore a procedure to identify stressed areas from remote sensing data, reducing the expensive and time consuming ground monitoring campaign, was developed. Multispectral ASTER data, acquired between May 2005 and August 2005, were used to calculate NDVI and its subsequent statistical analysis. Finally, the validation of the method was allowed from simultaneous ground measurement campaign. This methodology was tested in Classe pine forest and then in San Vitale pinewood. Although, from geological and morphological large scale point of view, these pinewoods have the same origin and structures, in last centuries different human activities and natural settings have led to a diverse situation.

Descrizione delle pinete ravennati

L'origine del substrato su cui giacciono i boschi studiati è strettamente connessa con l'evoluzione della parte settentrionale del Mar Adriatico. Situate rispettivamente a sud e a nord della città di Ravenna (Fig. 1), la pineta di Classe (estensione di circa 900 ha) e la pineta di San Vitale (estensione di circa 1133 ha), si insediano su antiche paleo-dune formatesi, nel corso dei millenni, in seguito al progressivo avanzamento e arretramento della linea di costa. Nella morfologia delle pinete è possibile infatti osservare l'alternanza tra "staggi" (dossi sabbiosi) e "basse o bassure" (depressioni interdunari), in cui l'acqua ristagna più o meno permanentemente. In generale la quota del terreno è

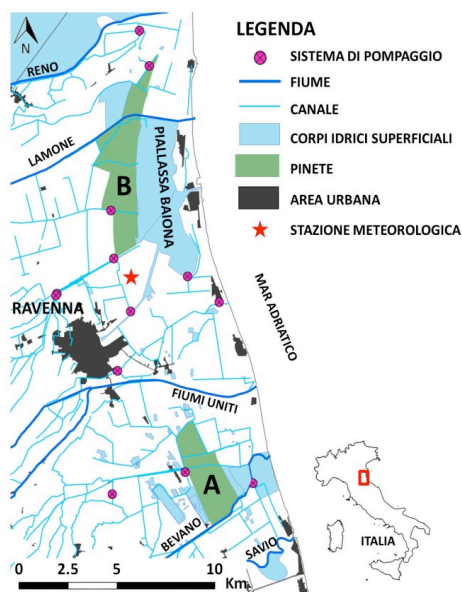


Figura 1. Area di studio: Pineta di Classe (A) e Pineta di S. Vitale (B).

attraversano la pineta, nella quale il livello di salinità può raggiungere gli 8 g/l (Antonellini et al., 2010).

Per la Pineta di San Vitale invece, una breve descrizione è riportata nell'ultimo paragrafo.

In generale, l'intrusione salina all'interno dell'acquifero ha origini sia antropiche che naturali. Sono state infatti distrutte gran parte delle dune che in passato proteggevano il territorio dal mare, sia come barriere naturali, sia come responsabili dell'innalzamento della falda freatica mediante ricarica superficiale di acqua piovana. L'altra causa del fenomeno è la subsidenza naturale cui è soggetta la zona del ravennate che, nel corso degli anni, è stata favorita dallo sfruttamento incontrollato della falda acquifera e dall'estrazione di gas naturale.

Vegetazione presente ed effetti della salinità (considerazioni sulla salinità)

La complessità della vegetazione delle pinete ravennate è dovuta ad alcuni importanti aspetti fitogeografici. Da un lato l'intera area è situata nella zona di transizione tra le regioni floristiche Media-Europea e Mediterranea, con foreste che si sviluppano su creste dunali e bassure; mentre dall'altro la vegetazione risente delle modifiche antropiche, come la massiccia piantumazione di pini (*Pinus pinea*) avvenuta nel XIII secolo, la subsidenza e la gestione idrologica, di cui è stata e continua ad essere oggetto. Secondo la Carta della Vegetazione del Parco Regionale del Delta del Po (Regione Emilia-Romagna), le classi che ricoprono le pinete sono Boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi, Boschi termofili di caducifoglie e poi Vegetazione arbustiva, Prati aridi e semiaridi submediterranei che in questo contesto sono stati riuniti in un'unica categoria. Lo studio è stato però focalizzato solo sui boschi di caducifoglie, i maggiormente diffusi, che comprendono al loro interno gli ordini *Populetales* e *Quercetalia pubescentis - petraeae* (Piccoli et al., 1991). Questi differiscono per le specie presenti e per l'habitat in cui vivono: infatti in base alla profondità della falda si hanno, partendo da quello più superficiale, gli habitat igrofilo, mesoigrofilo e xerofilo. Solo gli ultimi due ospitano gli ordini sopra citati, nei quali si ricorda inoltre la consistente presenza di pini, ritenuta specie alloctona perché introdotta dall'uomo e non in grado di riprodursi al di fuori del suo ambiente naturale. Ritenendola quindi pianta stressata (Padula, 1968), il *Pinus pinea*, omogeneamente distribuito a Classe e più concentrato sulle dune a

molto bassa, spesso al di sotto del livello medio del mare, e raggiunge massimi di 4m s.l.m. solo in corrispondenza delle dune, escludendo strade e argini di canali.

Il bilancio idrico del sottostante acquifero freatico è regolato da precipitazioni meteoriche, corsi d'acqua, numerosi canali e sistemi di pompaggio. In particolare nella Pineta di Classe, topograficamente più elevata (in media 3m s.l.m.), la presenza di una potente pompa, situata nella parte occidentale, converge il flusso in direzione dell'entroterra, mantenendo asciutto l'ampio bacino circostante. La profondità della tavola d'acqua, quasi sempre sopra il livello del mare, è in grado di creare un battente di acqua dolce che contrasta parzialmente l'intrusione di acque salate e non è quindi da ritenersi un ulteriore fattore di stress per la vegetazione di questa prima area test. Per quanto riguarda la qualità dell'acqua, l'acquifero è interessato da infiltrazioni di acqua salina dal fondo verso l'alto. Le acque sotterranee rimangono mediamente dolci tutto l'anno (2 g/l), tranne nell'area compresa tra i due principali canali che

San Vitale (Diani et al., 2007), è stato di seguito considerato come un elemento negativo nella valutazione dello stato di salute delle pinete (Piccoli et al., 1991).

Sono in realtà diversi i fattori ambientali che possono influire sui processi fisiologici, tra cui la fotosintesi, responsabili della crescita delle piante. Lo status della vegetazione può dipendere dalle proprietà del suolo, dalla morfologia, dal microclima, dalle comunità vegetali, dagli inquinanti antropici: tuttavia, data l'omogeneità del sottosuolo (terreni sabbiosi), della copertura e delle condizioni climatiche, la concentrazione di sale nelle acque sotterranee è stata riconosciuta come uno dei principali controllori della produttività vegetale delle piante che vivono in queste pinete (Antonellini et al., 2010). In generale, la salinizzazione della falda freatica porta ad un progressivo degrado delle piante, alterandone la fotosintesi e quindi il contenuto di clorofilla, la sintesi delle proteine e il metabolismo. Gli effetti che si riscontrano sono variazioni nella colorazione delle foglie, con eventuali bruciature marginali e necrosi, ispessimento dello spessore fogliare e diminuzione della lunghezza degli steli (Parida, 2005). Si sottolinea infine che la varietà di specie, nella classe di vegetazione considerata, si traduce in diversi livelli di tollerabilità alla salinità.

Metodologia

Per la realizzazione della procedura sono stati usati cinque dati satellitari, acquisiti dal sensore multispettrale Aster tra la primavera e l'estate del 2005 (26/05, 02/06, 11/06, 29/07, 30/08). La non regolarità dell'intervallo di ripresa è dipesa dalla disponibilità e dalla qualità dei dati presenti nell'archivio di riferimento (LP DAAC: Land Processes Distributed Active Archive Center).

La metodologia prevede una preliminare conoscenza della vegetazione e degli aspetti idro-morfologici dell'area soggetta a possibile intrusione salina (Fig.2). La fase che richiede maggiore attenzione è la verifica della presenza di ulteriori fattori di stress per le piante, in grado di compromettere il loro stato di salute e di conseguenza la risposta spettrale. Il successivo calcolo di NDVI sfrutta il tipico comportamento della vegetazione ad avere una bassa riflettività 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) causata dalle strutture vegetali (mesofillo). Valori da 0.5 – 0.9 dell'indice provano l'esistenza di vegetazione. L'incremento della riflettività 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 piante sottoposte a stress salino (Carter, 1993). Sulla base della copertura vegetale vengono poi selezionate delle aree di interesse (AI) con la medesima vegetazione, distribuite sull'intera zona da studiare. L'andamento nel tempo del valore medio di NDVI, di ogni campione, permette quindi di discriminare zone a diverso comportamento spettrale, a parità di condizioni climatiche. Con lo scopo di conoscere la distribuzione dei pixel intorno alla media, si costruiscono di seguito gli istogrammi di frequenza relativa di ogni AI e se ne studia la forma mediante i momenti di ordine superiore di Skweness e di Curtosi. Infine, per confrontare lo stato di salute della vegetazione tra le aree di interesse è stato

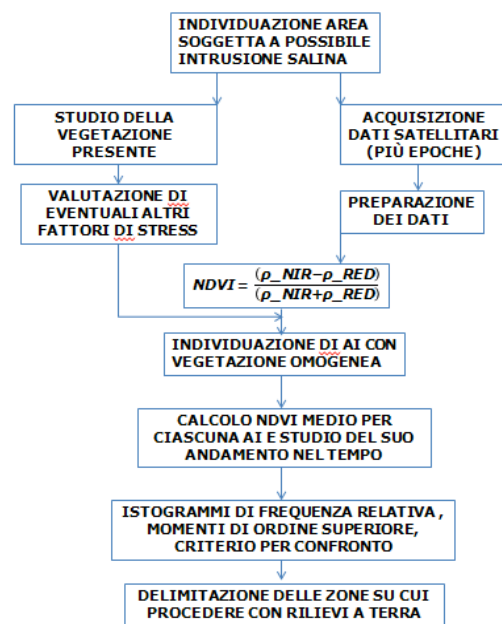


Figura 2. Schema della metodologia.

necessario fissare un criterio di classificazione. Considerato che, il più alto valore di NDVI indica l'attività fotosintetica più intensa (Eidenshink, 1992), in ogni scena, è stata calcolata la soglia NDVI corrispondente al 5% dell'area con risposta migliore, definendo un limite di stress: successivamente sono state quantificate, nelle restanti AI, le percentuali di pixel con valori di NDVI inferiori alla soglia calcolata e che quindi possono essere ritenuti appartenenti a vegetazione stressata.

In funzione dei risultati ottenuti, e della valutazioni di eventuali altre cause di degrado della vegetazione, vengono così individuate le aree sulle quali procedere con il monitoraggio a terra.

In generale, data l'elevata stagionalità del NDVI e la sua dipendenza dagli eventi climatici a breve termine, è importante applicare la procedura nei mesi primaverili e considerando sempre i parametri di temperatura e precipitazioni.

Applicazione al primo caso reale: Pineta di Classe

Dalle mappe di NDVI riportate in Figura 3 si evincono due aspetti importanti: l'evoluzione stagionale tipica per la vegetazione di questa regione climatica, con valori di NDVI alti a fine primavera e in continua diminuzione durante l'estate, e la non uniformità di comportamento spettrale all'interno della pineta. Per escludere la dipendenza causata dalla differenza di specie, sono state individuate quattro AI (Fig. 4) di Boschi termofili di caducifoglie (N, C1, C2 e S1). La presenza di S2, costituita da Boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi, serve invece a confermare il trend stagionale uguale per tutti i tipi di piante che vivono nella foresta di Classe (Fig.4). L'andamento nel tempo del NDVI medio, di ciascun campione, mette in evidenza la differenza tra i valori di risposta delle quattro zone considerate: N ed S1 riportano la più efficiente attività vegetale mentre C2 risulta essere quella con maggior disagio. Tra i due casi più estremi si inserisce C1 con un andamento intermedio, confermato anche dal corrispondente istogramma di frequenza relativa (Fig. 5). Infatti, come dimostrato dai valori prossimi allo zero di Skweness e di Curtosi (Tab. 1), la sua distribuzione non

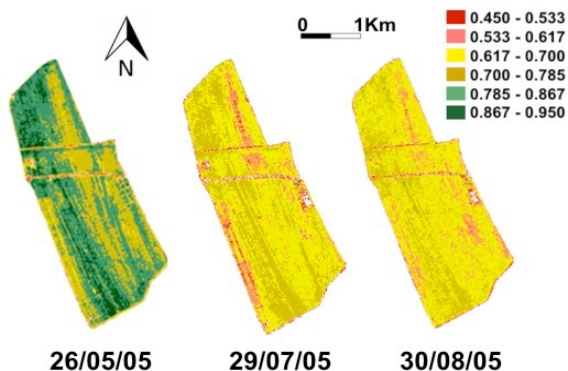


Figura 3. Mappe di NDVI della Pineta di Classe. Le mappe relative a 02/06/05 e 11/06/05 sono state omesse perchè non forniscono ulteriori informazioni significative.

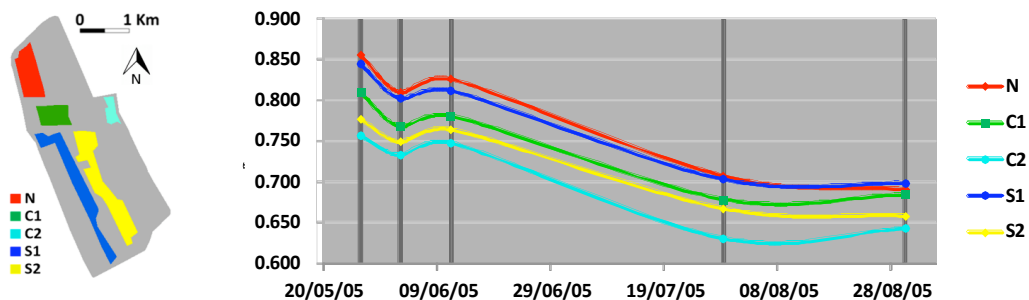


Figura 4. Mappa delle AI della Pineta di Classe (a sinistra) e andamento temporale del NDVI medio di ciascuna AI (a destra).

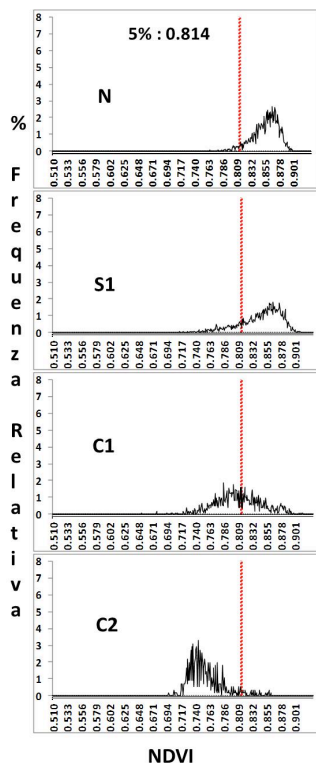


Figura 5. Istogrammi di frequenza relativa del 26/05/05 delle AI di Classe.

malessere della vegetazione che al resto della pineta.

Verifica dei risultati sulla base dei dati della salinità

Da studi precedenti (Antonellini et al., 2010) è noto che il controllo della distribuzione degli alberi, nelle pinete costiere ravennate, è regolato dalla salinità delle acque sotterranee e dallo spessore della zona insatura. Escludendo il secondo fattore, considerata la quota media intorno ai 3m s.l.m, il bosco di Classe risente principalmente dall'intrusione salina. Con l'obiettivo di comprendere la relazione tra i risultati ottenuti e la qualità dell'acquifero, sono stati elaborati i dati raccolti mensilmente nel 2005, durante una campagna di monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee all'interno delle pinete. Per Classe, le misure di conducibilità elettrica e di profondità di falda sono state registrate in 4 piezometri e in 19 punti distribuiti su corpi idrici superficiali e canali di drenaggio. La successiva creazione di mappe di salinità ha previsto però l'impiego delle sole misure relative alla parte superiore dell'acquifero, per la vicinanza alle radici degli alberi e per il ruolo svolto nella fornitura di acqua durante i processi di evaporazione.

Per ogni epoca di acquisizione, dalla sovrapposizione delle isoaline con le AI (Fig. 6), si osserva che la zona C2, con i più bassi valori di NDVI, è caratterizzata anche dalla maggiore salinità. Al fine di quantificare la relazione tra NDVI e dati a terra, è stata verificata la correlazione lineare tra i valori medi di salinità e di NDVI, di ogni area di interesse, mese per mese. In questo modo è stata garantita l'uniformità delle condizioni ambientali esterne su tutta la pineta. La correlazione negativa

si discosta molto da una curva gaussiana in ogni epoca considerata. I risultati dei dati di giugno, temporalmente prossimi a quello di fine maggio, sono stati omessi perché non forniscono informazioni aggiuntive. Per quanto riguarda le altre AI, per N e S1 si può osservare che gli istogrammi mostrano una coda a sinistra, indicando una maggiore concentrazione di pixel in corrispondenza di valori più alti di NDVI, mentre per C2 la coda è a destra, avendo gran parte dei pixel posizionati su valori più bassi di NDVI. Queste considerazioni sono però affidabili per le prime due immagini in quanto, a fine estate, non è evidente una forma caratteristica in nessuna area. Una probabile spiegazione è data dal fatto che i valori NDVI in questo periodo tendono a diminuire spontaneamente, avvicinandosi al limite inferiore valido per la vegetazione, rendendo così meno evidenti le piante stressate (Weier et al., 1999). La linea rossa disegnata negli istogrammi rappresenta la soglia inferiore per la vegetazione sana, corrispondente al 5 percentile di N, che varia da 0.814 a 0.648 tra maggio e agosto. Come riportato in tabella 2, i valori di NDVI di C2 sono in gran parte sempre al di sotto di tale limite, a testimonianza del

AI	Momenti II ordine	Data di acquisizione		
		26/05/05	29/07/05	30/08/05
N	Skweness	-0.898	-0.764	0.216
	Kurtosis	0.968	0.947	0.317
S1	Skweness	-1.045	-0.700	-0.083
	Kurtosis	1.134	0.274	0.037
C1	Skweness	0.008	0.070	-0.082
	Kurtosis	0.178	0.112	-0.167
C2	Skweness	1.246	1.165	0.125
	Kurtosis	1.730	1.850	0.227

Tabella 1. Momenti di ordine superiore.

AI		Data di acquisizione		
		26/05/05	29/07/05	30/08/05
N	Soglia (5%)	0.814	0.663	0.648
S1	% Valori NDVI inferiori alla	18.4	14.3	6.8
C1	soglia	56.7	33.1	14.0
C2	soglia	94.7	90.7	62.9

Tabella 2. Percentuali di pixel al di sotto della soglia di stress.

riscontrata per Classe, insieme al coefficiente di correlazione R^2 elevato, conferma la relazione tra NDVI bassi e i maggiori valori di salinità (Fig. 6), e viceversa, in tutti e tre i mesi analizzati. Nella figura si riporta solo il caso di maggio.

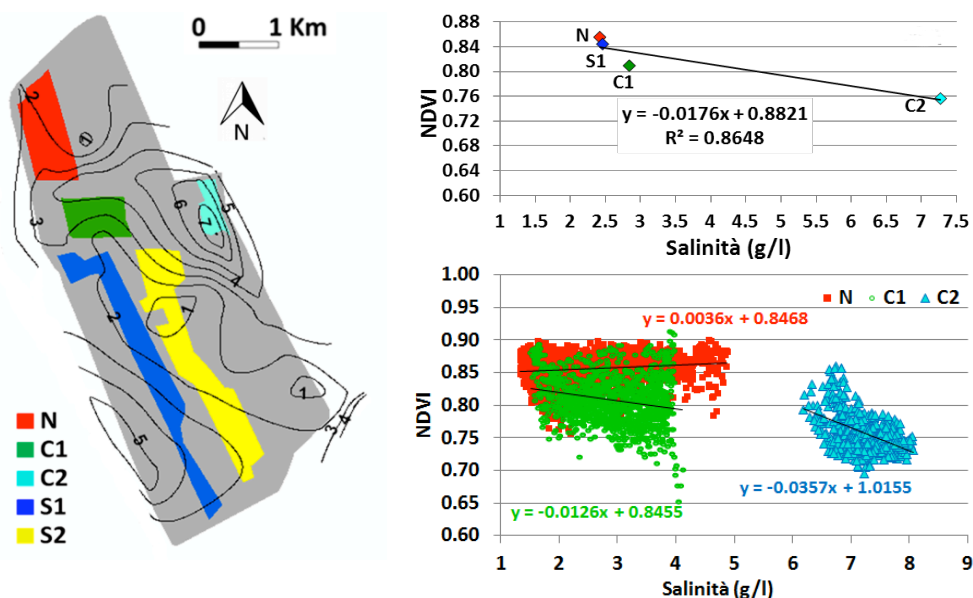


Figura 6. Confronto dei risultati di Classe con la salinità (26/05/05). A sinistra: sovrapposizione tra le AI e le isoaline. A destra in alto: correlazione lineare tra valori medi di salinità e di NDVI delle AI. A destra in basso: correlazione pixel per pixel tra valori di salinità e di NDVI delle AI.

Risultati coerenti a quanto detto sopra si sono ottenuti poi nell'ultima fase della validazione, che ha previsto il calcolo della correlazione tra NDVI e salinità pixel per pixel, per ciascuna AI, nel solo mese di maggio (Fig. 6). La scelta dell'immagine utilizzata è legata alla maggiore attività produttiva delle piante che si verifica a tarda primavera. Dal grafico è possibile dedurre che per zone ad alta salinità la correlazione è fortemente negativa (C2), mentre, diventa rispettivamente meno negativa e positiva per C1 e N, in corrispondenza delle quali si ha una salinità limitata. Di conseguenza, è possibile definire anche una soglia di tolleranza alla salinità, per Boschi termofili di caducifoglie, intorno a valori di 5-6 g/l.

Problematiche riscontrate nell'applicazione al secondo caso reale: Pineta di San Vitale

La procedura è esportabile in qualunque area nella quale c'è evidenza di intrusione salina nelle acque sotterranee. Considerando che tutta la zona costiera intorno a Ravenna è affetta da questo problema, la metodologia è stata applicata anche su un'altra importante pineta locale, San Vitale, nella quale però anche altri fattori di stress incidono sullo stato di salute delle piante.

Situata ad una quota media prossima a 0 m s.l.m. e con una micro-morfologia molto pronunciata, il suo modello idrogeologico è molto complesso. Delimitata a ovest da una laguna salmastra aperta al mare (Piallassa Baiona) e attraversata dal fiume Lamone e da altri canali di drenaggio, è caratterizzata da acque sotterranee che interagiscono con quelle salate superficiali (Mollema et al., 2013). Al fine di drenare la pineta e le aree agricole circostanti, anche a San Vitale sono stati installati dei sistemi di pompaggio, lungo il perimetro occidentale, per sollevare l'acqua e incanalare verso il Mar Adriatico. Ne consegue che i flussi sono tutti diretti dalla laguna verso la pineta, abbassando ovunque la falda sotto il livello del mare. La salinità dell'acquifero varia da 0 g/l a 20 g/l, presentando un forte gradiente in direzione est-ovest, con i valori più elevati distribuiti

lungo il confine con la Piallassa e nei pressi del fiume Lamone. In figura 7 sono riportate le AI scelte per la Pineta San Vitale che, come nel caso precedente, contengono Boschi termofili di caducifoglie.

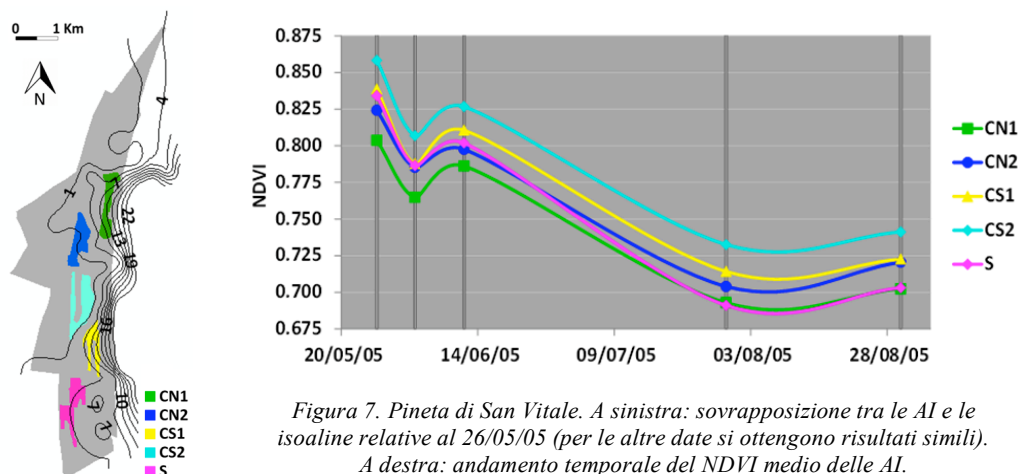


Figura 7. Pineta di San Vitale. A sinistra: sovrapposizione tra le AI e le isoaline relative al 26/05/05 (per le altre date si ottengono risultati simili). A destra: andamento temporale del NDVI medio delle AI.

Nel grafico dell'andamento temporale dell'indice di vegetazione medio (Fig. 7) di ciascuna AI, è possibile riconoscere lo stesso trend stagionale della Pineta di Classe, ad eccezione di S, il cui valore di NDVI, alto a maggio, diminuisce più velocemente rispetto alle altre aree nel corso dell'estate. In accordo anche con gli istogrammi di frequenza relativa, CS2 e CN1 risultano essere le aree con la risposta spettrale rispettivamente migliore e peggiore.

Anche se in realtà i momenti di ordine superiore calcolati per CN1 sono prossimi allo zero, le percentuali, maggiori o intorno al 50%, di pixel con valori di NDVI inferiori alla soglia di stress, fissata rispetto a CS2, suggeriscono la presenza di vegetazione sofferente nell'area. Le altre zone campione hanno un comportamento intermedio tra i due casi estremi (Fig. 8), con la particolarità di S la cui quantità di vegetazione stressata oscilla tra 35% e il 50% indipendentemente dall'effetto stagionale.

Per le AI della Pineta di San Vitale non è possibile però prescindere da altri fattori ambientali che influiscono sulla risposta spettrale delle piante: la micro-morfologia, lo spessore della zona vadosa, il cui effetto negativo aumenta con la sua diminuzione, e la densità di pini, che non sono stati piantati uniformemente sull'area considerata. Dato che la risoluzione di 15 m del dato Aster non è sufficiente per distinguere la distribuzione della vegetazione lungo le dune e nelle bassure, l'attenzione è stata concentrata sulla combinazione degli altri due con la salinità. Infatti, la correlazione calcolata tra valori medi di NDVI e salinità risulta negativa, ma di un ordine di dieci volte più piccolo di quella riscontrata a Classe. Una possibile spiegazione di tale differenza potrebbe trovarsi nella diversa tempistica nei processi di salinizzazione. Mentre per la Pineta di Classe è un fenomeno recente, la vegetazione di San Vitale potrebbe aver avuto più tempo per adattarsi alla nuova condizione, essendo storicamente soggetta a intrusione salina (Mollema et al, 2013).

Le aree CS2 e CN1 zone si comportano rispettivamente come N e C2 di Classe: a valori elevati di NDVI corrispondono bassi valori di salinità e viceversa. In CS2, la buona salute delle piante è

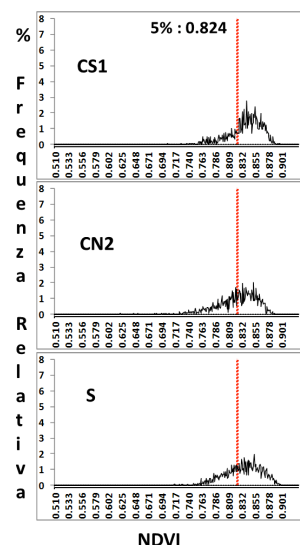


Figura 8. Istogrammi di frequenza relativa del 26/05/05 di alcune AI di San Vitale.

dovuta anche alla bassa densità pini e ad uno spessore di zona non satura quasi sempre maggiore di 1 m. Il contrario si verifica in CN1. Il comportamento delle altre aree richiede invece un maggior approfondimento. I valori di NDVI di CS1 farebbero presupporre una bassa salinità, ma probabilmente sono la bassa densità di pini e una sufficiente zona vadosa che migliorano la risposta della vegetazione, che comunque sembrerebbe essersi adattata a concentrazioni saline prossime al valore di tolleranza stabilito per Classe. Per CN2, gli scarsi valori di NDVI potrebbero essere giustificati dall'altissima densità di pini presenti.

Infine, molti dubbi rimangono circa la variabilità di risposta della zona S. Nonostante sia posizionata ad ovest, la bassa elevazione locale la rende più esposta all'intrusione di acqua salata. Dall'altra parte però per la vicinanza alla stazione di pompaggio, che abbassa la falda, la zona vadosa è più ampia.

Considerazioni finali

Per foreste interessate dal problema dell'intrusione salina, la procedura presentata permette di riconoscere, all'interno di una copertura omogenea, la vegetazione stressata. Di conseguenza, il dispendio di risorse, temporali ed economiche, richiesti dalle campagne di monitoraggio a terra, può essere ridotto, circoscrivendo misure e interventi nelle aree maggiormente colpite.

Per la pineta di Classe, nella quale la salinizzazione attualmente in corso rappresenta l'unico fattore di stress, i valori di NDVI sono spazialmente compatibili con la distribuzione della concentrazione salina dell'acquifero. Inoltre è stato possibile stabilire un livello di tollerabilità per i Boschi termofili di caducifoglie, pari a 5-6 g/l. Per la pineta di San Vitale invece, anticamente disturbata da questo fenomeno e caratterizzato da un sistema idro-morfologico complesso, è stato necessario considerare anche l'influenza di altri parametri (densità di pini e spessore zona vadosa) per spiegare su quasi tutta l'area i risultati di NDVI ottenuti.

Infine, il recente sviluppo di sensori multispettrali satellitari a maggiore risoluzione spaziale, potrebbe consentire di identificare le diverse specie, che costituiscono gli ordini considerati, migliorando la comprensione degli effetti legati sia alla loro distribuzione rispetto la micro-morfologia che alla loro diversa tollerabilità alla concentrazione salina.

Bibliografia

- 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*, 80(3): 239-243.
- Diani L., Ferrari C., (2007), "La vegetazione della Pineta di San Vitale e il pattern spaziale di Pinus Pinea". Monitoraggio e salvaguardia della Pineta di San Vitale e Classe. Rapporti Tecnici, Ravenna.
- Eidenshink J.C. (1992), "The 1990 Conterminous U.S. AVHRR Data Set", *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, 58(6): 809-8013.
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G. HP., Stuurman R.J. (2007), "Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model", *Journal of Hydrology*, 340: 94-104.
- Mollema P.N., Antonellini M., Dinelli E., Gabbianelli G., Greggio N., Stuyfzand P.J. (2013), "Hydrochemical and physical processes influencing salinization and freshening in Mediterranean low-lying coastal environments", *Applied Geochemistry*.
- Padula M. (1968), "Ricerche sulle condizioni ecologiche dei boschi di S. Vitale e di Classe (Ravenna)", *Annali dell'Accademia Italiana delle Scienze Forestali*, 17: 173-244.
- Parida A.K., Das A.B. (2005), "Salt tolerance and salinity effects on plants: a review", *Ecotoxicology and environmental safety*, 60(3): 324-349.
- Piccoli F., Gerdol R., Ferrari C. (1991), "Vegetation Map of St. Vitale pinewood (Northern Adriatic coast, Italy)", *Phytocoenosis*, 337-342.
- Weier J., Herring D. (1999), Measuring Vegetation (NDVI RVI). <http://Earthobservatory.nasa.gov>.