

NUOVE TECNOLOGIE PER LO STUDIO DELLA VEGETAZIONE
IN RELAZIONE AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Le ricerche descritte in questa pubblicazione sono state svolte nell'ambito del Work Package 2.4 del progetto RIADE – Ricerca Integrata per l'Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla Desertificazione (<http://www.riade.net>) cofinanziato dal MIUR per il Programma Operativo Nazionale di "Ricerca, Sviluppo Tecnologico ed Alta Formazione" 2000-2006.

Nuove tecnologie per lo studio della vegetazione
in relazione ai cambiamenti climatici

A cura di

*Ludovica Giordano
Claudia Trotta
Patrizia Menegoni
Gabriele Schino
Flavio Borfecchia*

2006 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie
l'Energia e l'Ambiente

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 88-8286-153-8

NUOVE TECNOLOGIE PER LO STUDIO
DELLA VEGETAZIONE IN RELAZIONE
AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

A cura di

LUDOVICA GIORDANO
CLAUDIA TROTTA
PATRIZIA MENEGONI
GABRIELE SCHINO
FLAVIO BORFECCHIA



ELENCO DELLE MONOGRAFIE

RIADE “Ricerca Integrata per l’Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DEsertificazione” ha proposto e realizzato un avanzamento non solo nelle conoscenze settoriali, ma nell’approccio integrato e multidisciplinare, indispensabile per una tematica così complessa come la desertificazione. Di seguito sono riportate le 12 monografie prodotte nel corso delle attività di progetto, che documentano il lavoro svolto ed i risultati conseguiti.

1. La Desertificazione in Italia e il progetto RIADE
2. Caratterizzazione tipologica dei fenomeni di desertificazione nell’Italia meridionale ed insulare
3. Indicatori di desertificazione: approccio integrato e supporto alle decisioni
4. Tecnologie innovative per l’analisi di variabili climatiche
5. Nuove tecnologie per lo studio della vegetazione in relazione ai cambiamenti climatici
6. Ricerca di metodi innovativi per l’analisi e la valutazione dell’erosione dei suoli mediante analisi isotopiche
7. La sostanza organica e la desertificazione: aspetti sperimentali e modellistica
8. Salinizzazione e qualità delle acque: impatti e ipotesi di mitigazione
9. Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: dall’analisi conoscitiva alle strategie di salvaguardia e tutela
10. Lettura dinamica delle relazioni tra territorio, insediamenti umani ed utilizzo delle risorse naturali: sistematizzazione e riproposizione in chiave innovativa delle conoscenze e tecniche tradizionali
11. Modellistica ambientale e sistemi di supporto alle decisioni per la lotta alla desertificazione
12. Appunti da un viaggio di studio...ciò che abbiamo imparato e che non avremmo altrimenti appreso (dal Master F-RIADE)

<http://www.riade.net>

Ricerca Integrata per l’Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DEsertificazione



INDICE

STUDIO DELLA VEGETAZIONE TRAMITE TELERILEVAMENTO	9
1. PROBLEMATICHE GENERALI	11
Bibliografia	12
2. LE AREE DI STUDIO.....	13
2.1 Introduzione	13
2.2 Inquadramento generale	13
2.3 Inquadramento climatico e fitoclimatico	15
2.4 Bibliografia	17
3. LA VEGETAZIONE DELLE AREE DI PANTANO E DI MONTE COPPOLO- ROTONDELLA	19
3.1 Introduzione	19
3.2 Materiali e metodi	19
3.2.1 <i>Metodologie di indagine in campo (indagini floristiche, fisionomico- strutturali, paesaggistiche)</i>	19
3.2.2 <i>Elaborazione delle carte di vegetazione</i>	20
3.3 Risultati	21
3.3.1 <i>Le carte della vegetazione reale di Pantano e Monte Coppolo- Rotondella</i>	21
3.3.2 <i>La vegetazione del Bosco Pantano di Policoro</i>	21
3.3.3 <i>La vegetazione di Monte Coppolo-Rotondella</i>	31
3.3.4 <i>Il paesaggio</i>	32
3.4 Discussione	34
3.5 Bibliografia	35
3.6 Appendice: letteratura sulle aree di studio	36
4. STIMA DA SATELLITE DEL <i>LEAF AREA INDEX</i> (LAI).....	39
4.1 Introduzione	39
4.2 Materiali e metodi	40
4.2.1 <i>Campionamento del LAI</i>	40
4.2.2 <i>Pre-processing delle immagini satellitari</i>	41
4.2.3 <i>Indici spettrali di vegetazione (VI)</i>	42
4.2.4 <i>Metodologia di upscaling dalle misure a terra ai dati satellitari</i>	43
4.2.5 <i>Analisi statistiche</i>	45
4.3 Risultati	45
4.3.1 <i>Variazioni nel LAI misurato a terra</i>	45
4.3.2 <i>Relazioni fra LAI e dati satellitari Ikonos</i>	46
4.3.3 <i>Relazioni fra LAI e dati satellitari Landsat</i>	48
4.4 Discussione	50
4.5 Bibliografia	50

5. ANALISI MULTITEMPORALE DELLA VEGETAZIONE.....	53
5.1 Introduzione	53
5.2 Materiali e metodi	54
5.2.1 <i>Indici di vegetazione</i>	54
5.2.2 <i>Pre-processing delle immagini satellitari</i>	55
5.2.3 <i>Dati meteorologici</i>	56
5.2.4 <i>Analisi statistiche</i>	56
5.3 Risultati	56
5.3.1 <i>Serie storica di parametri climatici e indici di vegetazione</i>	56
5.3.2 <i>Relazioni fra parametri climatici e indici di vegetazione</i>	57
5.4 Discussione	60
5.5 Bibliografia	61
6. SENSORI AEROSPAZIALI PER IL MONITORAGGIO DEI FENOMENI DI DESERTIFICAZIONE.....	65
6.1 Introduzione	65
6.2 Campagne di misura	66
6.2.1 <i>Aree di studio</i>	66
6.2.2 <i>Rilievi a terra</i>	68
6.2.3 <i>Rilievi aerei</i>	70
6.3 Elaborazione dei dati misurati in campo	76
6.3.1 <i>Lo Spettrometro ASD</i>	76
6.3.2 <i>Parametri biofisici e firme iperspettrali</i>	77
6.3.3 <i>Simulazione di sensori multispettrali</i>	90
6.4 Elaborazione dei dati telerilevati da ASPIS	93
6.4.1 <i>Il sistema</i>	93
6.4.2 <i>Preprocessing</i>	96
6.4.3 <i>Stima dei parametri biofisici</i>	99
6.5 Intercomparazione di sensori satellitari ed aerei	101
6.6 Discussione	106
6.7 Bibliografia	109
6.8 Appendice: Parametri del processo di ortocorrezione	110
7. CONCLUSIONI.....	117

STUDIO DELLA VEGETAZIONE TRAMITE TECNICHE DI BIOLOGIA MOLECOLARE	119
8. UN APPROCCIO MOLECOLARE ALLA DESERTIFICAZIONE: STUDIO IN GRANO DURO DI GENI CORRELATI ALLO STRESS IDRICO	
.....	121
8.1 Introduzione	121
8.2 Materiali e metodi	123
8.2.1 <i>Materiale biologico vegetale</i>	124
8.2.2 <i>Crescita delle piante e simulazione dello stress in serra controllata</i>	
.....	124
8.2.3 <i>Estrazione di RNA totale, purificazioni e amplificazione</i>	126
8.2.4 <i>Selezione dei primer ed esperimenti di amplificazione rt-pcr</i>	126
8.2.5 <i>Analisi bioinformatica delle sequenze</i>	127
8.2.6 <i>Esperimenti di Real-time RE-PCR</i>	127
8.3 Risultati	128
8.3.1 <i>RT-PCR con i primer drebfor1 e drebrev1</i>	128
8.3.2 <i>Analisi genetica</i>	129
8.3.3 <i>Risultati della Real-time RT-PCR</i>	131
8.3.4 <i>Prove in campo sperimentale</i>	133
8.4 Discussione	134
Ringraziamenti	134
8.5 Bibliografia	134

STUDIO DELLA VEGETAZIONE TRAMITE TELERILEVAMENTO

1. PROBLEMATICHE GENERALI

L. Giordano, G. Schino, C. Trotta

Le comunità biotiche degli ecosistemi naturali rispondono in maniera complessa ai cambiamenti climatici. Le comunità vegetali mostrano cambiamenti nella fisiologia, crescita e produttività primaria, le specie animali e vegetali alterano la loro distribuzione e abbondanza, e modificano la stagionalità dei loro cicli vitali [1,2,3,4].

Alcuni di questi effetti possono contribuire a mitigare i cambiamenti climatici stessi o le loro conseguenze. Ad esempio, un aumento della concentrazione di anidride carbonica può favorire la crescita vegetale portando a un accumulo di biomassa e quindi sequestrando parte della CO₂ atmosferica. Allo stesso modo, un aumento delle temperature medie può aumentare la durata della stagione di crescita e quindi favorire ulteriormente il sequestro di CO₂.

La maggior parte delle nostre conoscenze sulle risposte degli ecosistemi ai cambiamenti climatici deriva da studi condotti a latitudini medio-alte, dove l'effetto prevalente sembra essere una anticipazione e quindi un allungamento della stagione di crescita come conseguenza dell'aumento delle temperature medie [5].

Assai meno è noto sulla risposta degli ecosistemi posti a latitudini medio-basse quali quelle degli ambienti mediterranei. In effetti, a queste latitudini i cambiamenti climatici innescano probabilmente fenomeni contrastanti, così che prevederne l'effetto prevalente diviene difficile. Ad esempio in ambienti mediterranei, dove la disponibilità idrica costituisce il principale fattore limitante per la crescita delle piante durante la stagione estiva, l'effetto "fertilizzante" delle aumentate concentrazioni di CO₂ può non avere modo di manifestarsi. Al contrario, le aumentate temperature medie possono portare ad una riduzione anziché ad un aumento della durata della stagione vegetativa.

In termini generali quindi, abbiamo bisogno di maggiori informazioni sulla risposta degli ecosistemi naturali mediterranei ai cambiamenti climatici [6], e di dati empirici che ci consentano di correlare le previste variazioni del clima con una probabile risposta prevalente di questi ecosistemi.

La scelta del telerilevamento satellitare per lo studio della vegetazione è ampiamente documentata in letteratura, in particolare per produrre inventari forestali, carte della vegetazione, studi di parametri biologici (quali indice di area fogliare, biomassa, evapotraspirazione ecc.) e per la previsione delle produzioni agricole [7,8,9,10].

Il telerilevamento, infatti, costituisce un metodo altamente tecnologico per l'acquisizione a distanza di dati ed informazioni relative a fenomeni e caratteristiche della superficie terrestre, in quanto, tra gli altri vantaggi, offre la possibilità di investigare il territorio oltre lo spettro del visibile, estendendo in pratica le nostre capacità sensoriali: l'osservazione in lunghezze d'onda non percepite dall'occhio umano, la stima delle temperature a distanza e la visione notturna od in condizioni atmosferiche difficili sono alcune delle prerogative consentite dalla tecnologia dei sensori ottici e/o radar installati su aerei o su piattaforme orbitanti. L'osservazione regolare e frequente della stessa porzione di territorio permette un controllo continuo delle condizioni ambientali e delle sue dinamiche (ad esempio per il monitoraggio della vegetazione, delle acque, dei cambiamenti nell'uso del suolo ecc.), e offre la possibilità di produrre carte tematiche tramite dati digitali sempre aggiornati [11,12].

Il lavoro svolto nell'ambito del *Work Package 2.4* del progetto RIADE ha avuto quindi un triplice scopo:

1. svolgere un'indagine qualitativa di inquadramento e descrizione della componente vegetale in due aree caratterizzate da clima e vegetazione mediterranea;
2. svolgere un'indagine quantitativa su uno dei parametri biofisici fondamentali di questi ecosistemi forestali (il LAI, *Leaf Area Index*) e definirne le sue relazioni con dati telerilevati da satellite;
3. condurre un'analisi storica dei cambiamenti della vegetazione nel corso degli ultimi venti anni e delle loro relazioni con i cambiamenti climatici.

Bibliografia

- [1] Schwartz M. D., 1998. Green-wave phenology. *Nature*, vol. 394, 839-840.
- [2] Menzel A., Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, vol. 397, p. 659.
- [3] Peñuelas J., Filella I., 2001. Responses to a warming world. *Science*, vol. 294, 793-795.
- [4] Myneni R. B., Keeling C. D., Tucker C. J., Asrar G. & Nemani R. R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, vol. 386, 698-702.
- [5] Peñuelas J., Filella I., Comas P., 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 8, 531-544.
- [6] Scarascia-Mugnozza G., Oswald H., Piussi P., Radoglou K., 2000. Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management* 132, 97-109.
- [7] CCRS-Canada Centre for Remote Sensing (1998). Remote Sensing Tutorial (on line) capp. 2,4,5: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/indexe.html>
- [8] FAO-Sustainable Development Department , 1999a. Satellite Imagery to Assist Forest Management – Pilot study in Morocco. *Fao Remote Sensing for Decision-makers Series*, no. 15.
- [9] FAO-Sustainable Development Department (1999b). Satellite Imagery for Rangeland Assessment and Monitoring – Pilot study in Morocco. *Fao Remote Sensing for Decision-makers Series*, no. 16.
- [10] Bauer, M.E., T.E. Burk, A.R. Ek, P.R. Coppin, S.D. Lime, T.A. Walsh, D.K. Walters, W. Befort, and D.F. Heinzen, 2001. Satellite Inventory of Minnesota Forest Resources. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.
- [11] Gomasca M.A., 1997. Introduzione al telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali. *Arte Stampa, Daverio (VA)*.
- [12] Di Gregorio A. (1991) Utilizzo delle immagini da satellite nella cartografia dell'uso del suolo. *Agricoltura e Innovazione* no. 17: 46-67.

2. LE AREE DI STUDIO

C. Trotta

2.1 Introduzione

Le due aree di studio descritte di seguito fanno parte dell'*area pilota* del progetto RIADE che si estende dalla zona nord-occidentale della Puglia alla pianura del Metapontino in Basilicata. In particolare, esse si collocano nel settore sud-occidentale dell'arco ionico lucano (Figura 2.1) e sono state scelte in quanto presentano cenosi vegetali relativamente indisturbate, come descritto sommariamente nel paragrafo successivo e più approfonditamente nel capitolo 3.

L'area di studio "Bosco Pantano Sottano di Policoro", che di seguito sarà semplicemente indicata con la denominazione "Pantano", è un'area pianeggiante localizzata sulla costa, al contrario, l'area di studio di "Monte Coppolo-Rotondella" si trova nell'interno ed è una zona collinare-montuosa.

I siti ricadono nella parte medio-bassa del bacino del fiume Sinni, in provincia di Matera, il cui corso, sotto il profilo geologico, è caratterizzato nella parte centrale da rocce semipermeabili che comprendono formazioni sabbiose, conglomerati del pliocene e depositi del quaternario, mentre nel Basso Sinni si ritrovano terreni impermeabili, argille scagliose, argille azzurre, scisti argillosi e sabbie argillose del pliocene [1].

2.2 Inquadramento generale

Il bosco Pantano di Policoro è l'ultimo residuo di una delle più importanti foreste planiziali umide dell'Italia meridionale che fino agli anni trenta del secolo scorso, prima della Bonifica idraulica e della successiva Riforma Agraria e Fondiaria del 1950, si estendeva in tutto l'arco ionico per 6000 ettari di cui 1600 di bosco e 1100 di stagni [2]. Nel corso dei secoli, in quest'area, si sono verificate forti trasformazioni territoriali legate allo sviluppo demografico ed allo sfruttamento delle terre per scopi agricoli. Solo pochissime aree naturali sono sopravvissute ai fenomeni di degrado soprattutto

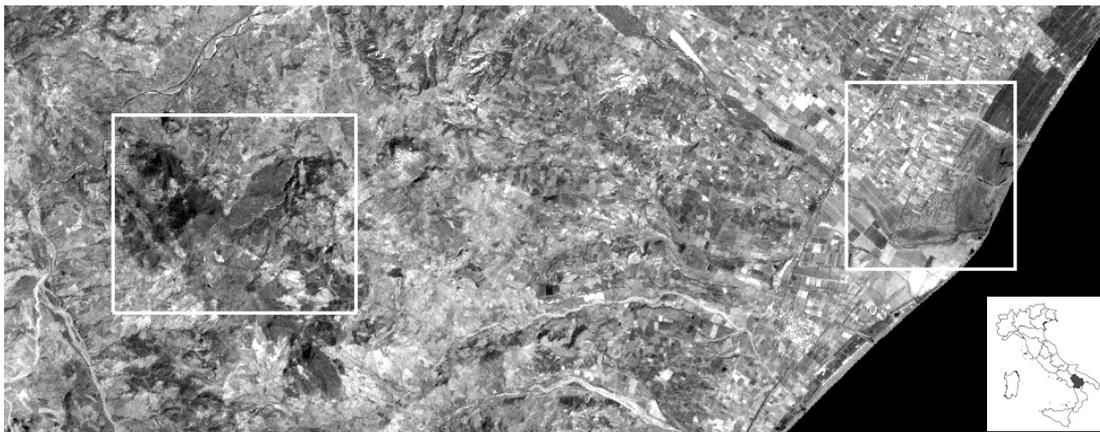


Figura 2.1 – Localizzazione delle due aree di studio riportate su una immagine Landsat ETM pancromatica (i riquadri corrispondono alle immagini IKONOS usate in questo lavoro). Sulla sinistra l'area di studio "Monte Coppolo-Rotondella", sulla destra "Pantano". Nell'angolo in basso a destra è riportata in evidenza la regione Basilicata

grazie alla pratica dei proprietari terrieri di riservare i boschi per le attività venatorie. Attualmente, il bosco ricopre una superficie complessiva di circa 500 ettari ed è costituito da due complessi distinti individuati come Pantano Sottano e Pantano Soprano. Il Sottano ha un'estensione di circa 400 ettari ed è delimitato dalla costa, dal fiume Sinni e dalla strada statale 106. Il Soprano, parzialmente distrutto da un grosso incendio nel 1981, oggi occupa una superficie di appena 20 ettari ed è situato più a monte rispetto al Sottano tra la ss 106 e la superstrada sinnica.

L'area di studio Pantano, che come già detto interessa il solo bosco Sottano, ha un'elevata valenza naturalistica in quanto presenta una notevole diversità di ambienti e di habitat (foce, canali, stagni, litorale sabbioso, macchia e bosco), costituendo rifugio per la fauna ornitica in migrazione, per vari vertebrati ed invertebrati e per la numerosa entomofauna presente qui con diversi endemismi [3]. Infatti, segnalata nel 1971 dalla Società Botanica Italiana come meritoria di tutela [4], l'area è attualmente Sito di Importanza Comunitaria (SIC) in base alla direttiva comunitaria Habitat e dal 1999 Riserva Naturale Regionale ai sensi della legge regionale 28/94, con una superficie di 480 ettari.

La vegetazione nella parte più interna dell'area è prevalentemente rappresentata da un bosco igrofilo azonale con caratteristiche centroeuropee [5], mentre in prossimità della linea di costa la vegetazione è caratterizzata da comunità psammofile tipiche delle dune sabbiose. La fascia adiacente retrodunale è invece ricoperta da mosaici ad alofile e da macchia mediterranea costituita da cespugli di sclerofille sempreverdi. Nelle radure tra la macchia e lungo i sentieri si sviluppano comunità erbacee che costituiscono tipologie prative aride.

L'area di studio di Monte Coppolo-Rotondella si trova a circa 15 km dalla costa, in un territorio topograficamente più complesso e caratterizzato da un paesaggio di tipo collinare e montuoso. Localizzata tra i Comuni di Rotondella, Valsinni e Nova Siri, l'area ha una estensione di circa 800 ettari e si sviluppa tra i 500 e gli 800 m sul livello del mare. Il Monte Coppolo ricade nell'estremità orientale del Parco Nazionale del Pollino.

L'area, sebbene in contiguità con terreni agricoli coltivati, presenta una vegetazione con un certo grado di naturalità, in cui attualmente si riscontrano limitate attività antropiche: la fruizione turistica a beneficio di pochi escursionisti ed il pascolo ovino e bovino.

Le diverse formazioni vegetali che si rinvencono hanno estensione variabile e si distribuiscono anche qui in funzione delle diverse caratteristiche ambientali: sui versanti orientali e sud-orientali, al di sotto dei 700 metri circa, compare una zona a macchia mediterranea alta omogenea e chiusa, mentre nella fascia soprastante si sviluppa un bosco caducifoglio misto con prevalenza di carpini e querce, queste ultime con grado di copertura decrescente arrivano fin quasi alla sommità del monte dove sono però evidenti le tracce di un incendio che risale a qualche anno addietro. È infatti questa la formazione che presenta segnali maggiori di disturbo: oltre ad essere attraversata dalla strada che collega Valsinni a Nova Siri, è costantemente interessata dal pascolo e più raramente dagli incendi. Proseguendo poi verso nord il bosco misto mesofilo lascia il posto ad una formazione matura di leccio che occupa tutto il versante nord-orientale del monte e presenta una copertura uniforme.

Frequenti nella zona, così come lungo il litorale, risultano i rimboschimenti a conifere impiantati nei decenni passati per le sistemazioni idraulico-forestali e con finalità protettive nei confronti dell'erosione costiera [6,7].

2.3 Inquadramento climatico e fitoclimatico

Il clima in entrambe le aree è di tipo mediterraneo con temperature medie mensili sempre al di sopra dello zero, precipitazioni concentrate in autunno ed inverno ed un periodo di aridità durante l'estate. Le precipitazioni medie annuali sono di 535 mm per Pantano e di 726 mm per Monte Coppolo-Rotondella, mentre la temperatura media annuale si aggira per entrambe intorno ai 16 gradi. Le temperature medie minime si hanno in gennaio (8,4 °C per Pantano e 7,6 °C per M.Coppolo) e le massime in agosto (25,1 °C per Pantano) e luglio (25,9 °C per M.Coppolo).

In Figura 2.2 sono mostrati i diagrammi climatici di due stazioni meteorologiche poste nelle vicinanze delle aree di studio nei quali sono riportati gli andamenti mensili delle precipitazioni e delle temperature calcolati su una serie trentennale di dati (1970-1999).

Sotto l'aspetto fitoclimatico (Tabella 2.1) entrambe le zone in esame rientrano nella fascia del *Lauretum* [8] secondo la classificazione del Pavari e secondo la classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez [9] nei bioclimi termomediterranei subumido (M.Coppolo-Rotondella) e secco (Pantano), avendo calcolato per ogni stazione l'indice ombrotermico annuale ($I_o = P_m/T_m$, ovvero il rapporto tra la somma delle precipitazioni mensili dei mesi con temperature superiori a zero gradi e la somma delle temperature medie mensili superiori a zero gradi).

Per inquadrare ulteriormente il clima del territorio considerato si è fatto riferimento agli indici di Lang, De Martonne, Emberger e Mitrakos.

Il pluviofattore di Lang è un indice di umidità di una stazione ed è dato dal rapporto tra precipitazioni (in cm) e temperature medie annue [$P_i = P/T$], secondo tale indice il limite tra vegetazione arborea e steppica corrisponde a valori del pluviofattore inferiori a 1, mentre per valori inferiori a 0,5 si ha il passaggio alla vegetazione desertica.

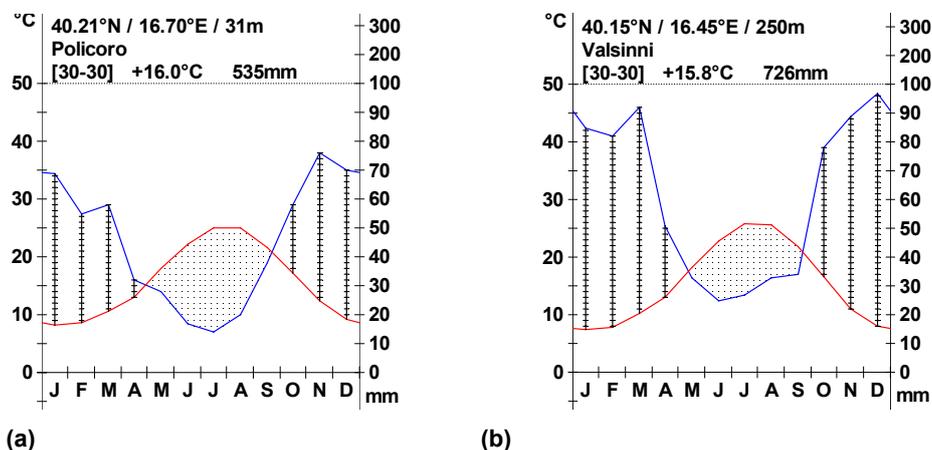


Figura 2.2 – Diagrammi climatici per Pantano (a) e Monte Coppolo-Rotondella (b) basati su medie trentennali mensili di temperature (linea rossa) e precipitazioni (in blu), l'area di intersezione delle due curve rappresenta il periodo di siccità estiva

Tabella 2.1 – Inquadramento fitoclimatico

STAZIONE	FITOClima DI PAVARI	BIOCLIMA DI RIVAS-MARTINEZ
Valsinni	Fascia del <i>Lauretum</i> sottozona media e fredda	Clima termomediterraneo subumido
Policoro	Fascia del <i>Lauretum</i> sottozona calda	Clima termomediterraneo secco

Tabella 2.2 – Riepilogo indici climatici

STAZIONE	LANG	DE MARTONNE	EMBERGER
Valsinni	4,59	28,13	62,43
Policoro	3,35	20,61	57,82

L'indice di De Martonne [$DM = P/(T+10)$] è un indice di aridità derivato dal pluviofattore di Lang e serve a definire anche se approssimativamente l'appartenenza a particolari ambienti: $DM < 5$ deserto, 5-10 steppa, 10-20 prateria, 20-30 macchia, >30 foresta.

Il Quoziente Pluviometrico di Emberger $Q = 100P / (M^2 - m^2)$ è utilizzato per descrivere le caratteristiche bioclimatiche dell'area mediterranea basandosi sulle medie dei valori estremi della temperatura (M media delle massime del mese più caldo e m media delle minime del mese più freddo), in relazione ai valori assunti dall'indice si parla di clima mediterraneo arido (Q: 10-20), semiarido (20-50); temperato (50-90) o umido $\Rightarrow 90$.

In Tabella 2.2 sono riportati i valori medi degli indici calcolati sulla serie di dati trentennali per le due stazioni meteorologiche.

Gli indici di Mitrakos [MCS (Monthly Cold Stress) = $8(10-t)$; MDS (Monthly Drought Stress) = $2(50-P)$] sono ampiamente utilizzati in ambito mediterraneo perché basati sulla conoscenza dello stress d'aridità estivo e dello stress da freddo invernale, in quanto determinano l'areale di distribuzione delle specie mediterranee (Figura 2.3).

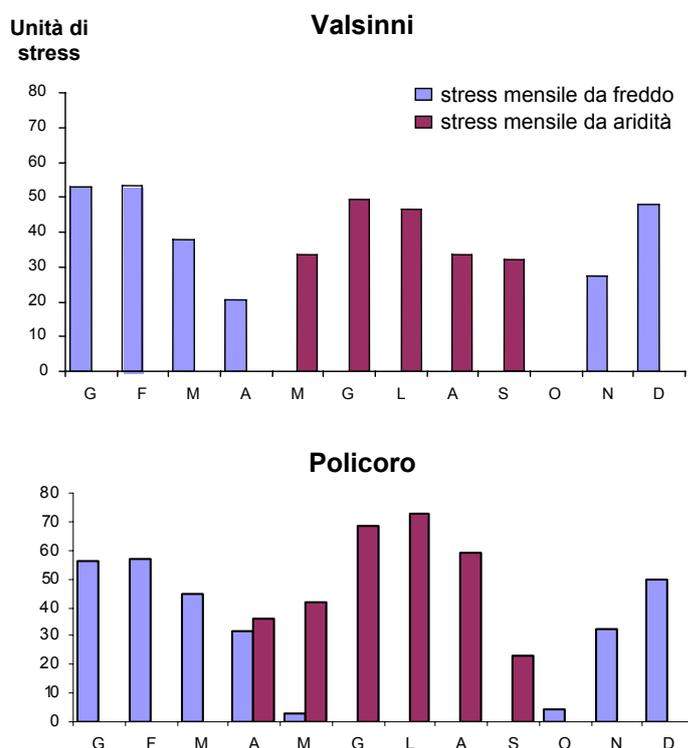


Figura 2.3 – Indici di Mitrakos: andamento medio dello stress da freddo e da aridità durante l'anno per le stazioni di Valsinni e Policoro

Le unità di stress sono definite su basi ecofisiologiche: lo stress di aridità si basa sulle precipitazioni mensili, partendo dal presupposto che in ambiente mediterraneo, per precipitazioni inferiori ai 50 mm, le piante subiscono uno stress dovuto all'aridità; allo stesso modo, lo stress da freddo si basa sui valori delle temperature minime mensili (t) e sul valore di 10 °C inteso come soglia dell'attività vegetativa [10].

In definitiva le zone in esame sono caratterizzate dall'aver un inverno relativamente mite (che non ostacola in maniera significativa l'accrescimento delle piante) ed una estate lunga e calda che incide notevolmente (le piante si trovano in stasi vegetativa) sull'attività della vegetazione.

2.4 Bibliografia

- [1] De Stefano A., Lorusso M., 2004 - L'idrologia del territorio regionale: i bacini lucani. Conoscere la Basilicata. Regione Basilicata.
- [2] Settembrino G., 1990. Un'arca in riva al mare - Il Bosco di Policoro. Basilicata Regione Notizie, n.1, 58-67.
- [3] Bavusi A., Settembrino G., 1992. Il Bosco di Policoro. Natura in Basilicata. Alfagrafica Volonnino Lavello. 103-112.
- [4] S.B.I., Gruppo di lavoro per la conservazione della natura della Società Botanica Italiana, 1971. Censimento dei Biotopi di rilevante interesse vegetazionale meritevoli di conservazione in Italia. Vol. 1- Camerino 1971
- [5] Fascetti S., 1996. Alcune fitocenosi caratteristiche del paesaggio vegetazionale della Basilicata. Risorsa natura in Basilicata, Basilicata Regione Notizie, 9 , n. 5-6, pp. 143-146.
- [6] Cocca G., Cocca C., 2005. Le formazioni boschive litoranee in provincia di Matera: funzioni e problematiche gestionali. Sezione Speciale - Cambiamento climatico e inquinamento: effetti sulle foreste meridionali, Forest@, 2 (1): 107-109
- [7] D'Antonio D., D'Antonio P., 1995. Difesa e valorizzazione di un territorio fragile. Notizie Basilicata Regione n. 1, pp. 7-20
- [8] Cantore V., F. Iovino e G. Pontecorvo , 1987. Aspetti climatici e zone fitoclimatiche della Basilicata. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ecologia e Idrologia Forestale. Cosenza. Pubblicazione n.2.
- [9] Rivas-Martínez S., Penas A., Luengo M.A., Rivas-Sàenz S., 2002. Worldwide Bioclimatic Classification System. www.globalbioclimatics.org.
- [10] Pignatti S., 1998. I Boschi di Italia - Sinecologia e Biodiversità. UTET. Pagg. 105-117.

3. LA VEGETAZIONE DELLE AREE DI PANTANO E DI MONTE COPPOLO-ROTONDELLA

P. Menegoni, C. Trotta

3.1 Introduzione

In generale, l'utilizzo delle tecniche di telerilevamento per indagini sia qualitative sia quantitative presuppone necessariamente l'esecuzione di rilievi e verifiche a terra poiché, per ottenere risultati e informazioni affidabili non si può prescindere dalla calibrazione delle immagini satellitari mediante correlazione con i dati in campo.

Nell'ambito di questo lavoro sono state pertanto eseguite delle campagne di rilievo a terra, con lo scopo di inquadrare gli aspetti floristici e fisionomico-strutturali della vegetazione e il paesaggio delle aree di studio indagate. Le informazioni raccolte in campo hanno costituito le conoscenze di partenza per l'applicazione di tecniche di elaborazione delle immagini satellitari per la descrizione qualitativa delle due aree di studio ma anche per le indagini quantitative presentate nel capitolo 4.

I risultati dell'analisi condotta e di seguito descritta, basata su rilievi in campo ed elaborazione di immagini telerilevate, hanno consentito di approfondire la conoscenza delle aree di studio e ottenere informazioni dettagliate sulla distribuzione di formazioni vegetali particolarmente importanti che possono risultare utili indicatori di fenomeni di stress per l'ambiente e per la vegetazione naturale, quali le variazioni della falda idrica superficiale, le condizioni più o meno critiche di salinità del suolo, la frequenza degli incendi e la pressione del pascolo e delle attività antropiche.

3.2 Materiali e metodi

Le indagini condotte per approfondire le conoscenze sulle aree di studio si sono avvalse di rilievi in campo, di dati telerilevati ma anche di dati *ancillari*, ovvero di materiale cartografico e bibliografico di supporto alla interpretazione delle immagini satellitari. Nell'ambito di questo lavoro le campagne a terra sono state eseguite con il supporto di informazioni bibliografiche e cartografiche disponibili, fra cui ortofoto aeree (volo AIMA 1988 e 1998) ed una carta delle principali tipologie di vegetazione dell'area di Pantano, messa a disposizione dal Dipartimento di Botanica dell'Università della Basilicata. Le immagini satellitari utilizzate per la produzione di carte della vegetazione sono immagini acquisite dal sensore Ikonos nell'agosto 2004 e nel giugno 2005 (si veda oltre, cap.4), nel periodo primaverile-estivo in cui la maggior parte delle tipologie di vegetazione è al massimo della attività vegetativa.

3.2.1 Metodologie di indagine in campo (indagini floristiche, fisionomico-strutturali, paesaggistiche)

La redazione delle carte di vegetazione, descritte nei paragrafi successivi, è basata sulle seguenti metodologie di indagine:

- Analisi della bibliografia disponibile (vd. appendice);
- Analisi floristiche per l'identificazione di specie di elevato valore ecologico e conservazionistico;

- Analisi di campo attraverso rilievi fitosociologici della vegetazione effettuati col metodo di Braun-Blanquet;
- Elaborazione tabelle sinottiche e identificazione tipologie strutturali e fitosociologiche di vegetazione;
- Identificazione ed analisi di aree omogenee da utilizzare come verità a terra per l'interpretazione delle immagini satellitari e loro georeferenziazione;
- Identificazione delle principali tipologie di paesaggio e degli elementi caratteristici;
- Interpretazione immagini Ikonos ed elaborazione mappe;
- Verifica delle mappe in campo.

La necessità di rendere esportabile il metodo per campagne estensive e indagini in tempi e costi limitati, la complessità dei mosaici locali, il livello di degrado, nonché l'utilizzo di immagini satellitari, ha comportato l'impiego di tecniche di analisi ed interpretazione miste che, ottimizzando le conoscenze già acquisite in loco da dati storici, permettessero di realizzare un quadro esaustivo sullo stato della vegetazione attuale, sulle caratteristiche in termini funzionali e di ecologia del sistema nonché sulle dinamiche in atto.

Le componenti descritte e delimitate spazialmente hanno contribuito, associate ad analisi di carattere più ampio e ad analisi puntuali su specie e problematiche distinte, alla valutazione degli elementi nevralgici per la conservazione dell'habitat e quali di essi siano collegabili a fenomeni di più vasta portata che coinvolgono aree importanti del meridione.

3.2.2 Elaborazione delle carte di vegetazione

Per la produzione di carte della vegetazione reale delle aree di studio è stata utilizzata una classificazione di tipo *supervised*. Questa metodologia prevede l'intervento dell'operatore nella definizione delle categorie da classificare. Infatti, durante una classificazione *supervised* occorre "istruire" il software attraverso l'individuazione di aree caratteristiche (aree di *training*) per ciascuna tipologia di vegetazione o classe di copertura del suolo. È necessario, in altre parole, informare il classificatore sul tipo di risposta spettrale che contraddistingue le diverse tipologie vegetali, affinché esso possa riconoscerle e, quindi, classificarle correttamente in tutta l'area di studio. Le aree deputate a questo scopo devono rispettare determinati criteri [1], ovvero devono essere:

- internamente omogenee così che la vegetazione, il suolo o la coltura presenti in esse siano rappresentativi di una sola categoria;
- grandi abbastanza da non essere localizzate in maniera ambigua all'interno dell'immagine;
- sufficientemente numerose da poter fornire una serie statistica significativa.

Per ciascuna tipologia vegetale definita sono state quindi individuate numerose aree di *training* attraverso specifiche campagne di rilevamento.

Il numero e l'ampiezza delle aree di *training* delle varie tipologie di vegetazione è stato stabilito tenendo in considerazione la rappresentatività della formazione vegetale all'interno dell'area di studio, la sua ubicazione, la risoluzione dell'immagine satellitare, l'estensione del territorio da classificare e infine l'accessibilità delle aree (ad esempio la vicinanza a strade e sentieri).

Queste aree sono state acquisite mediante GPS ottenendo una serie di poligoni che sono stati successivamente posizionati sulle immagini da classificare. Sulla base delle indagini in campo, nonché attraverso un'analisi fotointerpretativa delle ortofoto disponibili, sono state acquisite ulteriori aree campione direttamente digitalizzate a video.

Successivamente le immagini sono state elaborate mediante un algoritmo di classificazione di *massima verosimiglianza* ed applicando un filtro statistico sui pixel classificati, in una finestra 3x3, per rendere più omogenee le classi eliminando il cosiddetto effetto "sale e pepe".

Il software utilizzato per la procedura di classificazione è l'Earth Resource Data Analysis (ERDAS) *Imagine 8.7*.

3.3 Risultati

3.3.1 Le carte della vegetazione reale di Pantano e Monte Coppolo-Rotondella

Le carte della vegetazione ottenute dall'elaborazione di immagini satellitari Ikonos degli anni 2004 e 2005 sono *carte reali attuali* ovvero rappresentano la vegetazione attuale, osservata sul terreno al momento del rilevamento.

Tali carte hanno valenza prevalentemente fisionomico-strutturale e forniscono ulteriori informazioni sull'ecologia dell'area.

Per l'area di Pantano, risultata di estremo interesse sia per la sua valenza ecologica che per gli aspetti di complessità strutturale e funzionale del sistema, si è proceduto a livelli di approfondimento maggiore ottenendo una classificazione con un maggior dettaglio.

Per ovviare ad alcuni problemi di scarsa separabilità spettrale tra classi simili o non omogenee (ad esempio come per il bosco ripariale ed il canneto, il primo con una composizione mista costituita sia da vegetazione arborea sia da cannuccia, specie che forma lo stesso canneto, il secondo praticamente monospecifico a cannuccia) la classificazione è stata eseguita suddividendo l'area in tre parti ed eseguendo tre classificazioni separatamente in cui sono state utilizzate solo le aree di *training* realmente presenti in ognuna delle tre subaree.

Ciò è stato possibile in quanto le tre subaree individuate sono a loro volta caratterizzate da vegetazione predominante e quindi la suddivisione è giustificata anche sotto l'aspetto ecologico e fisionomico-strutturale.

3.3.2 La vegetazione del Bosco Pantano di Policoro

L'area protetta del Bosco Pantano di Policoro è costituita da un vasto mosaico di tipi di vegetazione differenti, risultato del succedersi di condizioni ecologiche molto diverse che si avvicinano dando luogo ad una situazione ambientale complessa e affascinante.

Si riporta di seguito la mappa di vegetazione realizzata (Figura 3.1) in cui sono descritte le categorie strutturali principali.

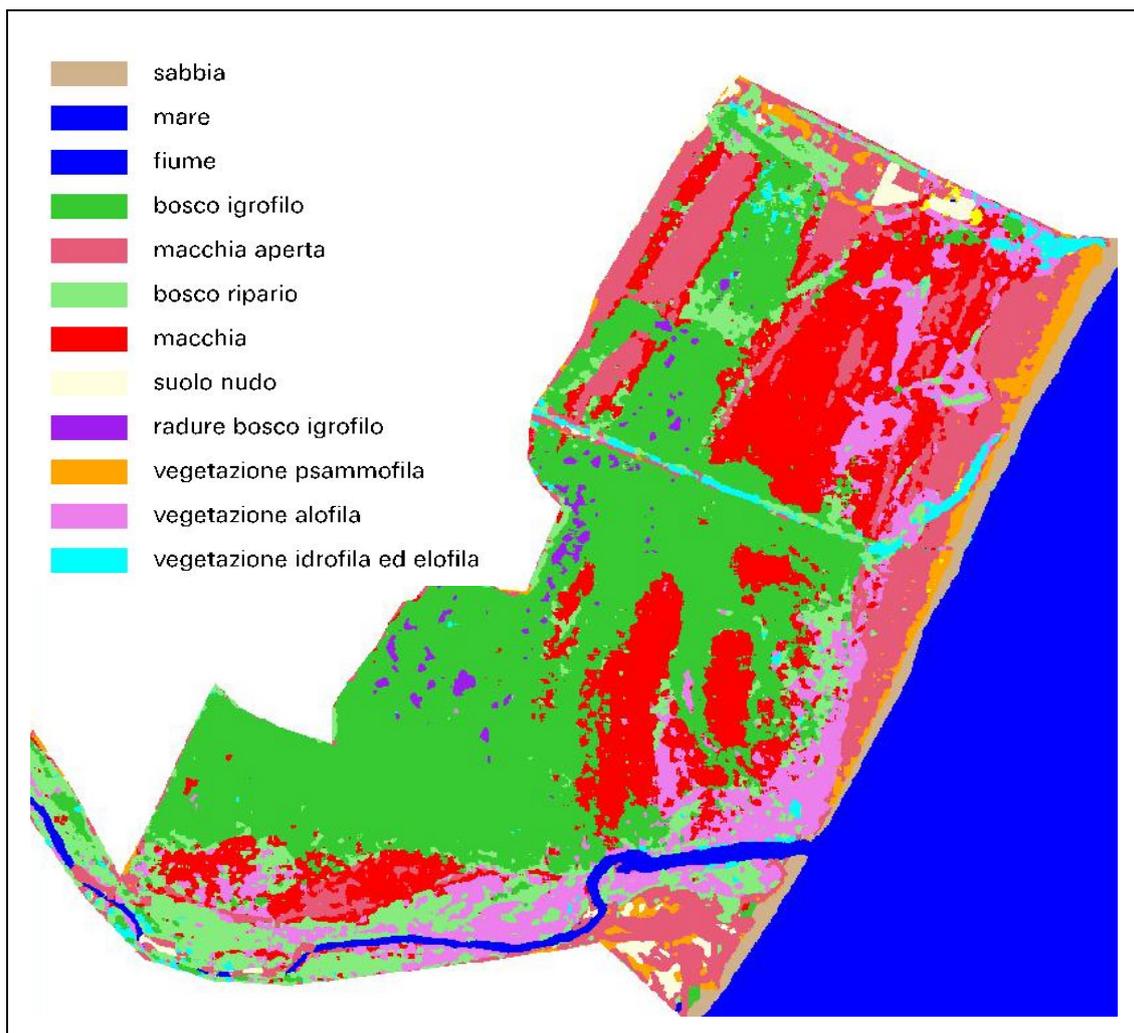


Figura 3.1 – Carta delle macrostrutture di vegetazione dell'area Bosco Pantano di Policoro

Le tipologie più rilevanti ai fini di questo studio sono così riassumibili:

LA VEGETAZIONE DELLE DUNE

Le prime comunità che incontriamo risalendo dal mare verso l'interno sono delle complesse comunità di specie pioniere adattate a situazioni ecologiche estreme: forte insolazione estiva che porta le temperature del suolo a valori estremamente elevati, salinità diffusa, scarsa disponibilità di acqua, se non salinizzata, forti venti, terreno incoerente.

In queste condizioni difficili allo sviluppo della vita vivono un complesso di specie che va sotto il nome generico di psammofite.

Esso comprende tipologie vegetazionali diverse che si organizzano disponendosi in fasce parallele alla costa e che svolgono funzioni specifiche nella stabilizzazione delle dune.

Si tratta di un complesso catenale costituito da: *Salsolo-Cakiletum aegypticae*, *Sporobolo arenarii-Agropyretum juncei*, *Echinophoro spinosae-Ammophiletum arenariae*.

La fascia a psammofite risulta abbastanza povera in termini floristici ma comprende specie con adattamenti morfologici e fisiologici molto spiccati quali: *Sporobolus pungens*, *Cakile maritima*, *Agropyron junceum*, *Echinophora spinosa*, *Euphorbia paralias*, *Euphorbia peplis*, *Eryngium maritimum*, *Medicago marina*, *Ammophila littoralis*, *Juncus acutus*, *Otanthus maritimus*, *Pancratium maritimum* (Figura 3.2).

Nel complesso di queste specie *Ammophila littoralis* e *Agropyron junceum* rivestono un ruolo particolarmente significativo per la loro capacità di trattenimento delle sabbie in relazione alla struttura nonché ampiezza del loro apparato radicale. La loro posizione rispettivamente sulla sommità della duna e sulla parete in pendenza in direzione del mare determinano una fisionomia degli apparati dunali ben riconoscibile.

Tra la prima duna e la macchia interna, una zona umida, discontinua caratterizza il litorale.

Tipica di questi tratti è la vegetazione elofitica a *Phragmites australis*, spesso formante *patches* ampie e pressoché monospecifiche ai margini di pozze o nell'interduna in diffuse aree umide. Nelle aree salmastre soggette a frequenti inondazioni, sono presenti cenosi costituite da alofile perenni in prevalenza succulente ed ascrivibili prevalentemente alla classe *Arthrocnemetea* e *Thero-salicornietea* (Figura 3.3).

In alcuni punti (in particolare nei pressi della foce del Sinni) si riscontra una certa diffusione di salicornia (*Salicornia europaea*), accompagnata da un piccolo corteggio di specie alofile. Tutte queste specie mostrano generalmente una copertura rada, in alcuni casi formano piccoli raggruppamenti più densi su superfici limitate a pochi metri quadri. Nelle aree attigue, umide ma meno salse, su terreni argilloso-sabbiosi, prevalgono gli aspetti vegetazionali a *Juncus acutus* (Figura 3.4).

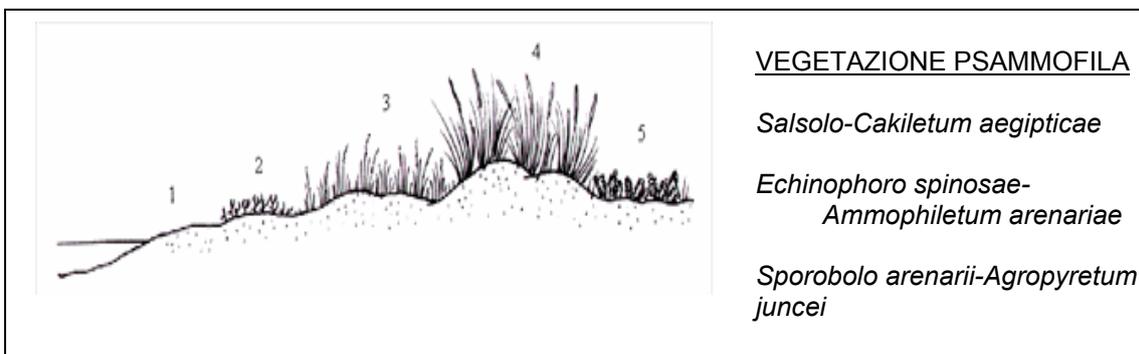


Figura 3.2 – Successione sulla duna litoranea della vegetazione psammofila, complesso catenale costituito da: *Salsolo-Cakiletum aegypticae*, *Sporobolo arenarii-Agropyretum juncei*, *Echinophoro spinosae-Ammophiletuma arenariae*

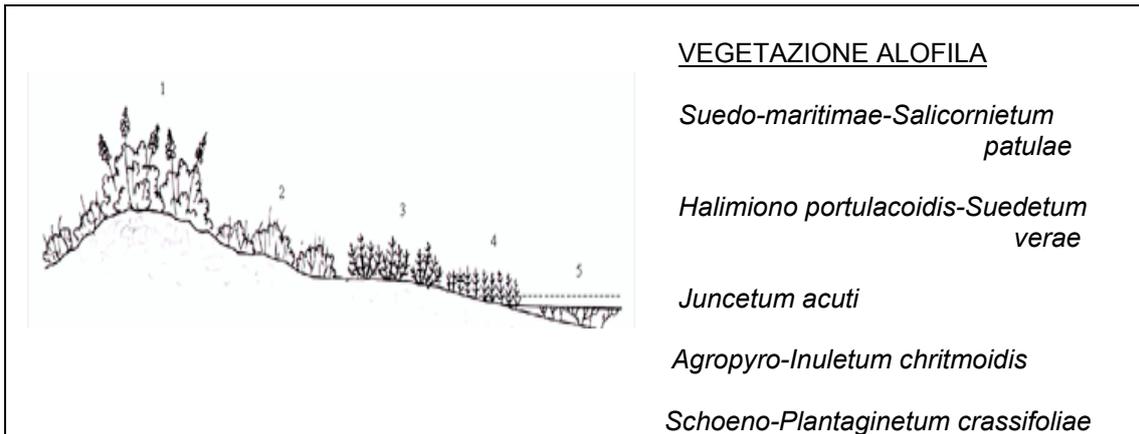


Figura 3.3 – Vegetazione delle aree salmastre soggette a frequenti inondazioni, cenosi costituite da alofile perenni in prevalenza succulente ed ascrivibili prevalentemente alla classe *Arthrocnemetea* e *Thero-salicornietea*. Nelle aree attigue, umide, su terreni argilloso-sabbiosi, ma meno salse, prevalgono gli aspetti vegetazionali a *Juncus acutus*

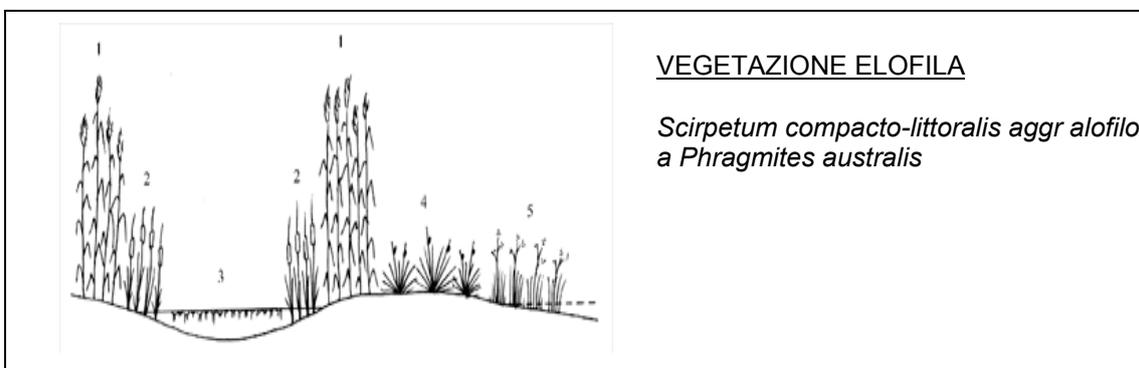


Figura 3.4 – Le elofite appartengono tutte all'ordine *Phragmitetalia* (canneti, tifteti, scirpeti, cariceti) e costituiscono quella cintura di vegetazione ai margini delle zone umide

LA MACCHIA MEDITERRANEA

Nelle aree più interne, protette dalla prima duna, inizia in modo graduale e mosaicato il passaggio a forme di vegetazione più complessa, arbustiva, tipica dei suoli più stabilizzati e più ricchi di sostanza organica.

La macchia, presente diffusamente su gran parte dell'area protetta del bosco di Policoro, si presenta con forme fisionomiche diverse appartenenti all'alleanza *Juniperion lyciae*:

- *Ginepreti* di seconda duna: formazioni caratterizzate dalla presenza rilevante di *Juniperus macrocarpa*;
- *Macchia bassa* con formazioni legnose basse (meno di un metro) derivanti dalla degradazione di boschi e macchie causata dal fuoco ed erosione. Vegetazione discontinua caratterizzata dalla presenza di molteplici aree prative con vegetazione terofitica. Specie rappresentative sono: *Pistacia lentiscus*, *Cistus monspeliensis*, *Phyllirea angustifolia*, *Rosmarinus officinalis*, *Mirtus communis*;
- *Facies a Rosmarinus officinalis* nelle zone retrodunali in continuità con i ginepreti;

- *Facies a Satureja sp.* è rilevabile nelle aree immediatamente retrostanti la prima duna e in alcune aree a contatto con le aree coltivate in prossimità del margine interno dell'area protetta.
- *Facies a Ephedra distachya* è rilevabile prevalentemente nelle aree di interduna;
- *Macchia alta* insediata stabilmente in maniera continua e costituita da specie legnose arbustive a volte associate ad arboree, più o meno uniformi sotto l'aspetto fisionomico e tassonomico. Posizionata al bordo di boschi, rappresenta la fascia a mantello, funzionale alla espansione delle aree boscate. Le specie più rappresentative sono: *Phyllirea angustifolia*, *Pistacia lentiscus*, *Spartium junceum*.

I BOSCHI:

BOSCO IGROFILO

Il bosco igrofilo di Policoro rappresenta uno degli ultimi lembi di foresta planiziale con caratteristiche centro europee dell'Italia meridionale, si estende complessivamente su una superficie di circa 550 ha, in due aree situate sulla sinistra idrografica del fiume Sinni: Bosco del Pantano Soprano e Bosco del Pantano Sottano.

Esso, in base al contesto extrazonale dovuto alle particolari condizioni stazionali, appartiene, secondo Pedrotti [2], all'associazione *Carici-Fraxinetum angustifoliae* che si ritrova lungo i corsi d'acqua e lungo le coste in posizione retrodunale o interdunale.

Esso ne rappresenta la propaggine meridionale più significativa, anche se attualmente sta perdendo le sue caratteristiche di accentuata igrofilia a causa dell'abbassamento della falda freatica con modificazione della composizione media.

L'associazione è stata dapprima inquadrata nell'alleanza *Alno-Ulmion* e successivamente collegata da Dierschke (1975, in [2]) al *Populion albae*.

Il *Carici – Fraxinetum angustifoliae* è una associazione caratterizzata nello strato arboreo da *Fraxinus angustifolia* e *Carex remota*, accompagnato a Pantano Sottano da *Quercus robur*, *Alnus glutinosa*, *Populus alba*, *Ficus carica* e da diverse componenti xero-mediterranee come *Smilax aspera*, *Ruscus aculeatus*, *Rubia peregrina*.

Nel bosco si individuano delle facies più o meno umide con tratti distintivi caratteristici: le stazioni più fresche sono caratterizzate dalla presenza del Frassino ossifillo misto all'Ontano nero, al Pioppo e più raramente alla Farnia, mentre le zone più aride e degradate assumono la fisionomia di boscaglia bassa dove le altre specie arboree coesistono con un ricco strato arbustivo.

Ampie chiarie, risultato di incendi o crollo di grandi esemplari sono caratterizzate da estesi roveti che formano barriere impenetrabili, le zone di margine sono invece caratterizzate da ricostituzioni a macchia nelle situazioni più aride e termofile, o facies con olmo, acero campestre e roseti, in quelle più fresche ed umide.

Nell'area residua del Pantano Soprano, dove il livello medio del terreno è più elevato, si riscontra un diverso rapporto di mescolanza tra le specie; la componente igrofila si impoverisce ed è rappresentata principalmente dai pioppi, dal frassino e sporadicamente dal salice bianco e dall'ontano nero.

In questa zona si rileva una maggior diffusione di cerro e farnia a cui si aggiungono l'alloro (presente con individui a portamento arboreo), l'olmo, l'acero campestre e l'acero minore, l'orniello, la carpinella e l'albero di Giuda.

BOSCO RIPARIO

È rappresentato da una formazione lineare ripariale assoggettata alle piene del corso d'acqua a rapido dinamismo. Essa è costituita da legnose ed erbacee igrofile, caratterizzata da *Salix alba* e *Populus nigra* ed è attribuibile al *Salicetum albae*.

Il livello di degrado legato soprattutto alla fruizione della riva dx si manifesta con discontinuità nel tessuto boschivo, con la presenza di specie alloctone quali *Robinia pseudoacacia* e specie di macchia che colonizzano i tratti di suolo più disturbati.

BOSCHETTI A TAMARIX

Si tratta di piccole estensioni di boschetti a *Tamarix africana* attribuibile alla classe *Nerio-Tamaricetea* Br.-Bl. et O. de Bolós 1958, presenti sulla riva sin della foce del fiume Sinni e in tratti discontinui lungo la costa.

PRATERIE

Si tratta di formazioni erbacee annuali (terofite) o perenni (emicriptofite) di tipo secondario con reinvasione di specie legnose arboreo-arbustive, disturbate da pascolo di animali sia domestici che selvatici, attribuibili alle classi *Tuberarietea guttatae* e *Therobrachypodietea*. Sono presenti un po' in tutta l'area in particolare tra la macchia, nelle aree di margine e sui bordi stradali, dove si arricchiscono in specie ruderali, in funzione della quantità di nutrienti spesso legata alla gestione dei canali che, durante la pulizia determina il posizionamento di materiali del fondo del canale sulle fasce perimetrali.

MOSAICI RETRODUNALI

Nella fascia interdunale, in una vasta zona centrale all'area protetta, si distingue un mosaico di vegetazione costituito prevalentemente da popolamenti a *Erianthus ravennae* e *Schoenus nigricans* ascrivibili all'associazione *Schoeno-Erianthetum* Pignatti 1953.

Questa associazione, si manifesta nel fondo della depressione tra i due cordoni dunali, dove si innesca un processo di erosione interna che tende ad approfondire sempre più la depressione, ad arricchire il terreno in limo e ad avvicinare la falda freatica. Questo processo, sommato al processo che ha dato origine ai suoli alluvionali di queste aree, determina il costituirsi di suoli con profili festonati di sabbie, limi, argille, di spessori molto variabili.

Le condizioni ecologiche risultano dunque molto mutevoli e di conseguenza il mosaico di vegetazione che ne deriva.

La predisposizione all'igrofilia delle due specie è leggermente diversa: *Erianthus ravennae* è più idrofilo di *Schoenus nigricans* che infatti tende a posizionarsi nelle aree più rilevate a contatto con le praterie aride e la macchia.

Si distinguono dunque delle facies a *Schoenus nigricans* e delle facies a *Erianthus ravennae* che si succedono o sia alternano in funzione della variabilità delle condizioni ecologiche.

Nella evoluzione di questa associazione, tipicamente dulciacquicola, si procede verso lo *Schoeno-Plantaginetum crassifoliae*, di cui abbiamo osservato alcune specie in limitate aree, quando aumenta la salinità e verso lo *Schoeno-Molinietum* quando le acque dolci persistono per tempi lunghi.

VEGETAZIONE DEI CANALI

Lungo i canali con acqua perenne dominano le elofite quali *Phragmites australis*, *Carex elata*, *Iris pseudacorus*, *Sparganium erectum* ascrivibili alla classe *Phragmito – Magnocaricetea* Klika in Klika & Novak 1941.

Dove l'acqua è più profonda crescono anche tipologie di vegetazione ascrivibili alle classi *Lenmetea 1955* e *Potametea Tx. & Preis 1942* [3,4].

LE POZZE

Le pozze, depressioni del terreno perennemente inondate, presenti in tutta l'area boschiva e di dimensioni variabili sono un importante rifugio per specie igrofile di rilevante importanza conservazionistica.

Nelle depressioni con acqua stagnante per tutto l'anno o per gran parte di esso, si insediano gruppi monospecifici di Frassino ossifillo, accompagnati, spesso, da esemplari di Salice bianco e da un corteggio di erbacee costituite prevalentemente da una flora erbacea caratteristica a *Carex pendula* e *Iris pseudacorus*, con tipiche e vistose fioriture primaverili.

Dove il livello medio del terreno è più elevato, si riscontra una minore componente igrofila rappresentata principalmente da Pioppi, Frassino e sporadicamente Salice bianco e Ontano nero.

I GIUNCHETI

Nelle aree interne, in prossimità del fiume, umide e salse, popolamenti sparsi a *Juncus maritimus*, *Juncus acutus*, *Phragmites australis* con qualche esemplare di *Tamarix sp.*

Di seguito si riportano le Figure 3.6, 3.7, 3.8 che si riferiscono alle mappe di vegetazione con livelli di approfondimento più elevati ottenute elaborando l'immagine Ikonos del 22 giugno 2005, per poter meglio apprezzare i dettagli delle diverse subaree rappresentate in Figura 3.5, sono riportati gli ingrandimenti delle mappe a scale di visualizzazione differenti.



Figura 3.5 – Schema della suddivisione dell'area Pantano in 3 aree di dimensioni inferiori nelle quali sono state condotte classificazioni separate per poter descrivere la vegetazione in maggior dettaglio (1: rimboschimento; 2: area a mosaici di psammofite ed alofite; 3: area interna e ripariale)

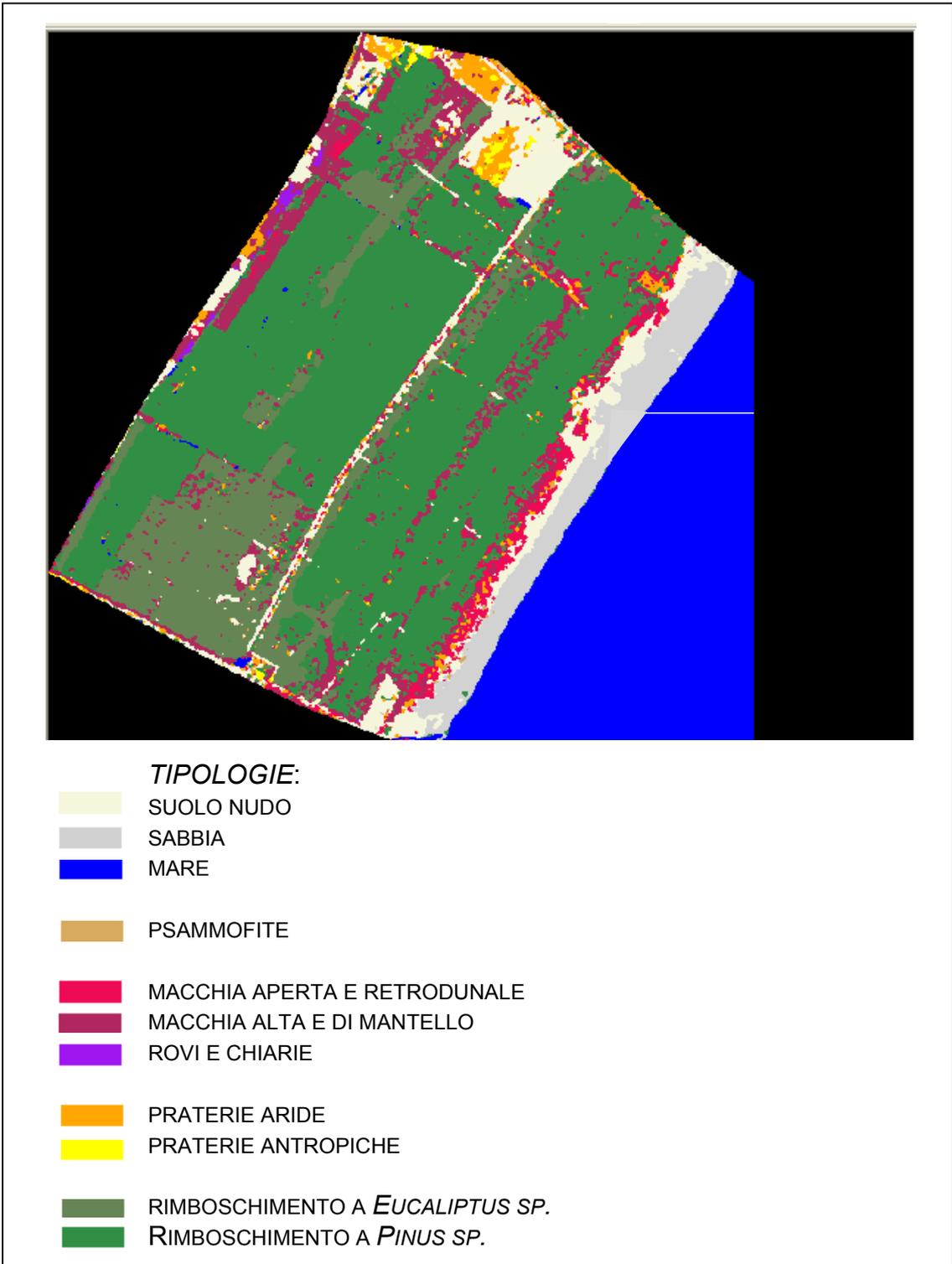


Figura 3.6 – Carta della vegetazione reale della sub-area a rimboscimento del Bosco Pantano di Policoro (area 1)

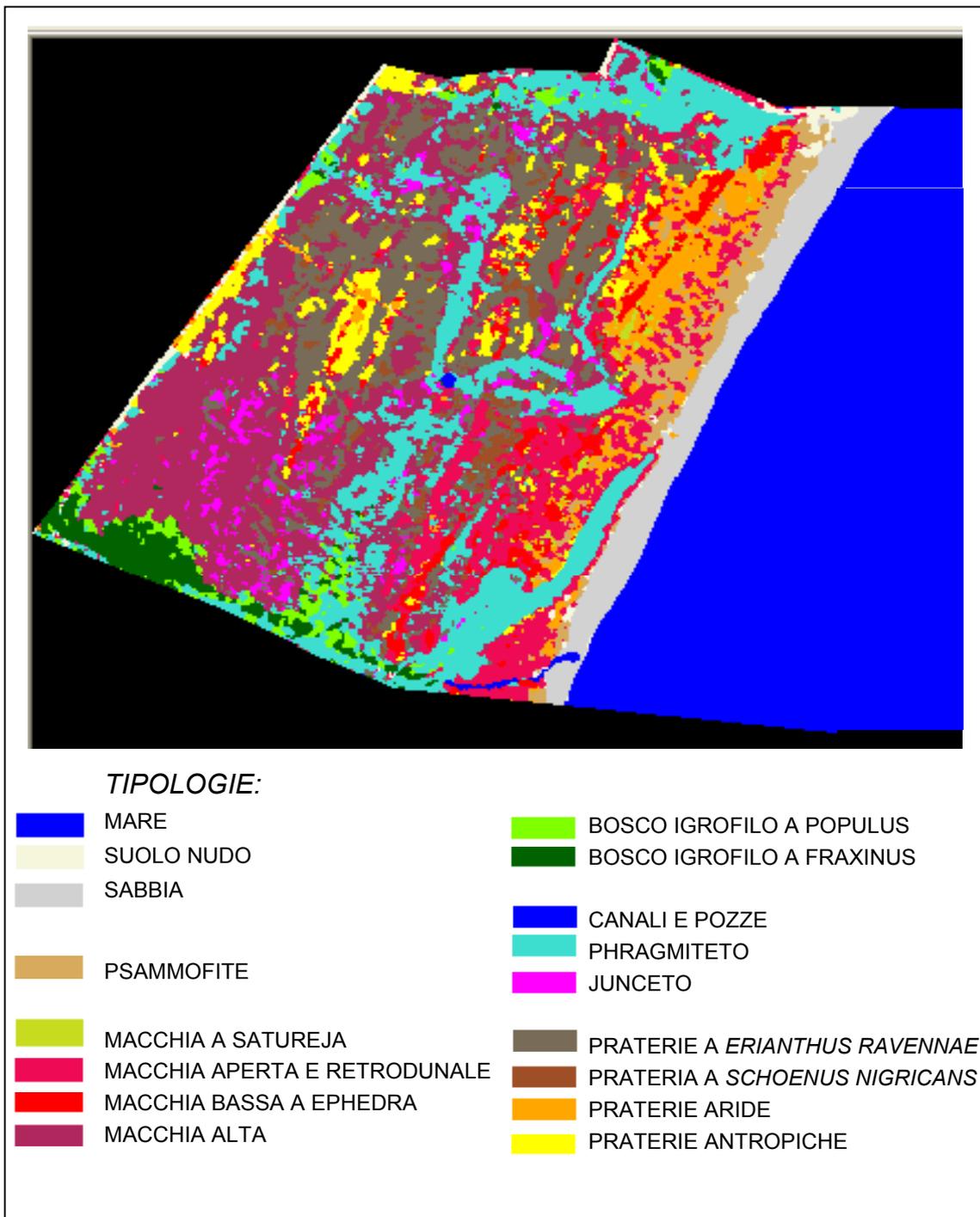
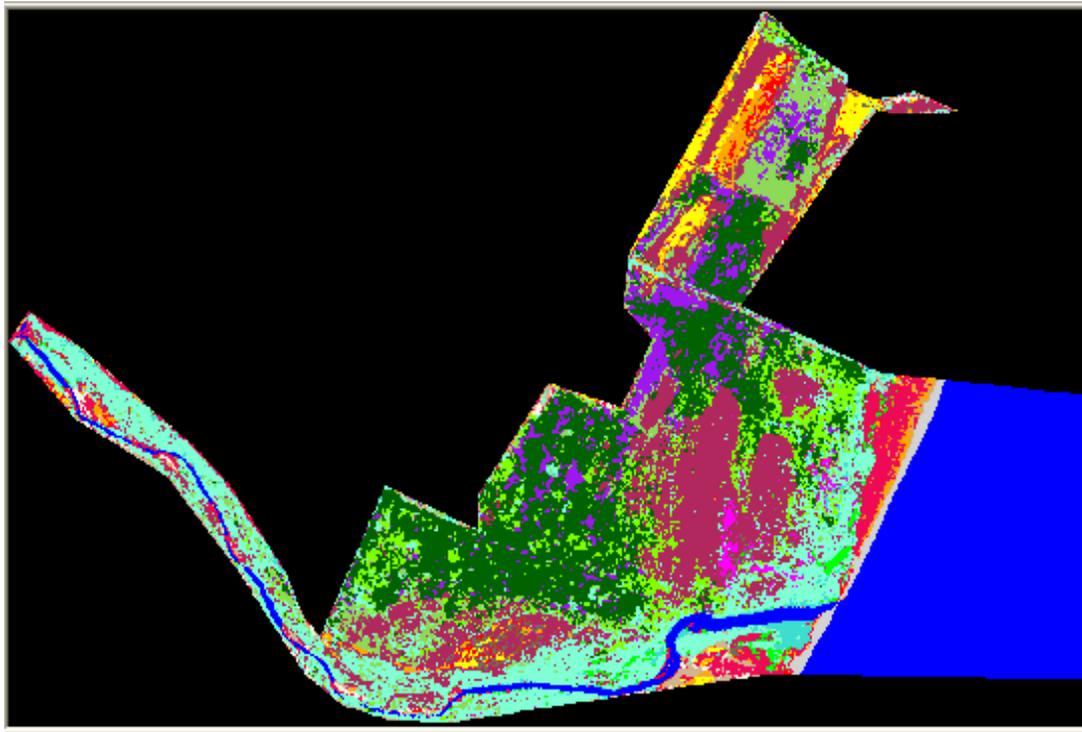


Figura 3.7 – Carta della vegetazione reale della sub-area a mosaici di psammofite ed alofite del Bosco Pantano di Policoro (area 2)



TIPOLOGIE:

	FIUME		BOSCO IGROFILO A POPULUS
	SUOLO NUDO		BOSCO A TAMARIX
	SABBIA		BOSCO IGROFILO A FRAXINUS
	MARE		RINNOVAMENTO BOSCHIVO
	AREE AGRICOLE		CANALI E POZZE
	PSAMMOFITE		PHRAGMITETO
	MACCHIA A SATUREJA		JUNCETO
	MACCHIA APERTA E RETRODUNALE		VEGETAZIONE RIPARIA
	MACCHIA BASSA A EPHEDRA		PRATERIE A <i>ERIANTHUS RAVENNAE</i>
	MACCHIA ALTA E DI MANTELLO		PRATERIA A <i>SCHOENUS NIGRICANS</i>
	ROVI E CHIARIE		PRATERIE ARIDE
			PRATERIE ANTROPICHE

Figura 3.8 – Carta della vegetazione reale della sub-area interna e riparia del Bosco Pantano di Policoro (area 3)

3.3.3 La vegetazione di Monte Coppolo-Rotondella

L'area di Monte Coppolo-Rotondella esaminata nell'ambito di questa ricerca comprende tipologie di vegetazione diverse tra cui:

LECCETA

Si estende su gran parte del monte Coppolo ed è rappresentata da una lecceta matura, inquadrabile nel *Quercetum ilicis* con ambiti più termofili nelle aree esposte, su roccioni sporgenti, sulle vette.

Queste facies, strutturalmente costituite da arbusteti alti comprendono molte entità della macchia quali *Erica arborea*, *Mirtus communis*.

La lecceta svolge in questo ambito la funzione di cerniera tra il bosco sempreverde mediterraneo e quello caducifoglio. Sottoposta ad incendi, in vari tratti recenti, la lecceta si ringiovanisce attraverso fasi di ricostituzione a macchia o boscaglia a leccio.

MACCHIA

La macchia, si presenta con facies diverse a seconda del degrado del suolo e della distanza temporale dal fuoco. Facies con *Spartium junceum* prevalente si alternano a zone degradate con gariga a *Cistus monspeliensis* e *Calicotome spinosa*, ad aree più mature con boscaglia di leccio, acero e Orniello.

La molteplicità di condizioni e di fruizione antropica con apertura di passaggi e pascolo ne determinano una condizione di grande frammentarietà e difficile inquadramento in una dinamica veloce motivata da un continuo disturbo.

BOSCO MISTO CADUCIFOGLIO

Si tratta di boschi dell'orizzonte submontano del *Quercetum pubescenti petraeae*, queste formazioni sono essenzialmente rappresentate da cedui misti di Cerro e Roverella con marcata prevalenza della Roverella.

Un vasto corteggio di specie è presente tra cui: *Fraxinus ornus*, *Pyrus communis*, *Sorbus domestica*, *Crataegus oxyacantha*, *Ligustrum vulgare*, *Spartium junceum*, *Acer monspessulanum*, *Carpinus orientalis*.

Nelle aree più calde, o di margine, o di mantello, varie sclerofille accompagnano o sostituiscono il bosco caducifoglio. Si tratta di: *Asparagus acutifolius*, *Pistacia terebinthus*, *Pistacia lentiscus*, *Rhamnus alaternus*, *Ruscus aculeatus*, *Phillirea angustifolia*, *Cistus salvifolius*, *Juniperus communis*, *Smilax aspera*.

Nei versanti calcarei più freschi, esposti nei quadranti settentrionali, nei canali umidi si imposta una vegetazione con dominanza di *Fraxinus ornus* e *Ostrya carpinifolia* probabilmente attribuibile all'*Orno-Ostrieto* anche se molto degradato e di difficile inquadramento. In aree delimitate e omogenee si rilevano zone riforestate con conifere in cattivo stato conservativo.

La densità del bosco e lo stato conservativo sono molto legati al diverso livello di disturbo oltre che alla tipologia di impatto e questi elementi rendono difficile l'inquadramento di molte aree con fisionomie dubbie. Queste tipologie vegetazionali sono ben descritte dalla mappa della vegetazione reale (Figura 3.9) elaborata per l'area di Monte Coppolo-Rotondella, nella quale sono riportate anche le aree agricole circostanti e le aree percorse da incendi recenti o antichi, in quanto l'elaborazione è stata effettuata sull'immagine del 2 agosto 2004 nella quale erano spettralmente e strutturalmente ben discriminabili le fisionomie arboreo-arbustive naturali dal resto delle componenti territoriali della scena.

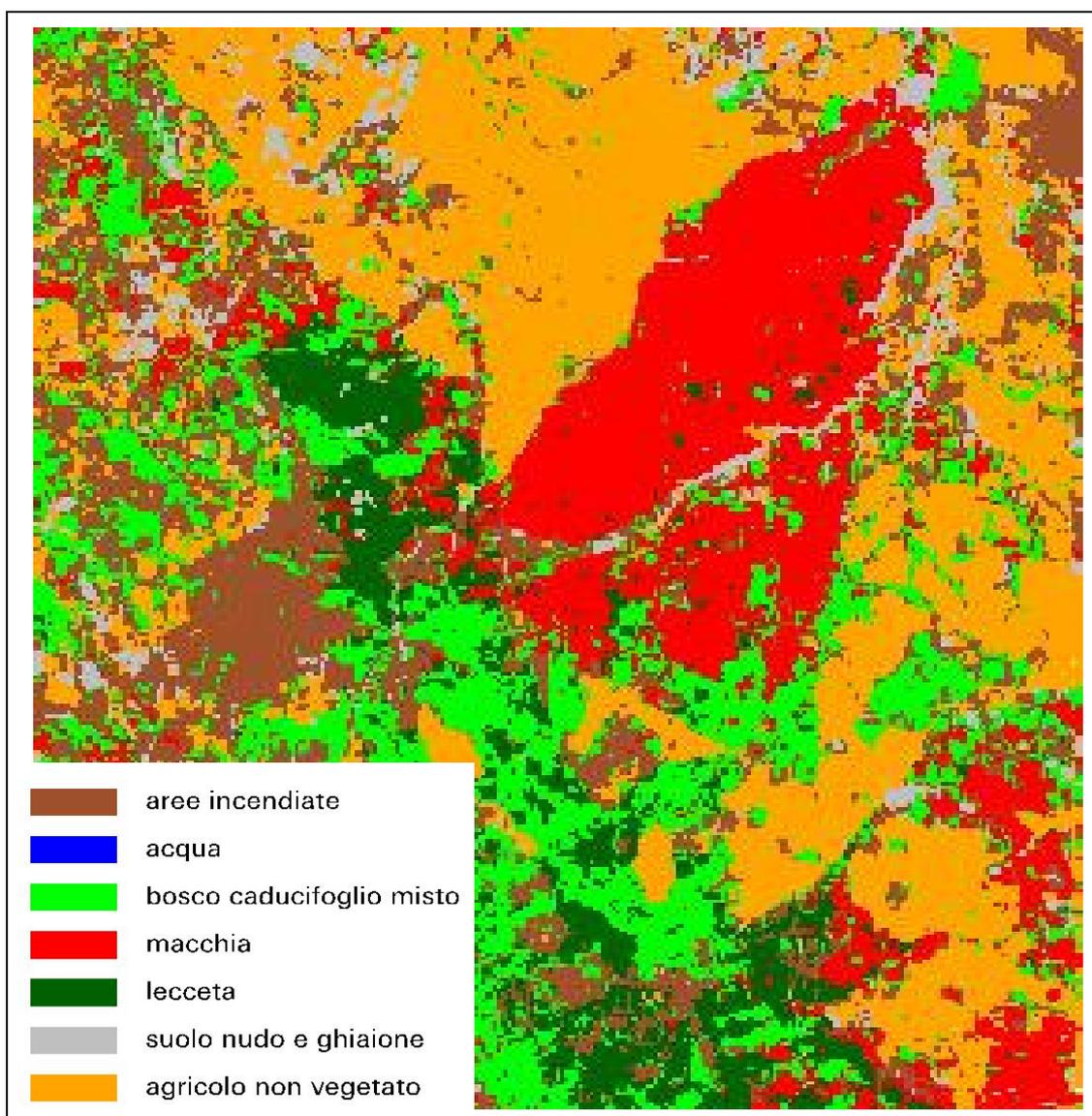


Figura 3.9 – Carta delle tipologie fisionomico strutturali di Monte Coppolo-Rotondella

3.3.4 Il paesaggio

Il paesaggio attuale dell'area oggetto del presente studio è complessivamente riconducibile ai seguenti aspetti (Figura 3.10):

1. Fascia costiera costituita essenzialmente da dune litoranee coperte dalla tipica vegetazione psammofila, abbastanza integre, soprattutto nelle aree protette;
2. Fascia retrodunale umida costituita da avvallamenti più o meno vasti con vegetazione igroalofila, in forma di mosaici complessi su terreni alluvionali, caratterizzati dall'alternanza sabbie e argille;
3. Fascia interna con macchia mediterranea;

4. Aree ripariali e fascia interna a macchia, con boschi mesoigrofili, (Bosco Pantano di Policoro, corso del fiume Sinni), nei tratti più a monte, l'alveo, ampio e ciottoloso ospita comunità di igrofile, in alcuni tratti anche molto ampie, la cui stabilità è legata al regime torrentizio del fiume;
5. Aree riforestate con *Eucalyptus sp.* e *Pinus halepensis*;
6. Piana costiera e fascia basso collinare: caratterizzata da mosaici colturali prevalentemente di coltivazioni frutticole arboree, frutticole ed orticole in stazioni aperte od intensive in serra;
7. Fascia alto collinare caratterizzata da vaste aree calanchive (calanchi pliocenici) con vegetazione rada a Sparto (*Lygeum spartum*) e forme di erosione diffusa;
8. Fascia collinare/montana con vegetazione a macchia e boschiva a *Quercus ilex* e *Q. pubescens* su substrati calcarei.

Come si è arrivati a questi elementi del paesaggio e attraverso quali fasi?

Già nel IV-V sec a.C. le tavole di Eraclea ci descrivono per queste zone delle vaste aree paludose interrotte da tratti di macchia e di bosco. Con l'arrivo dei Romani, le aree costiere fertili furono trasformate in aree agricole ed iniziò un lento processo di antropizzazione documentato dalla presenza di fattorie.

Nel III sec a.C. con l'*ager publicus* che permetteva la concessione in affitto ad aristocratici e veterani, iniziò la trasformazione radicale dell'economia e della società.

Il succedersi di campagne di guerra, che determinavano la confisca di terreni per usi militari, determinarono poi l'allontanamento delle popolazioni civili che erano raggruppate in aree adibite a sfruttamento forestale.

Erano descritte immense foreste nella zona di Valsinni che furono pressoché distrutte in epoca tardo antica.

Strabone parla del fiume Sinni come di un corso navigabile, con un'area portuale fluviale in prossimità della città di Siris, fondata nel 432 a.C.

Il fiume cessa di essere navigabile e diventa fiumara come allo stato attuale a causa di intensi disboscamenti delle rive e con la creazione di dighe e invasi.

Il bosco di Policoro, già noto e descritto in età greca, era gestito e ne era vietata la raccolta di legname in modo intensivo ma in epoca romana, abbandonate le coste, il bosco divenne fonte di legname per la fornitura di travi.



Figura 3.10 – Classificazione del paesaggio delle aree di studio (v. testo)

Poi le informazioni storiche sull'area sono molto esigue fino al 1200, quando il feudalesimo normanno aveva manifestato notevole interesse per l'area, che subì vari ripopolamenti con specie di selvaggina pregiate.

Nella prima rappresentazione cartografica dell'area, risalente al 1589, si descrive il feudo con il castello, il mulino, la torre, il bosco Pantano, i pascoli e le coltivazioni di cotone.

Nel 1792 il feudo di Policoro venne acquistato dai principi Serra-Gerace e nel 1883 divenne proprietà dei baroni Berlingeri di Crotone.

Tra i visitatori del tempo, un archeologo nel 1880, Lenormant, descrive immensi latifondi con una aristocrazia pressoché assente e conseguentemente un abbandono diffuso e un regime estensivo delle colture che probabilmente determinò la mancata distruzione del bosco attuale.

Fino alla riforma fondiaria e alla bonifica idraulica intorno al 1930, i proprietari baroni di Berlingeri utilizzarono il bosco come riserva di caccia e ne impedirono il taglio riducendolo ai soli esemplari deperiti, il pascolo e qualsiasi utilizzo che depauperasse la riserva, serbandosi il diritto di caccia.

Gli anni trenta rappresentarono un momento di grandissimi cambiamenti sociali, economici e, conseguentemente, ambientali.

Furono abbandonate le strutture fondiarie a favore di una piccola e media proprietà e ciò determinò il passaggio da una agricoltura estensiva ad una intensiva con tecniche e metodologie moderne. Furono cedute immense estensioni di bosco fino a ridurre l'antica foresta agli attuali 550 ettari di superficie.

3.4 Discussione

Le analisi condotte nelle aree di studio di Monte Coppolo-Rotondella e Pantano, basate sia sullo studio della bibliografia disponibile sia su indagini in campo ed elaborazioni di immagini satellitari, hanno permesso di mettere in evidenza come il territorio in esame sia stato e sia tuttora perturbato dalla presenza di attività antropiche fortemente impattanti che hanno causato, soprattutto in passato, una forte modificazione del paesaggio e degli ambienti naturali ivi presenti. Le emergenze naturalistiche osservabili presentano, tuttavia, elementi di forte pregio ambientale e sotto il profilo conservazionistico meriterebbero una maggiore attenzione.

Infatti, sebbene le aree ad elevata naturalità siano di limitate estensioni e talvolta confinate ai territori meno accessibili (pendii e sommità dei rilievi) dal taglio abusivo, dalle attività agricole e pastorizie e dalla urbanizzazione crescente, è possibile tuttora rinvenire lembi superstiti di foresta igrofila planiziale primaria (Pantano Sottano) e situazioni climax (lecceta di Monte Coppolo) in apparente equilibrio che forniscono risorse e rifugio per la fauna locale. In realtà, diversi fattori minacciano tale equilibrio: ad esempio l'abbassamento della falda idrica, dovuta alla riduzione di portata del fiume Sinni in seguito alla costruzione di un vaso più a monte, ha causato modificazioni in senso xerico delle condizioni ecologiche del bosco Pantano Sottano con variazioni della composizione specifica a favore di specie più mesofile e sclerofile nonché la penetrazione di specie sinantropiche nelle aree più marginali.

Anche l'arretramento della linea di costa, dovuto alla riduzione dell'apporto solido del Sinni, sta assumendo rilevanza sempre maggiore in quanto sta minacciando la fascia dunale che ha tra l'altro funzione di protezione della vegetazione retrostante nei confronti dei venti marini e della salsedine.

Sono inoltre da segnalare, nel tratto costiero che va dal fiume Sinni al litorale di Nova Siri, zone di vegetazione a *Salicornia europea* pressoché monospecifica, presenti ai margini di pozze costiere, in tratti di litorale tra la spiaggia e le aree coltivate in relazione alla morfologia bassa del litorale che quasi non presenta la duna con la vegetazione psammofitica, bensì una morfologia piana risultato di modificazioni a causa dell'uso antropico dell'area. Inoltre, su un tratto di costa dal Sinni al Bradano, sono presenti numerose comunità di alofite tra cui popolamenti a *Salicornia* di grande valore ecologico e conservazionistico su cui sarebbe importante operare con azioni di salvaguardia mirate.

Nell'area di Monte Coppolo-Rotondella la naturalità del paesaggio di tipo montano-collinare e delle cenosi forestali presenti è alterata dalla presenza di manufatti e dall'apertura di nuove strade interpoderali che costituiscono forti elementi di discontinuità nel territorio, a questi va aggiunta la presenza di diversi rimboschimenti a conifere che oltre ad aver introdotto specie eterotone, costituiscono un fattore predisponente per l'insorgere di incendi.

I fattori di disturbo in questa area sono appunto riconducibili agli incendi, di cui spesso se ne rinvengono le tracce, ma anche al pascolo brado che se incontrollato può causare la diminuzione della copertura vegetale e l'alterazione della sua struttura e composizione [5]. Sebbene in aree mediterranee entrambi siano veri e propri fattori ecologici che fanno parte dei processi di rigenerazione della vegetazione, questi fattori di disturbo in base alla loro frequenza ed intensità possono innescare processi di degrado della vegetazione e del suolo.

Le indagini condotte in questo studio sono servite quindi a delineare lo stato attuale dei sistemi naturali e semi-naturali indagati e le possibili tendenze dinamiche, a individuare quali siano i fattori di pressione nonché a fornire il punto di partenza per ulteriori indagini.

3.5 Bibliografia

- [1] Schowengerdt R. A., 1997. Remote Sensing Models and Methods for Image Processing. Second Edition. Academic Press.
- [2] Pedrotti F., 1980. Foreste ripariali lungo la costa adriatica dell'Italia, Colloques Phytosociologiques IX, Les foret alluviales, Strasbourg.
- [3] Tomei P.E. – 2001. La flora e la vegetazione del Tombolo pisano: lo stato attuale delle conoscenze. In Tombolo: territorio della basilica di San Piero a Grado. Felici Editore, Pisa: 191 - 201.
- [4] Tomei P.E. & al. 2001. Le zone umide della Toscana. Regione Toscana pp.167.
- [5] Accademia Italiana di Scienze Forestali (AISF), 2003. Rapporto RIADE-Foreste-Italia. Caratterizzazione tipologica dei rapporti tra sistemi forestali e processi di desertificazione osservati e studiati in Italia e sviluppo di un sistema di riferimento per la loro rappresentazione sistematica. A cura di Barbati A. e Corona P.

3.6 Appendice: letteratura sulle aree di studio

- Aita L., Corbetta F., Orsino F., 1978. Osservazioni fitosociologiche sulla vegetazione forestale dell'Appennino lucano centro-settentrionale. 1: Le cerrete. CNR AP/1/12.
- Aita L., Corbetta F., Orsino F., 1984. Osservazioni fitosociologiche sulla vegetazione forestale dell'Appennino lucano centro-settentrionale. 2: Le faggete. Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat., 17: 201- 219.
- Bavusi A., 1995. La tutela della flora in Basilicata. Regione Basilicata Notizie, n° 1.
- Bavusi A., Settembrino G., 1992. Il Bosco di Policoro. Natura in Basilicata. Alfagrafica Volonnino Lavello. 103-112.
- Biondi E., Ballelli S., Taffetani F., 1992. La vegetazione di alcuni territori calanchivi in Basilicata (Italia Meridionale). Doc. Phytosoc., n.s., 14: 489-498.
- Bonora N., Immordino F., Simeoni U., Valpreda E., Trivisani A., 2003. Cambiamenti territoriali e variazioni del litorale nell'area lucana. Regione Basilicata Notizie, n°103.
- Buccianti M., 1956. Scomparirà del tutto il bosco di Policoro? Natura Mont. 3(4): 87-91
- Caneva G., Fascetti S., Gallotta G., 1996. Aspetti bioclimatici e vegetazionali della costa tirrenica della Basilicata. Fitosociologia v.XXXII
- Carone M.T., 1996. Ricomposizione dei mosaici ambientali:un approccio metodologico Regione Basilicata Notizie, n°5-6.
- Colacino C., Fascetti S., Fici S., 1992. Aspetti della vegetazione forestale del Bosco di Policoro. Atti 87 Congresso SBI. Giorn. Bot. Ital., 126 (2):445.
- Corbetta F., 1974. Lineamenti della vegetazione lucana. Giorn. Bot. Ital., 108 (5): 211-234.
- Corbetta F., Gratani L., Moriconi M., Pirone G., 1989. Lineamenti vegetazionali e caratterizzazione biologica delle spiagge dell'arco jonico da Taranto alla foce del Sinni. Coll. Phytosociologiques XIX: 461-521.
- Corbetta F., Gratani L., Moriconi M., Pirone G., 1992. Lineamenti vegetazionali e caratterizzazione ecologica delle spiagge dell'arco jonico da Taranto alla foce del Sinni. Coll. Phytosoc.,19: 461-521.
- Corbetta F., Pirone G., 1996. La flora e le specie vegetali di interesse fitogeografico in Basilicata. Regione Basilicata Notizie n° 5-6.
- Famiglietti A., Pierangeli D., 1996. Ecosistema bosco in Basilicata. Regione Basilicata Notizie, n°5-6.
- Fascetti S., 1996. Alcune fitocenosi caratteristiche del paesaggio vegetazionale della Basilicata. Regione Basilicata Notizie, n°5-6.
- Fascetti S., 1996. I cespuglietti ad *Erica multiflora* L. della Basilicata. Fitosociologia XXXII.
- Fascetti S., Colacino C., De Marco G., 1990. Alcuni aspetti della vegetazione dei calanchi della Basilicata. Gior. Bot. Ital. 124 (1): 144.

- Fascetti S., Saracino A., 1996. Evoluzione della copertura vegetale ed interventi antropici nel settore costiero occidentale del Tarantino: studio del comprensorio Foce del F. Bradano - Lago Salinella - Foce del T. Galaso. Atti del Convegno Territorio e Societ. nelle Aree Meridionali, Bari 24-27 ottobre 1996.
- Giannini G., Nuzzo V., Trivisani A., 1995 Metaponto: la duna e la vegetazione. Regione Basilicata Notizie, n° 3-4.
- Mancini F., 1974. Cenni illustrativi della geologia, geomorfologia e pedologia della Basilicata. Giornale Botanico italiano, 108, 203-209.
- Morsicano D., Trivisani A., 1996. Metaponto una costa da salvare. Regione Basilicata Notizie, n° 1.
- Saracino A., Fascetti S., 1996. Il progetto Bioitaly e la rete natura 2000. Regione Basilicata Notizie, n° 5-6.
- Tamaro F., 1986. Un esempio di cartografia floristica in Basilicata: la distribuzione del genere *Verbascum* L. (Scrophulariaceae). Biogeographia, 10: 237-246.
- Trivisani A., Bonora N., Schiavi C., 2002. Evoluzione recente del litorale Metapontino. Regione Basilicata Notizie, n° 101.
- Trivisani A., Rinaldi R., Trivisani G., 2003. Il giglio delle sabbie tra le dune del Metapontino. Regione Basilicata Notizie, n° 1.

4. STIMA DA SATELLITE DEL *LEAF AREA INDEX* (LAI)

L. Giordano, F. Borfecchia, L. De Cecco, G. Schino, C. Trotta

4.1 Introduzione

Lo sviluppo e la validazione di modelli di funzionamento ed evoluzione degli ecosistemi naturali richiede la disponibilità di dati quantitativi su numerose variabili biofisiche. Fra queste, un ruolo centrale giocano le variabili che descrivono la struttura e funzione della componente vegetale degli ecosistemi, in particolare negli ecosistemi terrestri. Se, infatti, alla componente vegetale di tutti gli ecosistemi si deve la quasi totalità della produzione primaria, negli ecosistemi terrestri la copertura vegetale ha anche un'ovvio e prevalente ruolo strutturale, definendo (e, nel lungo periodo, creando) la struttura fisica con cui interagiscono le altre componenti dell'ecosistema.

Essenziale per il nostro progresso nella comprensione del funzionamento degli ecosistemi terrestri è quindi la ricerca di misure biofisiche della vegetazione che ne catturino gli aspetti funzionali e strutturali più rilevanti. Fra queste, una delle più interessanti è probabilmente il *Leaf Area Index* (LAI), ovvero l'indice di area fogliare definito come l'area totale di una delle due superfici di tessuto fogliare per unità di superficie di suolo [1]. Il LAI, infatti, regola il microclima all'interno ed al di sotto di una copertura vegetale, e determina e controlla l'intercettazione dell'acqua, l'estinzione della radiazione, gli scambi gassosi di acqua e anidride carbonica risultando, quindi, una componente chiave dei cicli biogeochimici degli ecosistemi [2]. Il LAI, pertanto, è un parametro di enorme importanza in quanto input di molti modelli climatologici [3,4,5,6], idrologici [7,8,9] ed ecologici [10,11,12,13].

Ottenere una stima spazializzata di un qualsiasi parametro biofisico relativo ad una ampia superficie (ovvero mappare il parametro in questione) per mezzo di tecniche tradizionali, come misurazioni e rilievi effettuati direttamente in campo, è tipicamente un processo estremamente lungo e dispendioso. Il telerilevamento costituisce quindi uno strumento potenzialmente prezioso per ottenere distribuzioni spaziali delle variabili di interesse a un costo e con tempi assai più vantaggiosi.

Il telerilevamento, e in particolare il telerilevamento satellitare, si è in effetti rivelato uno strumento estremamente efficace nel monitoraggio ambientale e nella stima quantitativa di parametri biofisici. Tuttavia, nel corso degli anni, due problemi fondamentali sono emersi: 1) la difficoltà di ottenere dati a terra che garantiscano una efficace calibrazione dei modelli semiempirici utilizzati per ottenere stime spazializzate delle variabili di interesse; 2) la difficoltà di estrapolare temporalmente le relazioni osservate fra dati telerilevati e dati a terra, ovvero l'incertezza che esiste nell'applicare i modelli sviluppati in un dato momento a momenti precedenti o successivi.

La prima delle difficoltà sopra evidenziate può essere essenzialmente ricondotta alla estrema eterogeneità spaziale che caratterizza la maggior parte delle variabili biofisiche e che rende problematico l'ottenimento di dati "puntiformi" di calibrazione che siano affidabili e al contempo compatibili con la risoluzione spaziale dei sensori satellitari. Ad esempio, un nostro studio precedente [14] ha evidenziato le difficoltà che presenta la caratterizzazione della biomassa erbacea presente in *plot* di calibrazione di 100 x 100 m, cioè delle dimensioni compatibili con l'accuratezza della georeferenziazione e con la risoluzione spaziale dei sensori della serie Landsat.

Vista l'importanza del LAI nello studio degli ecosistemi terrestri, in questa parte del lavoro relativo al WP 2.4 ci siamo proposti di produrre mappe di LAI sulla base di dati derivati da telerilevamento satellitare. Tuttavia, considerate le problematiche evidenziate qui sopra, abbiamo ritenuto necessario:

1. testare un metodo di calibrazione a due stadi basato sull'utilizzo di un sensore ad alta risoluzione, quale l'Ikonos, per l'"upscaling" dalle misure a terra ad un sensore a media risoluzione, quale il Landsat TM;
2. verificare la stabilità delle relazioni osservate fra parametri biofisici e dati satellitari nel corso di due anni di osservazioni.

4.2 Materiali e metodi

4.2.1 Campionamento del LAI

Il campionamento dell'indice di area fogliare è stato eseguito durante due campagne di rilevamento condotte nel 2004 e nel 2005 in corrispondenza del periodo di maggiore sviluppo della vegetazione, ovvero in tarda primavera-inizio estate. Le misure sono state effettuate su tipologie di vegetazione ritenute più rappresentative ed ecologicamente e fenologicamente più stabili, di conseguenza sono state condotte sulle tipologie fisionomico-strutturali arbustive ed arboree presenti nelle due aree di studio.

I siti di campionamento, di superficie pari a 12x12 metri corrispondenti a 3x3 pixel dell'immagine del sensore Ikonos, sono stati selezionati sulla base della loro omogeneità in termini di struttura e composizione in specie.

Secondo questi criteri nel 2004 sono stati individuati 55 siti di campionamento e nel 2005 ne sono stati individuati altri 56, spazialmente indipendenti dai primi.

Per ogni sito individuato, sono state registrate le coordinate geografiche con un ricevitore GPS portatile Trimble Pathfinder in modo da consentirne in seguito il corretto posizionamento sulle immagini satellitari.

Il LAI è stato misurato utilizzando il LAI-2000 PCA *Plant Canopy Analyzer* [15]. Questo strumento misura l'intensità della radiazione luminosa tramite un sensore costituito da cinque lenti ottiche di forma emisferica disposte in anelli concentrici, ovvero aventi cinque campi di vista con diverse ampiezze angolari (0° - 13° , 16° - 28° , 32° - 43° , 47° - 58° , 61° - 74°). Le cinque lenti acquisiscono contemporaneamente l'intensità della radiazione luminosa ai cinque diversi angoli e la proiettano su altrettanti *detectors* (Figura 4.1) disposti concentricamente [16]. Il rapporto tra la radiazione trasmessa e la radiazione incidente, misurate rispettivamente attraverso e sopra una copertura vegetale, consente di stimare la frazione *gap* del fogliame e, tramite una formula di inversione, di calcolare il LAI [17].

Per ogni sito sono state acquisite da 4 a 6 letture del parametro al di sotto della copertura vegetale, considerate rappresentative della superficie indagata e della variabilità del parametro al suo interno, mentre 1-2 misure di riferimento della radiazione incidente sono state acquisite nelle radure od in aree aperte nelle vicinanze dei siti oppure, quando possibile, al di sopra della copertura vegetale. I rilievi di LAI sono stati condotti in condizioni di luce diffusa, per esempio in condizioni di cielo uniformemente coperto oppure con il sole basso sull'orizzonte, per evitare che la radiazione diretta, riflessa dalle foglie, facesse confondere le foglie con i *gap* ed introducesse pertanto una fonte di errore nella stima del parametro.

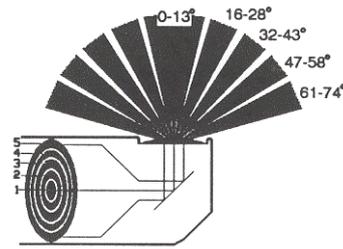


Figura 4.1 – Lo strumento di misura utilizzato per la misura dell'indice di area fogliare LI-COR LAI 2000 *Plant Canopy Analyzer* e lo schema di acquisizione del suo sensore ottico (a sinistra)

Inoltre è stata applicata una maschera con un'apertura di 90° per schermare la sagoma dell'operatore dal campo di vista del sensore.

I dati di LAI così acquisiti sono stati processati tramite il software C2000 della Li-COR che permette, tra le varie opzioni, di interpolare le letture di riferimento, escludere o selezionare determinati anelli e quindi ricalcolare a posteriori il dato.

In alcuni studi è stato osservato che il *Plant Canopy Analyzer*, rispetto ad altre tecniche come quelle di tipo diretto (trappole ecc.), tende a sottostimare sistematicamente il LAI specialmente in formazioni vegetali con LAI > 5 [18], sia a causa della concentrazione delle foglie prevalentemente negli strati superiori delle chiome [19], sia a causa di condizioni di illuminazione ed effetti di bordo, particolarmente rilevanti in cenosi di piccole dimensioni [20]. Per avere stime più attendibili di LAI è stata quindi adottata una correzione basata sull'eliminazione delle letture riferite all'angolo più esterno del sensore ottico [18], riducendo in tal modo tale sottostima ed incrementando i valori di LAI in media del 12,5%.

4.2.2 Pre-processing delle immagini satellitari

I dati satellitari acquisiti per la stima del LAI comprendono due immagini multispettrali ad alta risoluzione IKONOS *bundle* (immagini pancromatiche e multispettrali acquisite sincronicamente) e due a media risoluzione Landsat TM. Tali immagini sono relative al periodo primaverile-estivo degli anni 2004 e 2005, ed acquisite in corrispondenza delle campagne a terra di misura del LAI. In Tabella 4.1 si riportano sinteticamente le caratteristiche dei dati satellitari utilizzati.

Le immagini sono state pre-processate, ovvero corrette geometricamente e radiometricamente, seguendo un approccio gerarchico. Vale a dire si è proceduto prima nella correzione delle immagini a più alta risoluzione utilizzate poi a loro volta come riferimento, ovvero “verità a terra”, per la correzione di quelle a risoluzione minore. Il software utilizzato è l'Earth Resource Data Analysis (ERDAS) Immagine 8.7.

Sono state quindi preliminarmente ortocorrette le Ikonos pancromatiche utilizzando *Ground Control Points* (GCPs) planimetrici derivanti sia da rilievi GPS effettuati durante le campagne di misura, sia dalle ortofoto a colori, in scala 1:10.000, del volo Italia 2000. La quota dei punti, è stata ricavata da un modello digitale del terreno (DTM) con passo di 30 m, fornito dalla società partner Advanced Computer System, ricoprente l'intera area di studio.

Tabella 4.1 – Immagini satellitari acquisite per la stima del LAI

Sensore	Banda	(μm)	Risoluzione spaziale (m)	Risoluzione radiometrica (bit)	Data
Ikonos	b1 - blue	0,445-0,516	4	11	02/08/2004
	b2 - green	0,506-0,595	“	“	
	b3 - red	0,632-0,698	“	“	
	b4 - NIR	0,757-0,853	“	“	22/06/2005
	pancromatica	0,526-0,929	1	“	
Landsat TM	b1 - blue	0,45-0,52	30	8	30/08/2004
	b2 - green	0,52-0,60	“	“	
	b3 - red	0,63-0,69	“	“	
	b4 - NIR	0,76-0,90	“	“	30/06/2005
	b5 - SWIR 1	1,55-1,75	“	“	
	b6 - thermal	10,40-12,50	“	“	
	b7 - SWIR 2	2,08-2,35	“	“	

NIR=Near infrared band; SWIR=Short-wave infrared band

Le immagini pancromatiche ortocorrette sono quindi divenute il riferimento per l'ortocorrezione delle Ikonos multispettrali. La proiezione cartografica adottata è la UTM con i parametri seguenti: *Sferoide* International 1909, *Datum* European 1950, *Zona* UTM 33 Nord.

Le correzioni radiometriche hanno riguardato sia la trasformazione da *Digital Count* (DN) a radianza, utilizzando i coefficienti *gain* e *offset* forniti insieme alle immagini dal distributore stesso, sia la correzione per gli effetti di rumore dovuti all'interazione con l'atmosfera terrestre. Quest'ultima è stata effettuata mediante l'uso del codice di trasferimento radiativo *6S-Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* [21]. In mancanza dei dati necessari per una caratterizzazione dell'atmosfera al momento del passaggio satellitare, si è proceduto alla stima dello spessore atmosferico, per iterazione, a partire da misure di riflettanza a terra eseguite, su target opportuni, tramite spettroradiometro portatile ASD Fieldspec Pro.

Analogamente a quanto fatto per le immagini Ikonos, anche per le Landsat è stata ortorettificata prima un'immagine pancromatica e poi le due multispettrali prendendo la prima come riferimento. Infine, le immagini Ikonos corrette radiometricamente come descritto sono state utilizzate come riferimento, in termini di riflettanza al suolo, per la correzione atmosferica delle immagini Landsat TM. L'accuratezza ottenuta nella co-registrazione delle diverse immagini è di circa 1 pixel.

4.2.3 Indici spettrali di vegetazione (VI)

Gli Indici spettrali di Vegetazione (VI) sono combinazioni algebriche dei valori di riflettanza acquisiti dai sensori satellitari o aviotrasportati a diversi intervalli di lunghezze d'onda (bande spettrali). Essi sfruttano il peculiare comportamento spettrale della vegetazione, il quale è caratterizzato da un picco di assorbimento della radiazione elettromagnetica alle lunghezze d'onda del rosso visibile (0,68 μm) dovuto all'attività dei pigmenti clorofilliani, in contrapposizione ad una forte riflettività alle lunghezze d'onda dell'infrarosso vicino (0,7-1 μm) causata invece dalle strutture che costituiscono il mesofillo, il tessuto fondamentale della foglia [22,23].

Tabella 4.2 – Indici spettrali di vegetazione esaminati per la stima del LAI

Acronimo	Equazione	Note
NDVI	$(\text{NIR}-R)/(\text{NIR}+R)$	NIR: infrared band reflectance; R: red band reflectance
GNDVI	$(\text{NIR}-G)/(\text{NIR}+G)$	G: green band reflectance
DVI	$\text{NIR}-R$	
RDVI	$\sqrt{(\text{NDVI} \times \text{DVI})}$	
SAVI	$(\text{NIR}-R)(1+L)/(\text{NIR} \times R \times L)$	L = canopy background brightness correction factor
GEMI	$\eta^*(1-\eta/4)-[(R-0,125)/(1-R)]$	$\eta = [2*(\text{NIR}^2-R^2)+1,5*\text{NIR}+0,5*R]/(\text{NIR}+R+0,5)$

I VI non sono comunque quantità fisiche intrinseche, bensì sono utilizzati per correlare i dati telerilevati a parametri biofisici della vegetazione come l'indice di area fogliare, la percentuale di copertura vegetale, la quantità di biomassa fotosinteticamente attiva ecc. In particolare in questo studio abbiamo focalizzato la nostra attenzione sui seguenti indici: il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI); il *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI); il *Difference Vegetation Index* (DVI); il *Renormalized Difference Vegetation Index* (RDVI); il *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) e il *Global Environmental Monitoring Index* (GEMI).

L'NDVI [24], basato sulla differenza normalizzata delle bande di acquisizione nel rosso e nell'infrarosso vicino, è storicamente il più noto ed usato degli indici di vegetazione.

Sebbene l'NDVI enfatizzi il contrasto tra suolo e vegetazione e minimizzi l'effetto delle condizioni di illuminazione, esso mostra comunque un'elevata sensibilità alla riflettanza del substrato risultando di difficile interpretazione in condizioni di basse coperture vegetali [25]. Il GNDVI [26] è una modificazione dell'NDVI in cui la banda nel rosso è sostituita dalla banda spettrale nel verde.

Il DVI [27] è semplicemente la differenza tra la banda dell'infrarosso vicino e la banda del rosso ed è risultato particolarmente utile a bassi valori di LAI [25]. L'RDVI [28] è un ibrido tra il DVI e l'NDVI, e si suppone che combini i vantaggi di entrambi a basse ed alte coperture vegetali. Il SAVI, proposto da [29], è derivato anch'esso dal NDVI.

Per tenere in considerazione le proprietà ottiche del suolo esso introduce un fattore L che dipende dalla densità della vegetazione (L=1 per scarsa vegetazione, L=0,5 per densità intermedie, L=0,25 per vegetazione densa). Il GEMI [30] è una combinazione non lineare di bande di riflettanza che è stata sviluppata per minimizzare l'influenza relativa degli effetti atmosferici, sebbene abbia lo svantaggio di essere altamente sensibile all'interferenza del suolo alle basse coperture vegetali [31].

Tutti gli indici, le cui formule sono riportate nella Tabella 4.2, sono stati calcolati a partire dai valori di riflettanza al suolo delle relative bande.

4.2.4 Metodologia di upscaling dalle misure a terra ai dati satellitari

La stima da telerilevamento di parametri biofisici tramite modelli semiempirici calibrati su misure a terra puntuali richiederebbe in teoria un numero di osservazioni in campo sufficientemente ampio da poter comprendere tutta la variabilità spaziale del parametro da stimare contenuta all'interno del singolo pixel, ovvero, tenendo conto anche dell'errore di georiferimento dei dati, all'interno di 2-3 pixel.

In sistemi altamente eterogenei questo in pratica comporterebbe un numero di misure estremamente elevato, gravoso da un punto di vista dei tempi e dei costi necessari, talvolta addirittura impossibile da soddisfare in termini logistici (ad esempio per l'inaccessibilità dell'area).

In questo lavoro si è voluto testare una metodologia mirata ad ovviare a questa problematica e ad un'ottimizzazione dello schema di campionamento a terra. A tale scopo, il processo di *upscaling* dalle misure in campo di LAI alla risoluzione spaziale dell'immagine Landsat (30 m), è stato condotto in due stadi (Figura 4.2).

È stata cioè utilizzata una fase di calibrazione intermedia che si avvale di immagini Ikonos a risoluzione spaziale (4 m) e radiometrica (11 bit) più alta, in grado di rilevare più accuratamente l'alta eterogeneità della vegetazione mediterranea. Il primo stadio è consistito nella implementazione di un modello regressivo per la derivazione di una mappa di LAI, sulla base dei dati Ikonos, da utilizzare nel secondo stadio come "verità a terra" per la stima del LAI a partire dai dati Landsat. La risoluzione spaziale di Ikonos ha reso possibile far corrispondere, in termini di superficie, le dimensioni del sito campionato tramite i rilievi a terra del LAI (12x12m) con quelle relative alle estrazioni dei valori di riflettanza eseguite sulle immagini multispettrali su finestre di 3x3 pixel.

La seconda fase di *upscaling* ha riguardato la calibrazione del modello per la stima del LAI da dati Landsat avvalendosi della mappa prodotta nel primo stadio utilizzando Ikonos. A questo scopo, sulla base della classificazione della vegetazione delle immagini Ikonos (v. capitolo 3) e con il supporto delle ortofoto in scala 1:10.000 e della conoscenza dell'area acquisita durante le campagne a terra, sono stati individuati 101 siti in modo da evitare situazioni di bordo e assicurando al contempo la distribuzione su tutta l'area di studio.

In corrispondenza di queste coordinate sono stati estratti sia i dati radiometrici dalle immagini Landsat, sia i corrispondenti valori medi di LAI dalle mappe prodotte nella prima fase, su aree questa volta di 90x90 m (corrispondenti a 3x3 pixel di 30 m).

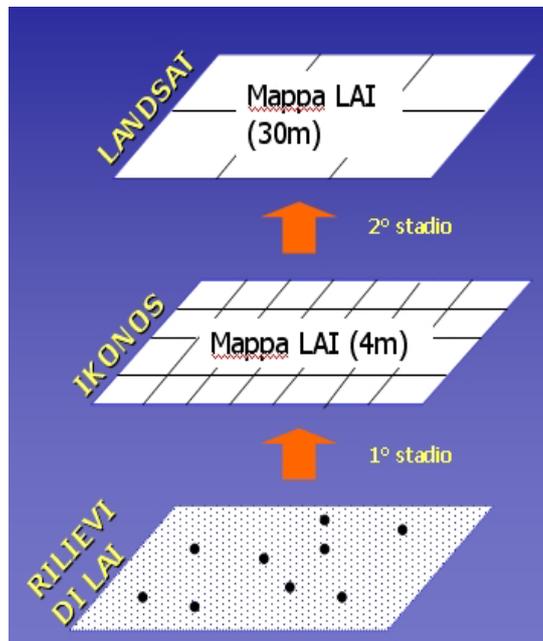


Figura 4.2 – Schema di *upscaling* dalle misure puntuali a terra di LAI alla risoluzione del sensore Landsat (30 m)

4.2.5 *Analisi statistiche*

I dati di LAI sono stati inizialmente sottoposti a trasformazione logaritmica allo scopo di ridurre l'effetto di saturazione, ampiamente riportato in letteratura [25 tra gli altri] che si manifesta oltre un certo livello di copertura vegetale e determina una diminuzione nell'incremento della risposta spettrale in corrispondenza di un aumento della quantità di biomassa verde [32]. Tutte le analisi statistiche sono quindi state condotte su $\ln LAI$, anche se per semplicità di esposizione si farà semplicemente riferimento al LAI.

I dati di LAI sono stati sottoposti ad analisi della covarianza (ANCOVA) introducendo come variabili indipendenti l'NDVI, l'anno di osservazione e la tipologia di vegetazione, nonché tutte le loro possibili interazioni. Le interazioni non significative sono state quindi rimosse e il modello ricalcolato. Queste analisi consentono di evidenziare sia l'esistenza di una relazione fra indici di vegetazione (NDVI, nel nostro caso) e LAI, sia di testare se questa relazione differisca a seconda dell'anno di osservazione (interazione fra NDVI e anno di osservazione) o della tipologia di vegetazione (interazione fra NDVI e tipologia di vegetazione).

Ai fini di queste analisi la vegetazione è stata classificata secondo le categorie ecologiche come xerofila (macchia e lecceta), mesofila (bosco di caducifoglie) o mesoigrofila (bosco igrofilo).

Poiché queste analisi hanno evidenziato una significativa interazione fra NDVI e anno di osservazione (vedi sotto) sono state anche condotte regressioni semplici fra indici di vegetazione (tutti quelli esaminati) e LAI analizzando separatamente i dati dei due anni. Infine sono state condotte regressioni multiple (di nuovo analizzando separatamente i dati dei due anni) utilizzando il LAI come variabile dipendente e le singole bande spettrali, Ikonos o Landsat a seconda della fase, più il coseno dell'angolo di illuminazione del sole come variabili indipendenti.

Il coseno dell'angolo di illuminazione del sole, definito come $\cos(i) = \cos(90 - se) \cdot \cos(p) + \sin(90 - se) \cdot \sin(p) \cdot \cos(sa - e)$, dove se =angolo di elevazione del sole; p =pendenza del terreno; sa =azimuth del sole; e =esposizione, è stato introdotto per tenere conto della variabilità delle condizioni di illuminazione dovuta alla topografia. Inoltre, per la sola area di Monte Coppolo, che è quella che presenta la maggiore complessità topografica, il $\cos(i)$ utilizzato nelle regressioni basate sui dati Ikonos è stato ottenuto a partire da un DTM con passo di 4 m (ovvero della stessa risoluzione della immagine Ikonos), derivato a partire dalle curve di livello presenti sulla Cartografia Tecnica Regionale (CTR). Nelle regressioni con i dati Landsat si è utilizzato invece il $\cos(i)$ derivato dal DTM a 30 m.

4.3 Risultati

4.3.1 *Variazioni nel LAI misurato a terra*

Il LAI misurato a terra (Figura 4.3) non è risultato differire significativamente a seconda del tipo di vegetazione ($F=2,63$, $df=2/111$, $P=0,077$). Anche l'anno di osservazione non ha avuto effetti significativi ($F=0,03$, $df=1/111$, NS), mentre è emersa una significativa interazione fra anno e tipo di vegetazione ($F=3,37$, $df=2/111$, $P<0,05$). Quando l'analisi sull'effetto del tipo di vegetazione è stata ripetuta dividendo i dati dei due anni di osservazioni la differenza fra i tipi di vegetazione è risultata significativa nel 2004 ma non nel 2005 (2004: $F=6,22$, $df=2/52$, $P<0,005$; 2005: $F=1,87$, $df=2/59$, NS).

4.3.2 Relazioni fra LAI e dati satellitari Ikonos

Nel primo stadio del processo di *upscaling* sono state valutate le relazioni fra dati di LAI misurati a terra e dati telerilevati dal satellite ad alta risoluzione Ikonos. È stata inizialmente condotta una analisi della covarianza sul dato LAI inserendo come fattori principali l'NDVI, il tipo di vegetazione e l'anno di osservazione, e aggiungendo tutte le loro possibili interazioni. Poiché alcune delle interazioni sono risultate non significative il modello è stato ridotto e ha rivelato effetti significativi per l'NDVI ($F=93,00$, $df=1/105$, $P<0,0001$), il tipo di vegetazione ($F=21,32$, $df=2/105$, $P<0,0001$) e l'anno di osservazione ($F=40,47$, $df=1/105$, $P<0,0001$). L'esistenza però di una interazione significativa fra NDVI e anno di osservazione ($F=41,71$, $df=1/105$, $P<0,0001$) evidenzia che la relazione fra NDVI e LAI non è la stessa nei due anni di osservazione.

In effetti, se si effettuano regressioni lineari separate fra NDVI e LAI nei due anni di osservazione si ottengono risultati molto diversi. Nel 2004 la relazione fra i due è molto stretta ($r^2=0,601$, $N=55$, $P<0,0001$), mentre nel 2005 è sostanzialmente assente ($r^2=0,013$, $N=56$, NS), come mostrano i grafici riportati (Figura 4.4).

Quando le stesse analisi sono state ripetute utilizzando altri indici di vegetazione derivati dai dati satellitari Ikonos i risultati ottenuti sono stati simili. Nel complesso, gli altri indici di vegetazione hanno dato risultati peggiori dell'NDVI, confermando comunque la differenza esistente fra i due anni di osservazione. I risultati di tali analisi sono riassunti nella Tabella 4.3.

Risulta quindi evidente che non solo non è possibile arrivare alla definizione di un unico modello predittivo del LAI sulla base dei dati Ikonos che abbia validità attraverso diversi anni, ma anche che in uno dei due anni di osservazione è essenzialmente impossibile stimare il LAI sulla base di classici indici di vegetazione quali l'NDVI.

Abbiamo quindi applicato, separatamente nei due anni di osservazione, un'analisi di regressione multipla utilizzando come variabili indipendenti i valori di riflettanza nelle singole bande dell'immagine multispettrale Ikonos, più il coseno dell'angolo di illuminazione. I risultati delle due regressioni multiple sono riportati nella Tabella 4.4.

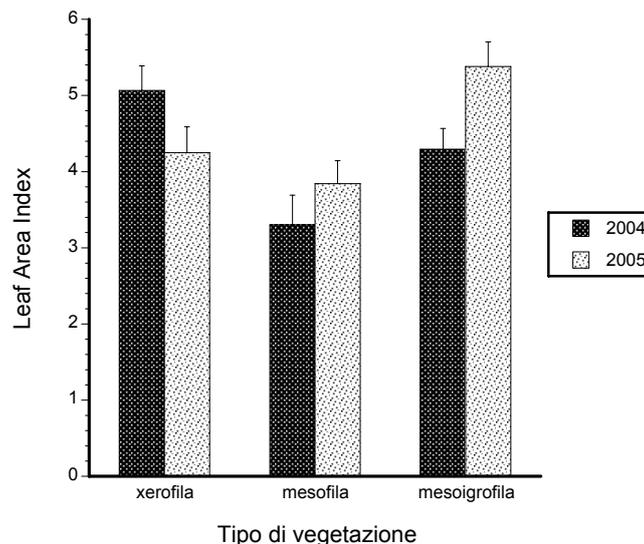


Figura 4.3 – LAI misurato a terra nei diversi tipi di vegetazione

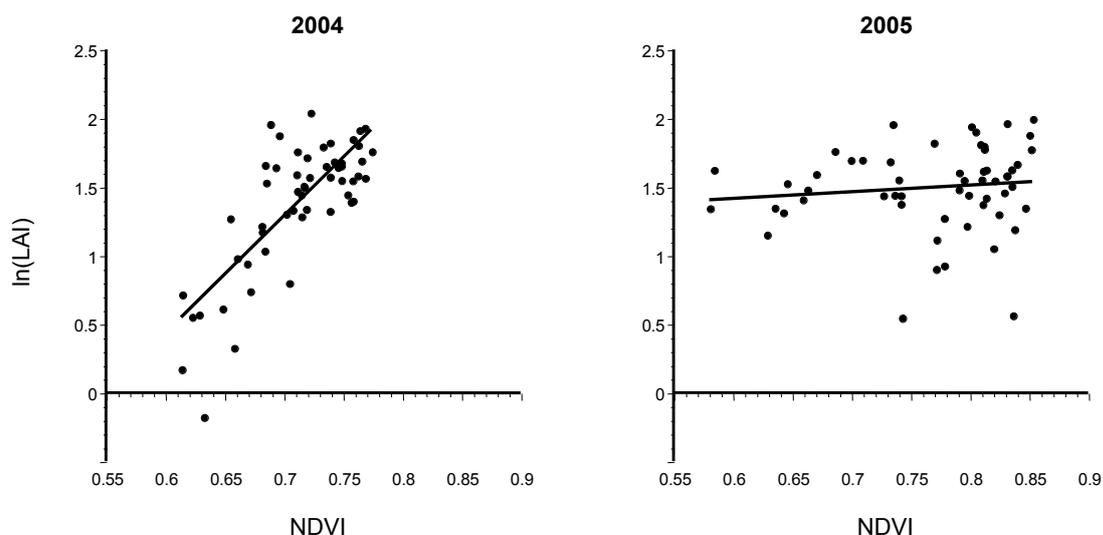


Figura 4.4 – Relazione fra LAI misurato a terra e NDVI derivato da dati Ikonos nei due anni di osservazione

Tabella 4.3 – Risultati delle analisi statistiche effettuate sui diversi indici di vegetazione derivati da Ikonos, nei due anni 2004 e 2005

VEGETATION INDEX	2004	2005
NDVI	$r^2=0,601$, $P<0,0001$	$r^2=0,013$, NS
GNDVI	$r^2=0,238$, $P<0,0001$	$r^2=0,0001$, NS
DVI	$r^2=0,146$, $P<0,005$	$r^2=0,029$, NS
RDVI	$r^2=0,308$, $P<0,0001$	$r^2=0,007$, NS
RVI	$r^2=0,527$, $P<0,0001$	$r^2=0,020$, NS
SAVI	$r^2=0,267$, $P=0,0001$	$r^2=0,012$, NS
GEMI	$r^2=0,136$, $P<0,01$	$r^2=0,033$, NS

Tabella 4.4 – Risultati delle regressioni multiple effettuate tra le bande Ikonos ed il cos(i) e il LAI misurato a terra nei due anni di osservazione

FATTORE	2004		2005	
	COEFFICIENTE	STATISTICA	COEFFICIENTE	STATISTICA
banda 1	-38,73	$t=-3,86$ $P<0,001$	-3,19	$t=-0,28$ NS
banda 2	40,54	$t=2,73$ $P<0,01$	30,98	$t=2,38$ $P<0,05$
banda 3	-72,66	$t=-8,21$ $P<0,001$	-34,96	$t=-3,61$ $P=0,001$
banda 4	2,04	$t=1,71$ NS	-2,42	$t=-2,50$ $P<0,02$
cos (i)	2,15	$t=4,40$ $P<0,001$	1,26	$t=2,47$ $P<0,02$
intercept	1,74	$t=-3,32$ $P=0,002$	1,29	$t=2,38$ $P<0,05$

Questi risultati mostrano come sia possibile costruire un modello predittivo del LAI sulla base dei dati satellitari Ikonos, ma evidenziano comunque come il grado di affidabilità di questi modelli sia estremamente diverso per i due anni di osservazione. Mentre infatti nel 2004 il modello ha un coefficiente di determinazione relativamente alto ($r^2=0,780$, $N=55$, $P<0,0001$), nel 2005 questo valore si abbassa notevolmente, pur rimanendo statisticamente significativo ($r^2=0,379$, $N=56$, $P=0,0002$). Sulla base dei coefficienti riportati nella Tabella 4.4, sono state quindi prodotte delle mappe di LAI relative all'intera area di studio nei due anni di osservazione (Figura 4.5). Queste mappe sono state poi utilizzate come "verità a terra" nel secondo stadio del processo di upscaling, cioè nella definizione di un modello di stima del LAI sulla base dei dati a media risoluzione derivati dalle immagini Landsat.

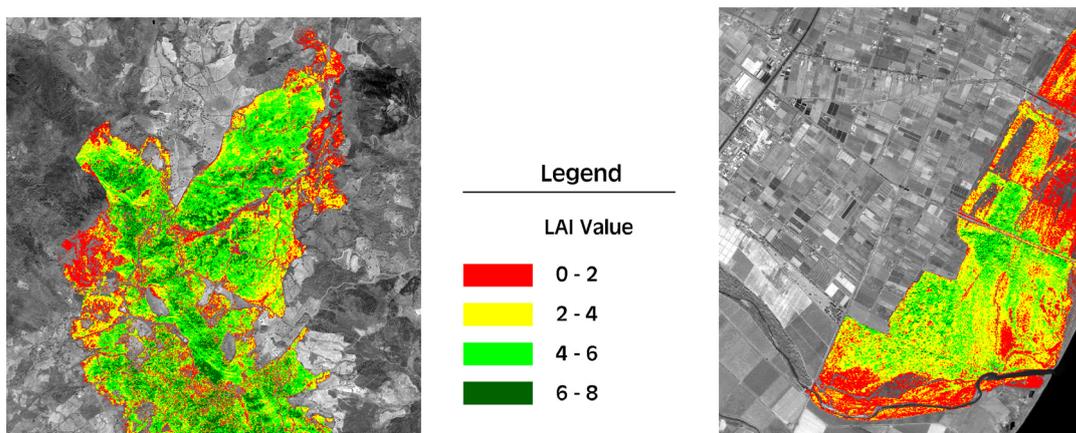


Figura 4.5 – Mappe di LAI derivate da IKONOS per le aree di Monte Coppolo-Rotondella (sinistra) e Pantano (destra) nel 2004

4.3.3 Relazioni fra LAI e dati satellitari Landsat

In questa seconda fase del lavoro le mappe di LAI prodotte nella fase precedente sono state utilizzate per ottenere dati di verità a terra a una scala compatibile con la risoluzione spaziale delle immagini Landsat.

È stata inizialmente condotta una analisi della covarianza sul dato LAI inserendo come fattori principali l'NDVI, il tipo di vegetazione e l'anno di osservazione, e aggiungendo tutte le loro possibili interazioni. Poiché alcune delle interazioni sono risultate non significative anche in questo caso il modello è stato ridotto e ha rivelato effetti significativi per l'NDVI ($F=59,29$, $df=1/196$, $P<0,0001$), il tipo di vegetazione ($F=18,86$, $df=2/196$, $P<0,0001$) e l'anno di osservazione ($F=167,41$, $df=1/196$, $P<0,0001$). Anche in questo caso, l'esistenza di una interazione significativa fra NDVI e anno di osservazione ($F=158,07$, $df=1/196$, $P<0,0001$) evidenzia però che la relazione fra NDVI e LAI non è la stessa nei due anni di osservazione.

Anche in questa seconda fase del lavoro, se si effettuano regressioni lineari separate fra NDVI e LAI nei due anni di osservazione si ottengono risultati molto diversi (Figura 4.6). Nel 2004 la relazione fra i due è molto stretta e positiva ($r^2=0,533$, $N=101$, $P<0,0001$), mentre nel 2005 è addirittura negativa ($r^2=0,230$, $N=101$, $P<0,0001$).

Abbiamo quindi anche in questo caso applicato, separatamente nei due anni di osservazione, un'analisi di regressione multipla utilizzando come variabili indipendenti

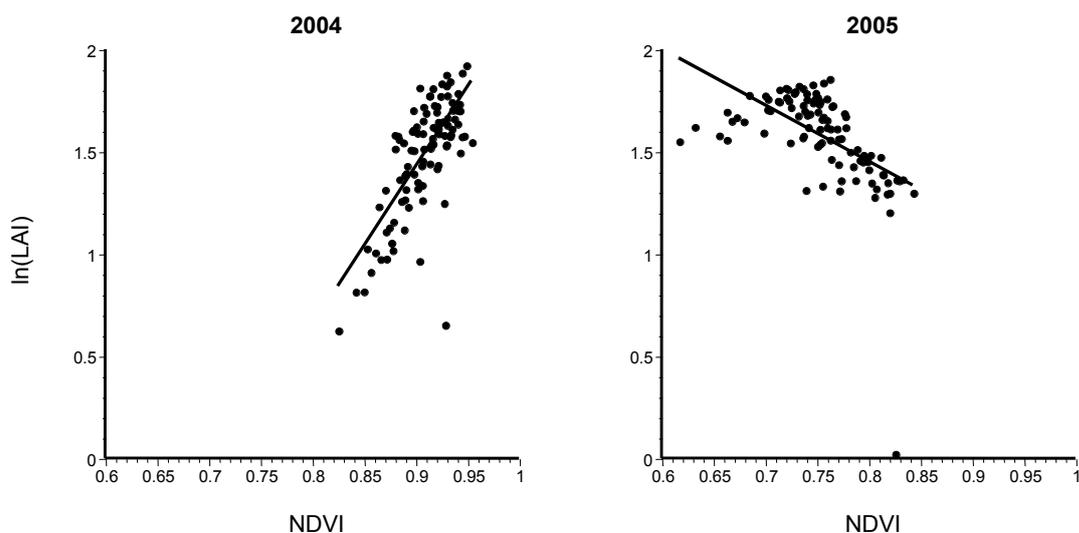


Figura 4.6 – Relazione tra il LAI stimato tramite dati Ikonos e NDVI derivato da dati Landsat nei due anni di osservazione

i valori di riflettanza nelle singole bande dell'immagine multispettrale Landsat, più il coseno dell'angolo di illuminazione. I risultati delle due regressioni multiple sono riportati nella Tabella 4.5.

Questi risultati mostrano come anche in questo caso sia possibile costruire un modello predittivo del LAI sulla base dei dati satellitari Landsat. La proporzione di varianza spiegata da questi modelli nei due anni di osservazione non differisce di molto (2004: $r^2=0,675$, $N=101$, $P<0,0001$; 2005: $r^2=0,565$, $N=101$, $P<0,0001$). Tuttavia la Tabella 4.5 evidenzia come i coefficienti relativi alle diverse bande differiscano in maniera drammatica nei due anni di osservazione, rendendo impossibile ogni ipotesi di estrapolazione ad anni diversi.

Tabella 4.5 – Risultati delle regressioni multiple effettuate tra le bande Landsat ed il $\cos(i)$ ed i valori di LAI derivati dalla mappa di LAI prodotta tramite Ikonos

FATTORE	2004		2005	
	COEFFICIENTE	STATISTICA	COEFFICIENTE	STATISTICA
banda 1	-21,55	t=-3,22 P=0,002	6,57	t=1,26 NS
banda 2	3,71	t=0,40 NS	16,35	t=2,29 P<0,05
banda 3	-51,05	t=-3,64 P<0,001	-19,68	t=-2,04 P<0,05
banda 4	1,79	t=1,13 NS	-5,58	t=-5,08 P<0,001
banda 5	6,12	t=0,97 NS	9,30	t=1,93 P=0,056
banda 7	-13,83	t=-1,30 NS	-18,36	t=-2,47 P<0,02
cos(i)	1,30	t=5,73 P<0,001	0,73	t=2,64 P=0,01
intercept	0,19	t=0,75 NS	2,30	t=6,16 P<0,001

4.4 Discussione

In questa parte del lavoro abbiamo testato un metodo di stima del LAI basato sull'integrazione di dati satellitari ad alta e a media risoluzione spaziale. In particolare l'utilizzo delle immagini ad alta risoluzione, per l'upscaling delle misure a terra, aveva lo scopo di ottimizzare le procedure di raccolta dei dati di verità a terra pur mantenendo una accettabile compatibilità con le necessità imposte dai limiti dei satelliti a media risoluzione e dalla forte eterogeneità e frammentazione spaziale caratteristiche della vegetazione mediterranea.

I risultati ottenuti si prestano a interpretazioni contrastanti. Da un lato, in uno degli anni di osservazione il metodo di upscaling da noi testato si è rivelato più che adeguato a produrre dati di verità a terra aventi una ottimale risoluzione spaziale pur richiedendo uno sforzo in termini economici e di forza lavoro nel complesso accettabile. Dall'altro, nei due anni di osservazione si sono ottenuti risultati estremamente diversi.

Una prima conseguenza di questa variabilità interannuale è che mentre nel 2004 il processo di upscaling ha dato ottimi risultati, nel 2005 i risultati sono stati decisamente insoddisfacenti. In effetti, la scarsa precisione nella stima del LAI da dati Ikonos evidenziata nella prima fase dell'elaborazione dei dati 2005 si è poi (prevedibilmente) tradotta in una stima del LAI a scala Landsat assolutamente inaffidabile. In sostanza, possiamo concludere dicendo che il metodo a due stadi da noi testato si è rivelato applicabile quando la prima delle due fasi ha dato i risultati attesi. Quando invece la stima del LAI da dati Ikonos è risultata inadeguata il metodo si è rivelato inaffidabile.

La variabilità interannuale da noi osservata nelle relazioni fra dati satellitari multispettrali e misure di parametri biofisici della vegetazione conferma quanto evidenziato da studi recenti circa la difficoltà di estrapolare temporalmente l'uso di modelli basati su regressione statistiche tra variabili biofisiche, quali il LAI, e dati radiometrici, in particolare gli indici di vegetazione [33]. Tali modelli sono infatti significativamente influenzati dalla particolare configurazione dei molteplici fattori che caratterizzano il dataset di partenza, per esempio le condizioni di illuminazione, e le caratteristiche di riflettanza delle superfici (determinate dalla configurazione relativa sole-suolo-sensore) la radiometria delle immagini satellitari, gli errori nel collocare le misure a terra sull'immagine, il background. Il superamento di questi limiti resta quindi una priorità scientifica di massimo livello, se si vorrà giungere alla possibilità di stimare quantitativamente ed in maniera estensiva le variabili biofisiche che caratterizzano gli ecosistemi mediterranei.

4.5 Bibliografia

- [1] Watson DJ. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11, 41-76.
- [2] Breda NJJ, 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54 (392): 2403-2417.
- [3] Sellers, P. J., Los, S. O., Tucker, C. J., Justice, C. O., Dazlich, D. A., Collatz, G. J., & Randall, D. A., 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric

GCMs: Part II. The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 9, 706– 737.

[4] Sellers, P. J., Dickinson, R. E., Randall, D. A., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A., Collatz, C. J., Denning, A. S., Mooney, H. A., Nobre, C. A., & Sato, N., 1997. Modelling the exchanges of energy, water, and carbon between the continents and the atmosphere. *Science*, 275, 502–509.

[5] Bonan G.B., 1998. The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR community climate model. *Journal of Climate*, 11, 1307-1327.

[6] Tian Y., Wanga Y., Zhanga Y., Knyazikhina Y., Bogaerta J., Myneni R. B., 2002. Radiative transfer based scaling of LAI retrievals from reflectance data of different resolutions. *Remote Sens. of Environ* , 84, 143–159.

[7] Kite, G. W., & Pietrorino, A. (1996). Remote sensing applications in hydrological modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 563– 587.

[8] D’Urso, Menenti M., Santini A., 1999. Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management. *Agricultural Water Management*, 40, 291-302.

[9] Andersen, J., Dybkjaer, G., Jensen, K. H., Refsgaard, J. C., & Rasmussen, K., 2002. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 30, 34– 50.

[10] Running, S.W., & Coughlan J.C., 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional application. *Ecological Modelling*, 42, 124-154.

[11] Gower Stith T., Kucharik C.J., Norman John M., 1999. Direct and indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. *Remote Sens. of Environ.* 70: 29–51.

[12] Asner G.P., Scurlock J.M.O., Hicke J.A., 2003. “Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies”. *Global Ecology & Biogeography*, Vol. 12, Issue 3, 191-205.

[13] Gong P., Pu R., Biging G.S., Larrieu M.R, 2003. “Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion Hyperspectral data”. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.41, no.6, 1355-1362.

[14] Schino, G., Borfecchia, F., De Cecco, L., Dibari, C., Iannetta, M., Martini, S., Pedrotti, F., 2003 - Satellite estimate of grass biomass in a mountainous range in Central Italy. *Agrofor. Syst.*, 59: 157-162.

[15] LI-COR, 1991. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Operating Manual. Lincoln, NE, USA.

[16] Welles J.M. & Norman J.M., 1991. Instruments for Indirect Measurement of Canopy Architecture. *Agronomy Journal*, vol. 83, 818-825.

[17] Welles J.M., 1990 – Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, vol. 5(1), pp.31-43.

[18] Cutini A., Matteucci G., Scarascia Mugnozza G., 1998 – Estimation of leaf area

- index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests. *For. Ecol. Manag.*, 105, 55-65.
- [19] Breda NJJ, 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal Of Experimental Botany* 54 (392): 2403-2417.
- [20] Nackaerts K., Coppin P., Muys B., Hermy M., 2000 – Sampling methodology for LAI measurement with LAI-2000 in small forest stands. *Agric. For. Meteor.*, 101, 247-250.
- [21] Vermote Eric F., 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 35. No. 3, 675-686 pp.
- [22] Gates D., Keegan J.J., Schleter J.C., & Weidner V.R., 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4, 11-20.
- [23] Asner G.P., 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sens. of Env.*, 64, 234-253.
- [24] Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., & Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1-371.
- [25] Broge N.H., Leblanc E., 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. of Environment* 76:156-172.
- [26] Gitelson A., Kaufman Y.J., Merzylak M., 1996. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58: 289-299.
- [27] Richardson, A. J. & Wiegand C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 43, 1541-1552.
- [28] Roujean J.L. & Breon F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 48: 119-126.
- [29] Huete A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- [30] Pinty B. & Vestraete H.M., 1991. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellite. *Vegetatio*, 101:15-20.
- [31] Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y., 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48: 119-126.
- [32] Anderson M. C., Neale C. M. U, Li F., Norman J. M., Kustas W. P., Jayanthi H., J. Chavez, 2004. Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, 447-464.
- [33] Wang Q., Adikua S., Tenhunena J., Granier A., 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94, 244-255.

5. ANALISI MULTITEMPORALE DELLA VEGETAZIONE

L. Giordano, G. Schino, C. Trotta

5.1 Introduzione

L'area del Mediterraneo è caratterizzata da un clima di transizione tra il clima temperato delle medie latitudini e il clima tropicale secco, pertanto è ritenuta potenzialmente molto sensibile ai cambiamenti climatici [1,2]. Infatti, sebbene le specie vegetali che compongono gli ecosistemi di tipo mediterraneo presentino diversi meccanismi di adattamento agli stress idrici ed alle elevate temperature estive, non sono ancora sufficientemente chiare le risposte che queste specie potranno mostrare ai cambiamenti climatici in genere ed in particolare all'aumento delle temperature e alla diminuzione delle precipitazioni previsti per il bacino del Mediterraneo [3].

La risposta delle piante alla variabilità delle condizioni ambientali è dovuta all'adattamento, geneticamente acquisito, e all'acclimatazione che le singole specie sviluppano in risposta ai diversi fattori e condizioni ecologiche, meccanismi che consentono alle piante di vivere e competere con successo in diversi ambienti [4]. Se le condizioni ambientali mutano entro un certo limite di tolleranza, le piante attuano di conseguenza le loro strategie di adattamento, ma tali strategie differiscono da specie a specie e non tutte sono in grado di rispondere con la stessa efficacia allo stesso tipo o alla stessa intensità e durata di stress ambientale [5].

In funzione dell'elevata diversità specifica che caratterizza i sistemi vegetali delle nostre aree e quindi dei diversi modelli adattativi adottati, si può ipotizzare che sul lungo periodo negli ecosistemi mediterranei i cambiamenti climatici inneschino fenomeni diversi se non contrastanti.

Ad esempio, un aumento delle temperature invernali potrebbe portare a una riduzione della fase di dormienza della vegetazione (con un aumento del rischio di danni da gelate improvvise) e quindi un allungamento della stagione di crescita, ma un aumento delle temperature estive potrebbe accrescere lo stress idrico e ridurre la crescita estiva della vegetazione. Allo stesso tempo le specie con una maggiore capacità di adattamento potrebbero avere un vantaggio competitivo sulle altre [6] e di conseguenza, la composizione e la struttura degli ecosistemi potrebbero alterarsi in quanto le specie maggiormente vulnerabili potrebbero modificare il loro areale di distribuzione "migrando" verso climi più adatti.

Uno strumento potente per lo studio delle risposte della vegetazione ai cambiamenti climatici ci viene fornito dalle serie multitemporali di immagini satellitari. Tali serie coprono ormai un arco temporale superiore ai venti anni, e possono quindi costituire una finestra di indagine significativa. In effetti, le serie multitemporali di immagini satellitari sono state ampiamente utilizzate per evidenziare cambiamenti nell'uso del suolo o nella vegetazione naturale [per esempio in 7,8,9,10,11,12,13,14,15].

In questo lavoro si è voluto valutare la possibilità di effettuare, nell'area di studio selezionata, un'analisi retrospettiva della vegetazione mediante l'utilizzo di una serie ventennale di dati satellitari Landsat TM/ETM. In particolare si è indagata la sensibilità di due diversi indici spettrali di vegetazione alle variazioni di parametri meteorologici ottenuti a partire da dati ampiamente disponibili quali la temperatura e le precipitazioni.

È noto infatti che le precipitazioni e le temperature esercitano un'influenza importante sullo sviluppo e le condizioni della vegetazione in particolare durante la stagione di crescita, determinandone il suo stato ad ogni stadio successivo. La temperatura è un fattore chiave nel determinare le diverse fenofasi (accestimento, gemmazione, sviluppo fogliare, fioritura, fruttificazione, senescenza e dormienza invernale) delle piante mentre le precipitazioni regolano l'attività fotosintetica ed il trasferimento di sostanze organiche dalle foglie ai rami e alle radici [16] e di conseguenza l'accrescimento stesso delle piante.

5.2 Materiali e metodi

È stata acquisita la serie di immagini Landsat TM/ETM dal 1984 al 2005, tutte riferite al periodo tarda primavera-estate e relativo quindi al massimo dello sviluppo vegetativo nell'area presa in esame (Tabella 5.1).

Tabella 5.1 – Serie di immagini Landsat utilizzate nell'analisi multitemporale

Data	Orbit track (path, row)
20/06/84	188,32
13/06/87	188,32
02/08/88	188,32
10/05/89	187,32
18/07/94	188,32
19/06/95	188,32
14/06/99	188,32
03/08/00	188,32
06/07/01	187,32
26/05/04	188,32
30/06/05	188,32

La scelta dei sensori della serie Landsat è stata guidata dalla opportunità di disporre di una risoluzione spaziale medio-alta che garantisca la possibilità di discriminare, all'interno dell'area di studio, le zone caratterizzate da tipologie di vegetazione diversa. A questa scala le tipologie con un'estensione tale da poter essere oggetto di questo tipo di analisi sono risultate le seguenti: macchia mediterranea, lecceta, bosco di caducifoglie e bosco igrofilo. In particolare si è ritenuto opportuno analizzare separatamente le due aree di Pantano e di M.Coppolo-Rotondella, rappresentando questi ecosistemi sensibilmente diversi in ragione delle differenti caratteristiche di altitudine, distanza dalla costa, esposizione ecc. (vedi Cap. 3).

5.2.1 Indici di vegetazione

Gli indici di vegetazione selezionati per l'analisi multitemporale sono il NDVI, precedentemente definito (cap. 4), ed il Normalized Difference Water Index (NDWI). Il primo è stato ampiamente utilizzato per lo studio ed il monitoraggio della vegetazione da satellite [17,18,19,20,21 tra gli altri].

Il secondo è una variante del primo basata sulla differenza normalizzata tra le riflettanze (ρ) alle lunghezze d'onda del NIR e del SWIR. La formulazione originaria è la seguente $NDWI = (\rho_{(0,86)} - \rho_{(1,24)}) / (\rho_{(0,86)} + \rho_{(1,24)})$ [21]. Entrambe le lunghezze d'onda sono collocate nel plateau di elevata riflettanza che caratterizza la tipica firma spettrale della vegetazione.

L'assorbimento dovuto al contenuto idrico fogliare è trascurabile alla lunghezza d'onda $\lambda = 0,86 \mu\text{m}$ mentre è debole per $\lambda = 1,24 \mu\text{m}$; l'elevata riflettanza della vegetazione in questa porzione dello spettro tuttavia esalta l'assorbimento dovuto al contenuto d'acqua. Ne deriva che l'NDWI è sensibile alle variazioni di contenuto d'acqua nella vegetazione a parità di copertura vegetale per unità di area [22]. Diverse applicazioni di questo indice hanno fatto uso delle bande disponibili sui sensori della famiglia Landsat [per esempio in 22,23,24]. In questo studio, in particolare, il NDWI è stato calcolato a partire dai valori di riflettanza relativi alle bande Landsat NIR e SWIR1 secondo la formula $NDWI = (\rho_{(NIR)} - \rho_{(SWIR1)}) / (\rho_{(NIR)} + \rho_{(SWIR1)})$.

Di entrambi gli indici spettrali sono stati calcolati i valori medi per area e per tipologia di vegetazione da utilizzare nelle analisi statistiche mirate a valutarne la correlazione con i parametri meteorologici.

5.2.2 Pre-processing delle immagini satellitari

L'obiettivo del pre-processing è stato, in questo caso, quello di rendere quanto più possibile omogenea la serie multitemporale di dati radiometrici a disposizione, ovvero rendere comparabili le immagini relative alle diverse date. Dopo aver co-registrato tutte le immagini, attraverso una correzione geometrica effettuata così come descritto nel cap. 4, è stata eseguita una correzione atmosferica basata sull'utilizzo di target "invarianti" [25,26,27]. Questo approccio assume l'esistenza nell'immagine di pixel, ovvero porzioni di territorio (target), le cui caratteristiche, da un punto di vista della risposta ad una radiazione elettromagnetica incidente, possono essere ritenute con buona approssimazione (e per gli scopi che ci si prefigge) invarianti nel tempo (per es. acque profonde, roccia ecc.).

Le variazioni di firma spettrale riscontrate in queste aree, per le diverse immagini, possono allora essere imputate al mutare delle condizioni atmosferiche nelle diverse date. Inoltre, poiché l'atmosfera influisce diversamente sulle varie lunghezze d'onda occorre cercare parametri di normalizzazione per ogni banda. I target, teoricamente, dovrebbero avere valori di riflettanza variabile in ogni banda, da bassa ad alta.

Selezionata un'immagine *master* di riferimento, si valutano allora i cambiamenti intercorsi nel tempo nella radiometria dei target invarianti individuati, rispetto a tale immagine. Si effettua quindi una regressione lineare per ogni immagine, banda per banda, tra i valori di riflettanza di riferimento ρ_{nref} (dove ρ_{nref} si riferisce alla banda n -esima dell'immagine *master*) relativi ai diversi target invarianti individuati e i valori di riflettanza ρ_n dell'immagine da normalizzare corrispondenti agli stessi target. Le regressioni forniscono i parametri di normalizzazione cercati per ogni immagine e per ogni banda, rappresentati dall'intercetta e dalla pendenza delle rette di regressione.

Nel caso specifico, è stata selezionata come immagine *master* quella del 30/08/2004, già corretta atmosfericamente tramite il codice 6S, in modo da ottenere non solo una normalizzazione relativa del dataset ma anche una correzione assoluta delle immagini in termini di riflettanza.

5.2.3 Dati meteorologici

Ai fini della valutazione della sensibilità degli indici spettrali di vegetazione ai parametri meteorologici nelle due aree di studio di M.Coppolo-Rotondella e Pantano, sono stati utilizzati i valori giornalieri di precipitazioni e temperature misurati dalle stazioni termo-pluviometriche di Policoro e Valsinni, rispettivamente, nel periodo 1983-2005. In particolare sono stati elaborati i seguenti parametri meteorologici: temperature medie, precipitazioni cumulate, sommatorie termiche, cioè accumulo di gradi-giorno (GDD, *growing degree days*), e pluviofattore, ovvero il rapporto tra le precipitazioni e le temperature medie. I GDD sono un parametro ampiamente utilizzato, in particolare in agricoltura, per la stima o la predizione della lunghezza delle differenti fasi di sviluppo delle colture [28] ma anche per studiare gli stadi fenologici di diverse specie naturali e la loro utilità come indicatori climatici [29]. Essi vengono generalmente calcolati come la differenza tra la temperatura media giornaliera ed una temperatura soglia al di sotto della quale i processi di crescita e sviluppo risultano significativamente inibiti.

L'analisi qui condotta comprende tre diverse soglie di temperatura: 0, 10, e 20 °C.

Inoltre il contributo di eventuali valori negativi di GDD, dovuti a temperature medie giornaliere inferiori alla soglia prescelta, è stato considerato nullo.

Di tutti i parametri summenzionati sono stati calcolati i valori medi relativamente a diversi intervalli temporali, vale a dire in corrispondenza di 180, 90, 30 e 10 giorni precedenti alla data di ogni passaggio satellitare della serie storica Landsat.

Questi periodi di tempo sono stati selezionati con lo scopo di individuare, attraverso la relazione con gli indici spettrali, se esiste e quale sia il parametro climatico, per un determinato intervallo temporale, maggiormente significativo per lo sviluppo della vegetazione ed eventualmente valutarne l'importanza per le diverse formazioni vegetali. Poiché tuttavia i vari indicatori climatici sono risultati ridondanti (e strettamente correlati) con le più semplici misure di temperatura media e precipitazioni totali, si è deciso di riportare solo i risultati relativi a queste ultime misure.

5.2.4 Analisi statistiche

Sono state condotte correlazioni di Pearson fra indici di vegetazione e parametri climatici relativi ai diversi intervalli temporali considerati. Le analisi sono state condotte separatamente per le aree di M.Coppolo-Rotondella e Pantano (corrispondenti alle stazioni pluviometriche di Valsinni e Policoro) in considerazione delle differenze di clima e vegetazione che caratterizzano le due aree. Le analisi sono state condotte sulle intere aree di studio e separatamente sulle diverse tipologie di vegetazione considerate.

Poiché ogni singolo dataset di indici di vegetazione è stato correlato con svariati parametri climatici (otto, per la precisione), i livelli di significatività statistica ottenuti sono stati sottoposti a correzione di Bonferroni.

5.3 Risultati

5.3.1 Serie storica di parametri climatici e indici di vegetazione

Un esame delle variazioni occorse negli ultimi venti anni in alcuni parametri climatici ha rivelato una consistente variabilità interannuale. Allo stesso modo, una discreta variabilità interannuale è stata evidenziata per gli indici di vegetazione esaminati. Le Figure 5.1 e 5.2 illustrano questa variabilità.

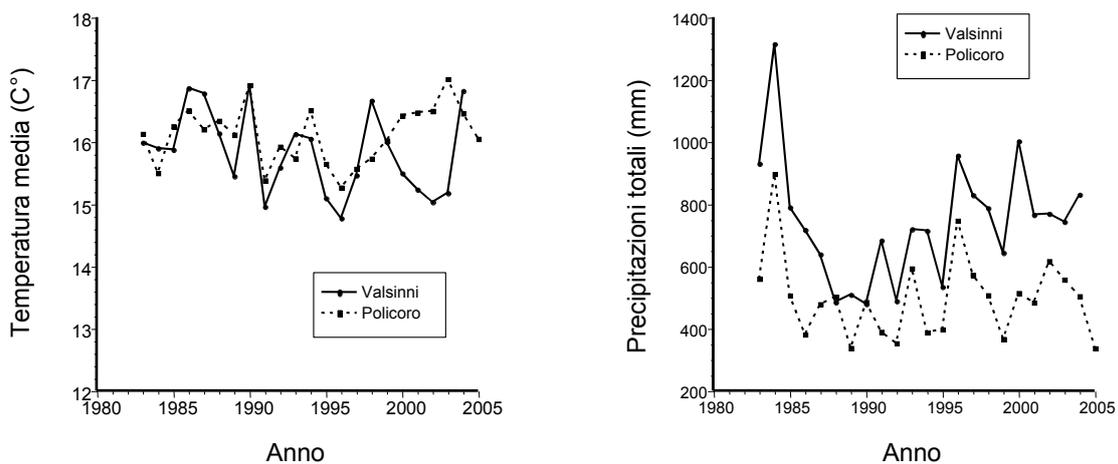


Figura 5.1 – Variazioni climatiche registrate presso le stazioni di Valsinni e di Policoro

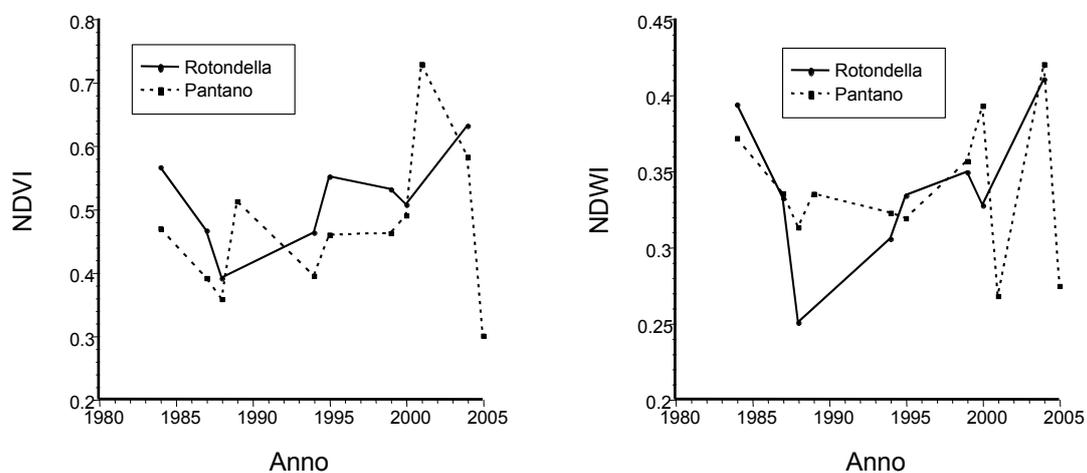


Figura 5.2 – Variazioni degli indici di vegetazione osservate nei boschi di M.Coppolo-Rotondella e Pantano

5.3.2 Relazioni fra parametri climatici e indici di vegetazione

I parametri climatici registrati dalle stazioni di Valsinni e Policoro sono stati inizialmente correlati con gli indici di vegetazione calcolati per le intere aree di studio di M.Coppolo-Rotondella e Pantano. I risultati di queste analisi sono presentati nella Tabella 5.2.

Va ricordato che, in considerazione dell'alto numero di correlazioni che è stato necessario calcolare, in queste analisi così come in tutte le altre presentate in questo capitolo i livelli di significatività statistica sono stati sottoposti a correzione di Bonferroni.

Nell'area di studio di M.Coppolo-Rotondella gli indici di vegetazione sono risultati negativamente correlati con le temperature medie registrate negli ultimi 10-30 giorni. Inoltre esiste una correlazione positiva tra l'NDWI e le precipitazioni totali degli ultimi 90 giorni. Al contrario, nell'area di studio di Pantano non è stata osservata alcuna correlazione significativa.

Tabella 5.2 – Risultati delle analisi statistiche tra parametri climatici e indici di vegetazione per le due aree di M.Coppolo-Rotondella e Pantano

Parametro Climatico	M.COPPOLO-ROTONDELLA		PANTANO	
	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI
T₁₈₀	r=-0,783 n=8 ns	r=-0,831 n=8 ns	r=-0,109 n=11 ns	r=-0,244 n=11 ns
T₉₀	r=-0,807 n=8 ns	r=-0,847 n=8 p<0,1	r=-0,237 n=11 ns	r=-0,224 n=11 ns
T₃₀	r=-0,869 n=8 p<0,05	r=-0,933 n=8 p<0,01	r=-0,333 n=11 ns	r=-0,326 n=11 ns
T₁₀	r=-0,877 n=8 p<0,05	r=-0,911 n=8 p<0,02	r=-0,400 n=11 ns	r=-0,409 n=11 ns
P₁₈₀	r=0,046 n=8 ns	r=0,150 n=8 ns	r=0,616 n=11 ns	r=0,073 n=11 ns
P₉₀	r=0,753 n=8 ns	r=0,879 n=8 p<0,05	r=0,236 n=11 ns	r=0,513 n=11 ns
P₃₀	r=0,425 n=8 ns	r=0,560 n=8 ns	r=0,327 n=11 ns	r=0,406 n=11 ns
P₁₀	r=0,243 n=8 ns	r=0,313 n=8 ns	r=0,171 n=11 ns	r=0,446 n=11 ns

T= temperature medie e P= precipitazioni cumulate calcolate per 180, 90, 30 e 10 gg

Successivamente, le stesse analisi sono state ripetute analizzando separatamente le diverse tipologie di vegetazione. I risultati di queste ulteriori analisi sono presentati nelle Tabelle 5.3 e 5.4.

Da queste analisi emerge che, nell'area di studio di M.Coppolo-Rotondella, l'effetto della temperatura sugli indici di vegetazione è particolarmente evidente sui boschi di caducifoglie e sulla macchia, mentre è ridotto o assente nella lecceta.

Nelle aree a macchia emerge inoltre una correlazione positiva fra precipitazioni negli ultimi tre mesi e uno degli indici climatici (l'NDWI).

Nell'area di studio di Pantano si conferma la generale assenza di correlazione fra variazioni climatiche e indici di vegetazione.

Anche in questo caso però si evidenzia nel caso della macchia una correlazione positiva significativa fra le precipitazioni cumulate negli ultimi tre mesi e l'NDWI.

Tabella 5.3 – Risultati delle analisi statistiche tra parametri climatici e indici di vegetazione per l'area di M.Coppolo-Rotondella per tipologia di vegetazione

Parametro climatico	M.COPPOLO-ROTONDELLA					
	Bosco caducifoglio		Lecceta		Macchia	
	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI
T₁₈₀	r=-0,786 n=8; ns	r=-0,859 n=8; p<0,06	r=-0,757 n=8; ns	r=-0,676 n=8; ns	r=-0,783 n=8; ns	r=-0,798 n=8; ns
T₉₀	r=-0,801 n=8; ns	r=-0,869 n=8; p<0,05	r=-0,778 n=8; ns	r=-0,678 n=8; ns	r=-0,809 n=8; ns	r=-0,816 n=8; ns
T₃₀	r=-0,860 n=8; p<0,05	r=-0,962 n=8; p<0,001	r=-0,823 n=8; p<0,1	r=-0,731 n=8; ns	r=-0,857 n=8; p=0,052	r=-0,880 n=8; p<0,05
T₁₀	r=-0,839 n=8; p<0,1	r=-0,875 n=8; p<0,05	r=-0,848 n=8; p<0,1	r=-0,764 n=8; ns	r=-0,890 n=8; p<0,05	r=-0,901 n=8; p<0,02
P₁₈₀	r=-0,012 n=8; ns	r=0,068 n=8; ns	r=0,027 n=8; ns	r=0,123 n=8; ns	r=0,055 n=8; ns	r=0,162 n=8; ns
P₉₀	r=0,673 n=8; ns	r=0,780 n=8; ns	r=0,746 n=8; ns	r=0,801 n=8; ns	r=0,794 n=8; ns	r=0,908 n=8; p<0,02
P₃₀	r=0,385 n=8; ns	r=0,567 n=8; ns	r=0,332 n=8; ns	r=0,245 n=8; ns	r=0,441 n=8; ns	r=0,565 n=8; ns
P₁₀	r=0,127 n=8; ns	r=0,105 n=8; ns	r=0,281 n=8; ns	r=0,406 n=8; ns	r=0,337 n=8; ns	r=0,457 n=8; ns

T= temperature medie e P= precipitazioni cumulate calcolate per 180, 90, 30 e 10 gg

Tabella 5.4 – Correlazioni tra parametri climatici e indici di vegetazione per l'area di Pantano per tipologia di vegetazione

Parametro climatico	PANTANO			
	Bosco igrofilo		Macchia	
	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI
T₁₈₀	r=-0,136 n=11 ns	r=-0,294 n=11 ns	r=-0,150 n=11 ns	r=-0,458 n=11 ns
T₉₀	r=-0,264 n=11 ns	r=-0,282 n=11 ns	r=-0,268 n=11 ns	r=-0,424 n=11 ns
T₃₀	r=-0,364 n=11 ns	r=-0,387 n=11 ns	r=-0,350 n=11 ns	r=-0,479 n=11 ns
T₁₀	r=-0,434 n=11 ns	r=-0,484 n=11 ns	r=-0,404 n=11 ns	r=-0,495 n=11 ns
P₁₈₀	r=0,598 n=11; ns	r=0,094 n=11; ns	r=0,692 n=11; ns	r=0,359 n=11; ns
P₉₀	r=0,226 n=11; ns	r=0,433 n=11; ns	r=0,337 n=11; ns	r=0,855 n=11; p<0,01
P₃₀	r=0,345 n=11; ns	r=0,426 n=11; ns	r=0,372 n=11; ns	r=0,638 n=11; ns
P₁₀	r=0,168 n=11; ns	r=0,335 n=11; ns	r=0,191 n=11; ns	r=0,593 n=11; ns

T = temperature medie e P = precipitazioni cumulate calcolate per 180, 90, 30 e 10 gg

5.4 Discussione

I risultati di questo lavoro dimostrano come sia possibile evidenziare un effetto delle variazioni interannuali nella temperatura e nelle precipitazioni sulla vegetazione naturale in ambiente mediterraneo.

Negli anni in cui le temperature medie sono più alte si è osservata una diminuzione negli indici di vegetazione. Questo effetto è stato particolarmente evidente su alcuni tipi di vegetazione (macchia e bosco di caducifoglie), mentre è stato ridotto o assente su altri (bosco igrofilo e lecceta). Nelle aree a macchia mediterranea la vegetazione è anche risultata sensibile alla piovosità: gli anni con maggiori precipitazioni hanno registrato un aumento degli indici di vegetazione.

La ridotta sensibilità del bosco igrofilo e della lecceta alla variabilità interannuale delle precipitazioni e delle temperature ha probabilmente due diverse spiegazioni. La lecceta costituisce un tipo di vegetazione particolarmente bene adattato alle estati calde e secche tipiche dell'ambiente mediterraneo. Il leccio, infatti, oltre ad essere dotato di efficienti meccanismi di difesa a livello fogliare in grado di ridurre la traspirazione e quindi la perdita d'acqua ad elevate temperature [30], è una specie a crescita lenta dotata di un apparato radicale molto profondo [31] ed in grado di garantire un certo approvvigionamento idrico, indipendentemente dall'apporto delle precipitazioni. Queste caratteristiche giustificano per la lecceta la scarsa sensibilità degli indici di vegetazione ai parametri climatici.

Il bosco igrofilo, al contrario, cresce in zone dove il terreno è pressoché costantemente saturo d'acqua. Questa sovrabbondanza nella disponibilità idrica può contribuire ad ammortizzare gli effetti delle variazioni di temperatura e piovosità nei diversi anni.

La macchia mediterranea è in parte composta da specie sclerofille sempreverdi come il leccio, ovvero che presentano morfologie fogliari (foglie particolarmente spesse e coriacee ecc.) e strategie ecologiche (meccanismi precoci di chiusura degli stomi ecc.) particolarmente adattate all'ambiente mediterraneo. Alcune altre specie della macchia, come gli arbusti semi-decidui, presentano invece apparati radicali più superficiali ed una crescita molto più rapida, avendo adottato strategie ecologiche basate sulla diversità morfologica tra il fogliame invernale ed il fogliame estivo [32,33,34,35,36] ed un restringimento del periodo di crescita alla stagione più favorevole [37]. Sebbene quindi la macchia mediterranea sia composta da una varietà di specie con diversi modelli di adattamento all'ambiente in cui esse coesistono, diversi studi condotti sugli aspetti ecofisiologici di questi adattamenti dimostrano che è l'ammontare delle precipitazioni "la variabile che predice in modo significativo le risposte dello stato idrico delle specie sempreverdi mediterranee su scala inter-annuale" [38], in particolare nei periodi di massima attività fotosintetica [36,39].

Questa peculiarità della macchia mediterranea sembra essere rilevata dall'indice NDWI risultato sensibile alle precipitazioni cumulate negli ultimi tre mesi. L'effetto della temperatura è importante invece solo per intervalli temporali corrispondenti agli ultimi 30-10 giorni indicando il prevalere dell'incidenza di aspetti funzionali su quelli strutturali. È difficile infatti pensare che le temperature degli ultimi 30 giorni possano influenzare in maniera così forte aspetti strutturali della vegetazione quali il LAI o la biomassa. Più facile è invece pensare che temperature estive più alte siano associate a condizioni di stress idrico compensate da una riduzione dell'attività fotosintetica, specialmente nelle specie vegetali più sensibili.

L'importanza della temperatura nel regolare gli aspetti ecofisiologici si ritrova anche quando si analizza il bosco caducifoglio. Qui in particolare l'indice NDWI risulta negativamente correlato alle temperature medie degli intervalli temporali di 90, 30 e 10 giorni, evidenziando una riduzione del contenuto idrico fogliare (ma anche del contributo di umidità dovuto al background) in corrispondenza di temperature maggiori. Inoltre l'indice NDVI risulta negativamente correlato alle temperature medie degli ultimi 10-30 giorni, come probabile conseguenza della riduzione dell'attività fotosintetica in condizioni di stress termico.

Nel complesso, i risultati da noi ottenuti dimostrano come sia possibile evidenziare un effetto delle variazioni climatiche non solo su aspetti della fenologia quali la durata o l'inizio della stagione di crescita della vegetazione, ma anche sui massimi stagionali raggiunti. È inoltre da notare che, mentre gli studi condotti a latitudini medio-alte hanno evidenziato un effetto positivo delle aumentate temperature sulla crescita vegetale, i nostri risultati evidenziano una riduzione degli indici di vegetazione in corrispondenza di temperature medie più alte.

In conclusione, i risultati ottenuti si prestano a due tipi di considerazioni. Primo, evidenziano l'eterogeneità nella risposta della vegetazione mediterranea ai cambiamenti climatici. Perfino all'interno di uno stesso ecosistema le diverse tipologie vegetali mostrano variazioni non indifferenti nella loro risposta alle variazioni climatiche. Risulta quindi estremamente difficile astrarre principi generali e fare previsioni quantitative sulle possibili risposte prevalenti degli ecosistemi mediterranei ai cambiamenti climatici. Secondo, questi risultati mostrano come negli ecosistemi mediterranei le variazioni climatiche possano indurre cambiamenti non solo nella fenologia ma anche nei massimi stagionali raggiunti dagli indici di vegetazione, e come questi cambiamenti possano essere di segno opposto rispetto a quanto osservato a latitudini più alte.

5.5 Bibliografia

- [1] Cubasch U, Von Storch H, Waszkewitz J, Zorita E, 1996. Estimates of climate change in Southern Europe derived from dynamical climate model output. *Climate Research* 7: 129-149.
- [2] Lavorel S., Canadell J., Rambal S., Terradas J., 1998. Mediterranean terrestrial ecosystem: research priorities on global change effect. *Global Ecol. Biogeogr. Lett.* 7, 157-166.
- [3] IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I in The Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change, eds.: Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; Van Der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K. & Johnson, C A. – Cambridge University Press.
- [4] Palmroth et al., 1999. Structural adaptation rather than water conservation was observed in Scots pine over a range of wet to dry climates. *Oecologia* 121: 302-309.
- [5] Pereira JS, Chaves MM, 1995. Plant responses to drought under climate change in mediterranean-type ecosystems. In Moreno et al.: *Global change and Mediterranean-type ecosystems*. Springer-Verlag, New York, 140-160.

- [6] Gratani L., Varone L., Bombelli A., 2005. modelli adattativi di specie sempreverdi mediterranee. *Informatore Botanico Italiano*, 37 (1°), 216-217.
- [7] Grignetti A., Salvatori R., Casacchia R., Manes F., 1997. Mediterranean vegetation analysis by multi-temporal satellite sensor data. *International journal of remote sensing*, 1997, vol. 18, no. 6, 1307- 1318.
- [8] Li, Z., & Kafatos, M. (2000). Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Nino/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 71(3), 239– 247.
- [9] Qi J., R.C. Marsett b, M.S. Moranb, D.C. Goodrich b, P. Heilman b, Y.H. Kerr c, G. Dedieu c, A. Chehbouni d, X.X. Zhang, 2000. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area. *Agricultural and Forest Meteorology* 105, 55–68.
- [10] Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., et al., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560– 1563.
- [11] Garson D. C. and Lacaze B., 2003. Monitoring Leaf Area Index of Mediterranean oak woodlands: comparison of remotely-sensed estimates with simulations from an ecological process-based model. *Int.Journal of Remote Sensing*, 2003, vol. 24, n. 17, 3441–3456.
- [12] Gobron N., Pinty B., Melin F., Taberner M., Verstraete M. M., Belward A., Lavergne T. and Widlowski J.-L., 2005. The state of vegetation in Europe following the 2003 drought. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 9, pp.2013–2020.
- [13] Song, and Curtis E. Woodcock, 2003. Monitoring Forest Succession With Multitemporal Landsat Images: Factors of Uncertainty. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 41, no. 11, 2557-67.
- [14] Stockli R. and Vidale P. L., 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 25, no. 17, 3303–3330.
- [15] Sarkar S., Kafatos M., 2004. Interannual variability of vegetation over the Indian sub-continent and its relation to the different meteorological parameters. *Remote Sensing of Environment* 90, 268–280.
- [16] Papanastasis V. P., Platis P. D. and Dini-Papanastasi O.,1997. Productivity of deciduous woody and fodder species in relation to air temperature and precipitation in a Mediterranean environment. *Agroforestry Systems*, 37, 187–198.
- [17] Myneni R. B., Keeling C. D., Tucker C. J., Asrar G. & Nemani R. R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, vol. 386, 698-702.
- [18] Yang, L., Wylie, B. K., Thieszen, L. L., & Reed, B. C., 1998. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central great plains. *Remote Sensing of Environment*, 65, 25–37.

- [19] Kawabata A., K. Ichii and Y. Yamaguchi, 2001. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, vol. 22, no. 7, 1377- 1382.
- [10] Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., et al., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560– 1563.
- [20] Maselli F., 2004. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Rem. Sensing of Environ.* 89, 423–433.
- [21] Gao, B. C. (1996). NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257– 266.
- [22] Maki M., Ishihara M., Tamura M., 2004. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 90, 441–450.
- [22] Hardisky, M. A., Lemas, V., & Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77–83.
- [23] Anderson M. C., Neale C. M. U, Li F., Norman J. M., Kustas W. P., Jayanthi H., J. Chavez, 2004. Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, 447-464.
- [24] Jackson T. J., Chen D., Cosh v, Li F., Anderson M., Walthall C., Doriaswamy P., Hunt E. R, 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment* 92, 475–482
- [25] Schott, J., Salvaggio, R.C., Volchok, W.J., 1988. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing Environ.* 26, 1–16.
- [26] Furby S. L., Campbell N. A., 2001. Calibrating images from different dates to “like value” digital count. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 77 issue 2 – pp. 186-196.
- [27] Liang S., 2003. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New York: Wiley, 2003.
- [28] Bonhomme R., 2000. Bases and limits to using ‘degree.day’ units. *European Journal of Agronomy*, 13: 1-10
- [29] Spano D., Cesaraccio C., Duce P., Snyder 1999. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42, 124-133.
- [30] Crescente MF, Gratani L., 2002. Shoot growth efficiency and production of *Quercus ilex L.* in different climates. *Flora*, 197, 2-9.
- [31] Barbero, M., Loisel, R., Quezel, P., 1992. Biogeography, ecology and history of Mediterranean *Quercus ilex* ecosystems. *Vegetatio*, 99–100, 19–34.

- [32] Orshan, G., 1963. Seasonal dimorphism of desert and Mediterranean chamaephytes and its significance as a factor in their water economy. In: Rutter, A.J., Whitehead, F.H. (Eds.), *The Water Relations of Plants*. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 206–222.
- [33] Westman, W.E., 1981. Seasonal dimorphism of foliage in Californian coastal sage scrub. *Oecologia* 51, 385–388.
- [34] Christodoulakis, N.S., 1989. An anatomical study of seasonal dimorphism in the leaves of *Phlomis fruticosa*. *Ann. Bot.* 63, 389–394.
- [35] Correia, O., Martins, A.C., Catarino, F., 1992. Comparative phenology and seasonal foliar nitrogen variation in Mediterranean species of Portugal. *Ecol. Mediterr.* 18, 7–18.
- [36] Gratani, L., Crescente, M.F., 1997. Phenology and leaf adaptive strategies of Mediterranean maquis plants. *Ecol. Medit.* 23, 11–19.
- [37] Werner C, Correia O, Beyschlag W., 1999. Two different strategies of Mediterranean macchia plants to avoid photoinhibitory damage by excessive radiation levels during summer drought. *Acta Oecologica- International Journal of Ecology* 20 (1): 15-23.
- [38] Bombelli A., Gratani L., 2005. Risposte funzionali delle specie sempreverdi della macchia mediterranea alla disponibilità idrica. *Informatore Botanico Italiano*, 37 (1A), 182-183.
- [39] Gratani L., Ghia E., 2002. Changes in morphological and physiological traits during leaf expansion of *Arbutus unedo*. *Envir. Exp. Bot.*, 48, 51-60.

6. SENSORI AEROSPAZIALI PER IL MONITORAGGIO DEI FENOMENI DI DESERTIFICAZIONE

F. Borfecchia, S. Marcoccia, A. Farneti, L. La Porta, L. Giordano, L. De Cecco, S. Martini, C. Belli, P. De Vita

6.1 Introduzione

Molte applicazioni attuali consolidate che usano le tecniche di osservazione aerospaziale della terra sono basate su dati telerilevati acquisiti a scale spaziali medio-piccole, generalmente caratterizzati da copertura temporale, discriminazione spaziale e spettrale non sempre adeguate allo scopo. L'utilizzo di questo genere di dati telerilevati, anche se rappresenta spesso il migliore compromesso compatibile con le tecnologie attualmente disponibili, talvolta risulta non ideale per l'identificazione ed il controllo dei processi ecologici più sottili quali, ad esempio, quelli di stress, frammentazione e degrado della vegetazione che sono spesso connessi, anche a livello nazionale, agli effetti della desertificazione e dei cambiamenti climatici in atto.

Tali capacità di monitoraggio tempestivo, puntuale ed efficace, risultano tuttavia, essenziali per la valutazione appropriata delle differenti opzioni di gestione delle aree agricole e naturali con obiettivi di conservazione e sostenibilità di lunga durata, anche dal punto di vista del rendimento economico.

I sensori satellitari vanno evolvendo verso maggiori capacità iperspettrali, con risoluzione spettrale di circa 10-20 nm (HYPERION) solitamente unita a capacità pancromatiche in grado di risolvere dettagli geometrici dell'ordine del metro. Questo progresso richiede di affrontare sfide tecnologiche connesse alla produzione e gestione di grosse moli di dati che spesso richiedono dei compromessi in termini di *trade-off* tra risoluzione radiometrica, geometrica e spettrale nonché tra la quantità, l'ampiezza e la distribuzione degli intervalli spettrali da considerare eventualmente con capacità di programmazione. È necessario per questo indagare la sensibilità delle varie frequenze alle variazioni dei molteplici parametri biofisici d'interesse per il monitoraggio degli ecosistemi terrestri e marini, in modo da stabilire le priorità di sviluppo ed indirizzare e supportare anche le specifiche dei nuovi sensori satellitari per telerilevamento.

Da questo punto di vista risulta spesso critica la fase di calibrazione che permette di associare alle firme spettrali, estratte dai segnali elettromagnetici rilevati dai sensori remoti, le variazioni delle grandezze d'interesse sulla superficie terrestre. In quest'ottica è fondamentale la progettazione di campagne di misura a terra dei parametri biofisici da stimare, caratterizzate da strategie di campionamento adeguate e dall'acquisizione dei dati *in situ* con specifici sistemi di rilevazione e geolocalizzazione (GPS) sincrona con i passaggi satellitari ed aerei.

Le attività di misurazione diretta *in situ* delle grandezze bio-fisiche legate alla dinamica della vegetazione e caratterizzate dalla localizzazione geografica costituiscono inoltre la base per lo sviluppo e la calibrazione di modelli finalizzati alla stima estensiva e sinottica delle distribuzioni spaziali e dell'andamento temporale di tali grandezze, a partire dalle immagini multispettrali telerilevate e da dati ancillari aggiuntivi.

Considerando la notevole frammentazione che spesso caratterizza gli ecosistemi terrestri, in particolare nella regione del bacino del Mediterraneo, e al fine di ottimizzare la quantità e la distribuzione delle misure in campo in accordo con le risorse disponibili, sovente risulta conveniente introdurre rilevamenti aerospaziali a scale di maggior

dettaglio, tipicamente effettuati da piattaforma aerea. In tal modo è possibile realizzare una più agevole ed efficace calibrazione intermedia, col supporto della quale procedere al processamento dei dati telerilevati satellitari a scala maggiore.

In definitiva, se con l'avvento delle nuove tecnologie spaziali, per lo più legate ai satelliti, (alcuni dei quali prettamente dedicati al monitoraggio ambientale a varie scale), oggi è possibile affermare che i dati ambientali acquisiti a scala globale coprono molte delle necessità di cui sopra, oltretutto ad un costo sempre decrescente, rimangono comunque inadeguate la produzione e la reperibilità del dato telerilevato a scala locale, di dettaglio, la cui necessità spesso si manifesta non solo per supportare ed ottimizzare adeguatamente la calibrazione dei dati telerilevati a grande scala ma anche per le esigenze di monitoraggio specifico con caratteristiche avanzate di economicità, sincronicità, flessibilità e tempestività legate anche ad esempio al verificarsi di un dato evento (ad es. un'alluvione, un incendio).

La produzione di questo tipo di dati telerilevati da piattaforma aerea, in Italia, è oggi caratterizzata da un'attività di volo limitata, pur con una flotta disponibile ampia, con un alto costo di gestione dei velivoli abbinato a quello dei sistemi alloggiati, derivanti per la maggior parte da tecnologia legata ai satelliti, che sovente costituisce un ulteriore aggravio economico.

In questo contesto il progetto SADE (Sensori Aerospaziali per il monitoraggio dei fenomeni di Desertificazione), sviluppato in sinergia con le attività del WP 2.4 del PON RIADE, è stato mirato alla valutazione, per quanto possibile estensiva, dell'utilizzo dei dati telerilevati provenienti dai sensori utilizzati per il monitoraggio della vegetazione naturale e d'interesse agricolo e della sua dinamica temporale, in relazione ai fenomeni collegati ai processi di desertificazione. In particolare è stato dedicato alla messa a punto di metodologie e strategie per l'utilizzo efficace del sensore aviotrasportato ASPIS (Advanced Spectroscopic Imaging System), sia con l'obiettivo di ottimizzare lo schema di campionamento a terra che di rendere più efficace la calibrazione dei rilievi satellitari. Si è pervenuti ad indicazioni atte a supportare la realizzazione di un eventuale futuro sensore dedicato, grazie alla elaborazione integrata dei dati di *verità a terra* relativi a parametri biofisici ed alla riflettanza (firme iperspettrali) della vegetazione e dei suoli, fornendo indicazioni sugli intervalli spettrali da utilizzare per il monitoraggio di questi parametri biofisici legati al contenuto idrico fogliare ed alla salinizzazione dei suoli. Allo stesso tempo, gli stessi dati sono stati utilizzati per una valutazione della potenzialità spettrale di diversi sensori oggi disponibili in termini di efficacia nel monitoraggio di tali parametri biofisici.

6.2 Campagne di misura

6.2.1 Aree di studio

Con l'obiettivo di effettuare misure puntuali di parametri biofisici della vegetazione sensibili agli effetti della desertificazione unitamente alle relative firme iperspettrali, sono state effettuate campagne di misure a terra su aree di test preventivamente selezionate: alcune sulla costa ionica della Basilicata caratterizzate da vegetazione seminaturale ed agricola (in prevalenza frutteti), altre in Puglia, sul lago di Lesina e nei pressi di Foggia e Manfredonia, coltivate a cerealicoli (grano).

Nella Figura 6.1 sono riportate le 2 aree di studio della costa Ionica con l'indicazione delle regioni rilevate tramite i sensori aviotrasportati descritti nel seguito e dal sensore satellitare Ikonos (rettangoli in azzurro e nero, rispettivamente), delle posizioni dei punti di misura e calibrazione (in rosso quelli sulle aree agricole e in giallo quelli sulle aree seminaturali) in sovrapposizione ad una immagine multispettrale Landsat TM (30 m di risoluzione a terra, 7 bande spettrali) visualizzata in *true color*.

Entrambe le aree sono situate in Basilicata, in provincia di Matera: la prima, sita in località Pantano nel Comune di Policoro, pianeggiante (quota media 13 m s.l.m.), coperta in parte da boschi (in sinistra idrografica del fiume Sinni in prossimità della foce), in parte da campi coltivati; ha un'estensione all'incirca di 6,0 km x 6,5 km (rettangolo azzurro); la seconda area di studio è montuosa – la cima di Monte Coppolo raggiunge la quota di 890 m – in gran parte coperta da boschi di latifoglie; si estende per un'area di circa 5,5 km x 5,5 km (rettangolo azzurro) nei Comuni di Rotondella e Valsinni. Per la caratterizzazione e la descrizione approfondita delle aree a vegetazione naturale si rimanda ai capitoli 2 e 3 di questo volume.

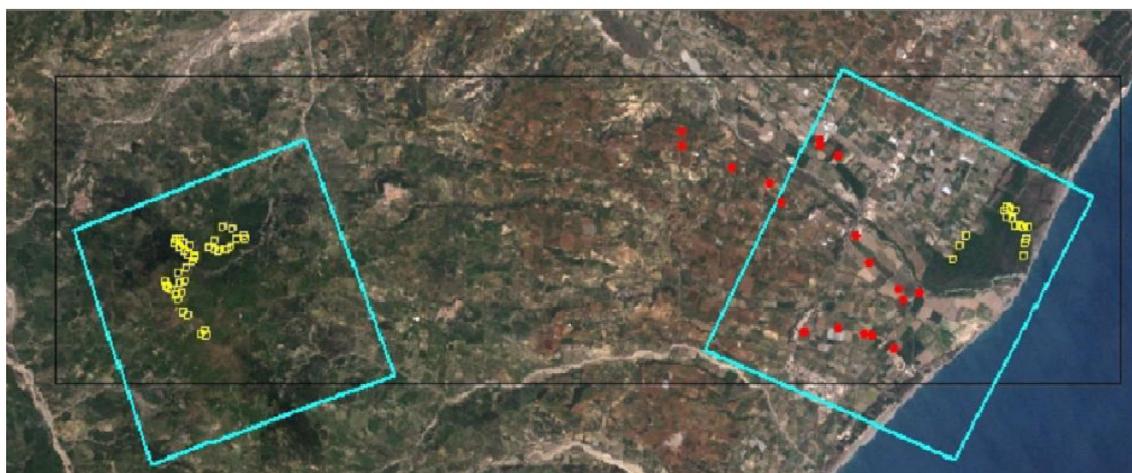


Figura 6.1 – Aree di studio in Basilicata: Monte Coppolo-Rotondella (sinistra) e Pantano (destra). Punti di misura a terra su aree agricole (in rosso) e su vegetazione seminaturale (in giallo). Il rettangolo delimitato con linea nera è relativo alla copertura IKONOS, quelli in azzurro alla copertura ASPIS

La Figura 6.2 mostra le aree di test pugliesi: la prima nei pressi dell'Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura di Foggia (riquadro rosso), l'altra nei pressi di Manfredonia (riquadro verde) ed infine l'ultima vicina al lago di Lesina (riquadro giallo).

Si tratta in tutti i casi di aree pianeggianti coltivate prevalentemente a cereali (grano, farro, orzo); la prima si estende per circa 8 km² e si trova a nord ovest di Foggia da cui dista pochi chilometri. Le quote variano poco e sono comprese tra 78 e 85 m s.l.m. L'area di studio vicina a Manfredonia si estende per circa 42 km² con quote variabili tra 0,0 e 2,9 m s.l.m. L'area di Lesina si estende per circa 350 km². Queste ultime due aree, più vicine alla costa, ricadono in un territorio soggetto a salinizzazione dei suoli.

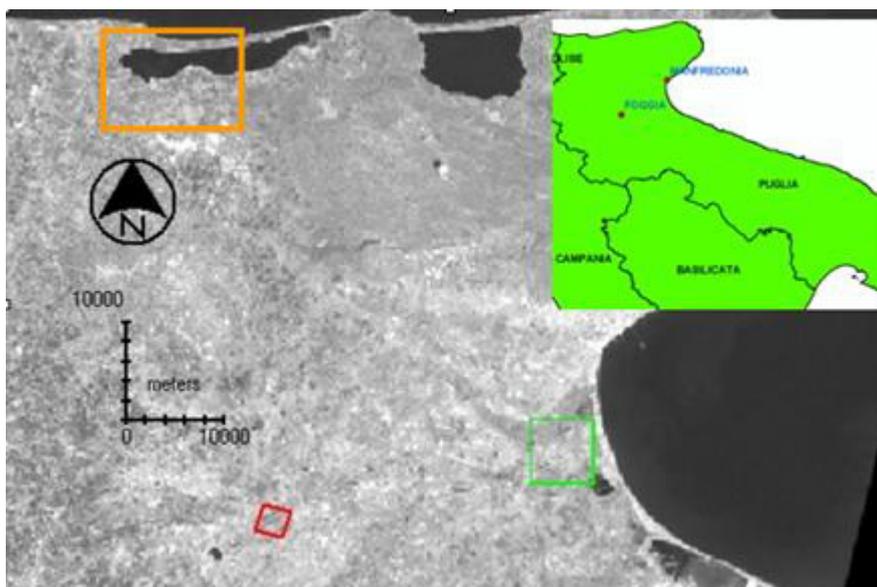


Figura 6.2 – Aree di studio in Puglia: Lesina (FG), Foggia e Manfredonia (rettangoli giallo, rosso e verde rispettivamente)

6.2.2 Rilievi a terra

I parametri biofisici misurati sono:

- il LAI (*Leaf Area Index*), sulla vegetazione semi-naturale, tramite LICOR-LAI 2000 *Plant Canopy Analyzer*;
- l'RWC (*Relative Water Content*) ed FMC (*Fuel Moisture Content*), su campioni di foglie prelevati nelle aree coltivate della costa Ionica e di Foggia; questi ultimi sono indici legati al contenuto d'acqua fogliare definiti nel modo seguente:

$$RWC = (P_w - P_d) / (P_s - P_d);$$

$$FMC = (P_w - P_d) / P_w,$$

con P_w , peso umido delle foglie, P_d , peso secco delle foglie (essiccazione in forno a 80° per 24 ore), P_s peso saturo ottenuto per imbibizione ponendo le foglie in acqua distillata per 6 ore.

Mentre l'FMC è un indice di contenuto idrico, l'RWC è piuttosto una misura del deficit idrico della foglia rispetto a condizioni ottimali; inoltre la divisione per il valore massimo fornisce una sorta di normalizzazione tra le varie specie in modo da rendere confrontabili le misure di questo parametro.

- la conducibilità elettrica del suolo misurata in microsiemens al centimetro ($\mu S/cm$), nelle aree coltivate a cerealicoli di Manfredonia (campagna 2005) e Lesina (acquisiti dall'Università di Foggia);
- la tessitura del suolo, nelle aree coltivate di Lesina e della costa ionica.

In corrispondenza degli stessi siti su cui sono stati misurati i parametri biofisici sopra citati sono state eseguite misure "sincrone" di riflettanza mediante spettroradiometro ASD Field Spec Pro, eccetto che nelle aree a vegetazione naturale.

In una prima campagna, condotta in aprile 2004 nelle aree seminaturali della costa Ionica, sono state individuate 55 aree di saggio (plot), di cui 16 a Pantano e 39 a Monte Coppolo-Rotondella (v. capitoli 2 e 3).

Ad ogni plot è stato assegnato un codice alfanumerico e ne sono state registrate le coordinate geografiche, la quota media, la pendenza e l'esposizione del versante ed alcune caratteristiche (altezza media strato arboreo ed arbustivo, presenza di radure, distanza dei plot dalle radure ecc.) necessarie per pianificare correttamente le successive campagne di misura del LAI (Figura 6.3). In una successiva campagna, in giugno, sono stati individuati, registrati tramite GPS e caratterizzati in termini di tipologia di coltivazione ed eventuale irrigazione (diffusa in zona su quasi tutte le coltivazioni) 20 punti dell'area agricola dove successivamente effettuare le misure di FMC, RWC, firme iperspettrali e tessitura.



Figura 6.3 – Campagne di misura a Pantano



Figura 6.4 – Misure di riflettanza su grano

La terza campagna è stata eseguita in corrispondenza del passaggio del satellite LANDSAT 5 di metà luglio. Durante questa campagna, contemporanea ai rilievi aerei, sono stati ritrovati i punti precedentemente individuati e registrati ed acquisiti i dati di LAI sulle aree seminaturali e quelli di RWC e di riflettanza sulle aree agricole. Nelle aree agricole in particolare sono state acquisite le firme spettrali, tramite spettrometro portatile ASD Fieldspec Pro sia sulle foglie che sul relativo suolo sottostante in condizioni asciutte ed umide. Inoltre è stata misurata la temperatura di radianza del suolo e delle piante tramite un pirometro e l'umidità dell'aria con un igrometro. I campioni di foglie e terreno sono stati portati in laboratorio rispettivamente per la stima del contenuto di acqua, correlabile ad eventuali stress idrici, e per l'analisi della tessitura dei suoli.

Lo svolgimento di più campagne, le prime per l'individuazione dei punti e le seconde per le misure dei parametri biofisici (LAI, RWC, FMC) e di riflettanza, si è reso necessario al fine di eseguire i rilievi in un tempo quanto più possibile ristretto e sincrono con il passaggio dei sensori aviotrasportati e satellitari. Nel maggio 2004 inoltre è stata condotta una campagna di misure di riflettanza (Figura 6.4) tramite spettrometro ASD FieldspecPro e GPS in un'area pugliese, nei pressi del lago di Lesina, nella quale erano disponibili misure di conducibilità e tessitura dei suoli rilevati dall'Università di Foggia.

Nell'aprile 2005 sono state effettuate le misure di RWC, FMC e della conducibilità del suolo sui cerealicoli dell'area dell'Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura di Foggia (Figura 6.2, riquadro rosso) e di quella di Manfredonia (Figura 6.2, riquadro verde),

rispettivamente, in sincronia con i rilievi radiometrici terrestri ed aerei con l'obiettivo di evidenziare eventuali correlazioni tra stress idrico e/o da salinizzazione e firme spettrali di vegetazione d'interesse agricolo (principalmente grano).

6.2.3 Rilievi aerei

I voli sono stati effettuati con aereo ultraleggero SKY ARROW 650 TC biposto per pilota ed operatore, su cui sono stati montati i sistemi di acquisizione ASPIS e DFR (Duncan, Flir, Riegl) descritti nel seguito (par. 6.4.1). La prima missione per l'acquisizione di dati telerilevati tramite sensori aviotrasportati è relativa ai voli del 13 e il 15 luglio 2004, sulle aree della costa Ionica, di cui in Figura 6.5 si riportano i piani di volo.



Figura 6.5 – Piano di volo: luglio 2004 sistema DFR (sinistra); sistema ASPIS (destra)

In Figura 6.6 è indicata la traccia del volo registrata tramite GPS di bordo durante l'acquisizione dei dati con sistema DFR; stesso percorso è stato seguito durante l'acquisizione con il sistema ASPIS. La quota di volo è compresa tra 4000 e 6000 ft (1200-1800 m) s.l.m.

Le riprese sono state effettuate in 3 voli distinti della durata di circa 3,5 ore ciascuno: 2 voli con sistema ASPIS in data 13 e 15 luglio e 1 volo con sistema DFR effettuato il 15 luglio 2004. Come base di partenza e arrivo è stata utilizzata l'aviosuperficie Falcone in prossimità di Lavello (PZ) che dista circa 50 minuti di volo in direzione Nord-Est rispetto alle aree di interesse.



Figura 6.6 – Traccia del volo rilevata dal GPS di bordo

A causa delle cattive condizioni meteorologiche per completare le riprese sono stati necessari 4 giorni durante i quali sono stati effettuati preventivamente anche dei sorvoli ricognitivi sulle aree.

Nella missione 2004 (e successivamente nel 2005) il sistema ASPIS è stato utilizzato per acquisire immagini multispettrali secondo due diverse configurazioni del sensore, denominate rispettivamente NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e RE (*Red Edge*). Nella prima i 4 canali selezionati tramite filtri sono stati: Green, Red, RE1, NIR, mentre la seconda comprendeva 4 canali pressoché contigui (RE1, RE2, RE3, RE4) nel range spettrale del *red edge* compreso tra il Red e il NIR.

I parametri di volo e le caratteristiche delle immagini acquisite nelle campagne effettuate mediante i sistemi ASPIS e DFR sono presentati nelle Tabelle 6.1, a,b,c.

La dimensione del pixel a terra è funzione dell'altezza di volo (in m), della lunghezza focale (di solito espressa in mm) e della dimensione del pixel sull'immagine (espressa in micron). La scala delle riprese (SI) è il rapporto della distanza tra due punti di una immagine e la distanza corrispondente sul terreno e si calcola dividendo la lunghezza focale per l'altezza di volo. L'altezza di volo è determinata sottraendo alla quota di volo s.l.m. la quota media del terreno.

Tabella 6.1 – a) quota di volo, altezza di volo, risoluzione geometrica per dati ASPIS e DFR; b) lunghezza focale e dimensione del pixel dei sistemi ASPIS e DFR; c) quota media sul livello del mare delle aree di studio

Sistema	Area di studio	Data di acquisizione	Quota di volo	Quota di volo	Altezza di volo	Risoluzione geometrica
			ft slm	m slm		
DFR	Pantano	15/07/2004	5000	1524	1510,0	0,80
DFR	Monte Coppolo	15/07/2004	6000	1828,8	1395,0	0,74
ASPIS	Pantano	13/07/2004	4000	1219,2	1205,0	0,90
ASPIS	Monte Coppolo	13/07/2004	5500	1676,4	1242,0	0,93
ASPIS	Pantano	15/07/2004	4500	1371,6	1358,0	1,02
ASPIS	Monte Coppolo	15/07/2004	5500	1676,4	1242,0	0,93

a)

Sistema di acquisizione	Lunghezza focale	Dimensione pixel	Area studio	Quota media
	mm	micron		m slm
DFR	14	7,4	Pantano	13,5
ASPIS	12	9	Monte Coppolo	434

b)

c)



Figura 6.7 – Esempio di immagine (banda a 700 nm) acquisita, mediante sistema ASPIS, nell'area agricola di Pantano

Nell'area di Pantano è stata assunta un'altezza media del terreno s.l.m. di 13 m, mentre nella zona di Monte Coppolo è stata considerata una quota media del terreno di 435 m. Le immagini sono in formato BIL e sono corredate da un file di testo in cui sono riportate le indicazioni (numero di righe e di colonne, numero di byte dell'immagine) per effettuare la conversione in un file adatto alle elaborazioni. Nella campagna del 2004 nella zona di Pantano sono state acquisite 247 immagini multispettrali (per un totale di 988 file, essendo ogni immagine costituita da 4 bande ed ogni banda un file a sé stante). La risoluzione a terra è inferiore ad 1 m.

In Figura 6.7 è mostrato a titolo d'esempio la banda acquisita a 700 nm.

Nella stessa missione, nell'area di Monte Coppolo sono state acquisite 232 immagini multispettrali (per un totale di 928 file) con risoluzione a terra inferiore ad 1 m; in Figura 6.8 sono mostrate le 4 bande di una immagine della zona di Monte Coppolo.

I dati acquisiti mediante il sistema DFR comprendono:

- immagini Duncan, in cui la banda 1 è il rosso (680 nm), la banda 2 corrisponde all'infrarosso vicino (780 nm), la banda 3 al verde (550 nm);
- dati acquisiti mediante camera termica Flir;
- dati acquisiti mediante GPS; le coordinate dei punti, latitudine e longitudine, sono espresse in gradi, primi e frazioni di primo; sono inoltre indicate l'ora (ore, minuti, secondi), lo stato di acquisizione dello strumento (A: dato valido; V: messaggio di avviso); la data (giorno, mese, anno – 15 luglio 2004), la velocità in knodi¹ (kt);
- i dati sono corredati di informazioni relative al volo: data, ora, quota di volo, condizioni meteo.

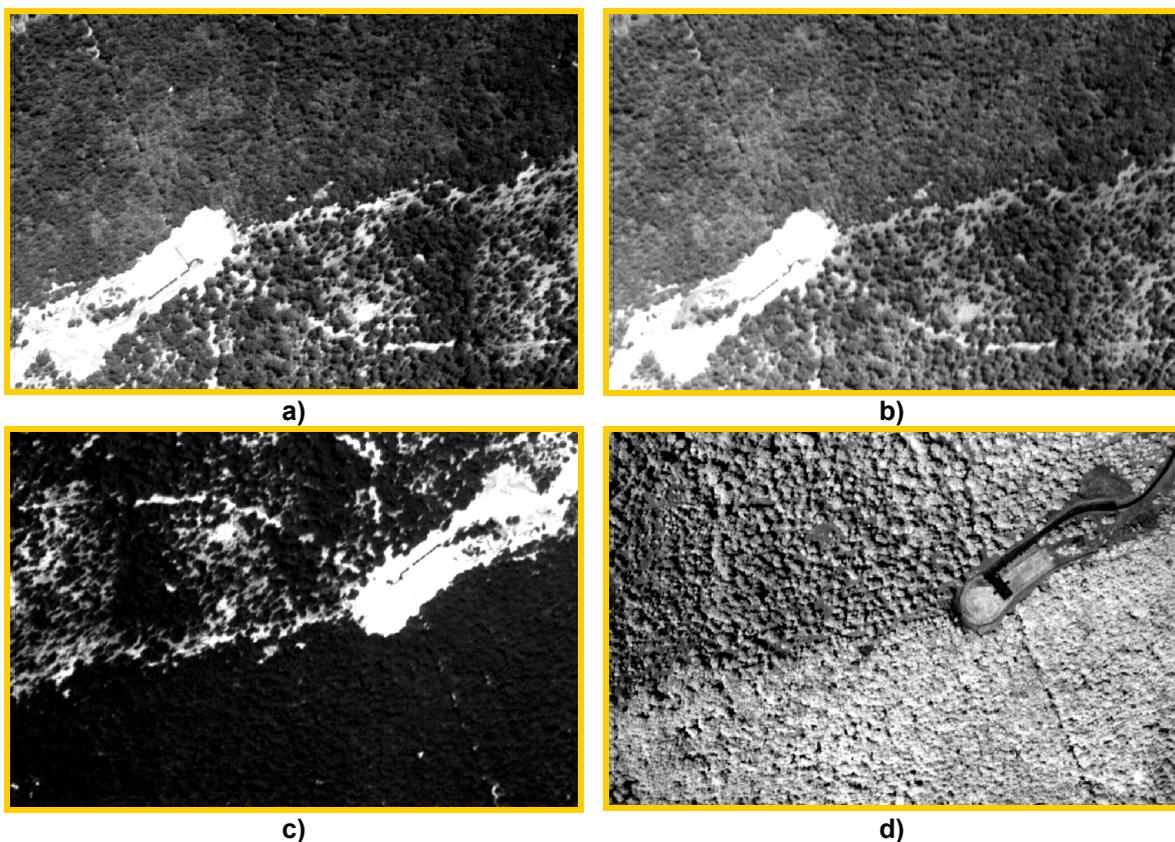


Figura 6.8 – Immagine dell'area boschiva di Pantano acquisita mediante sistema ASPIS: a) banda a 700 nm; b) banda a 550 nm; c) banda a 680 nm; d) banda a 780 nm

¹ 1 nodo = 1,85 km/h.

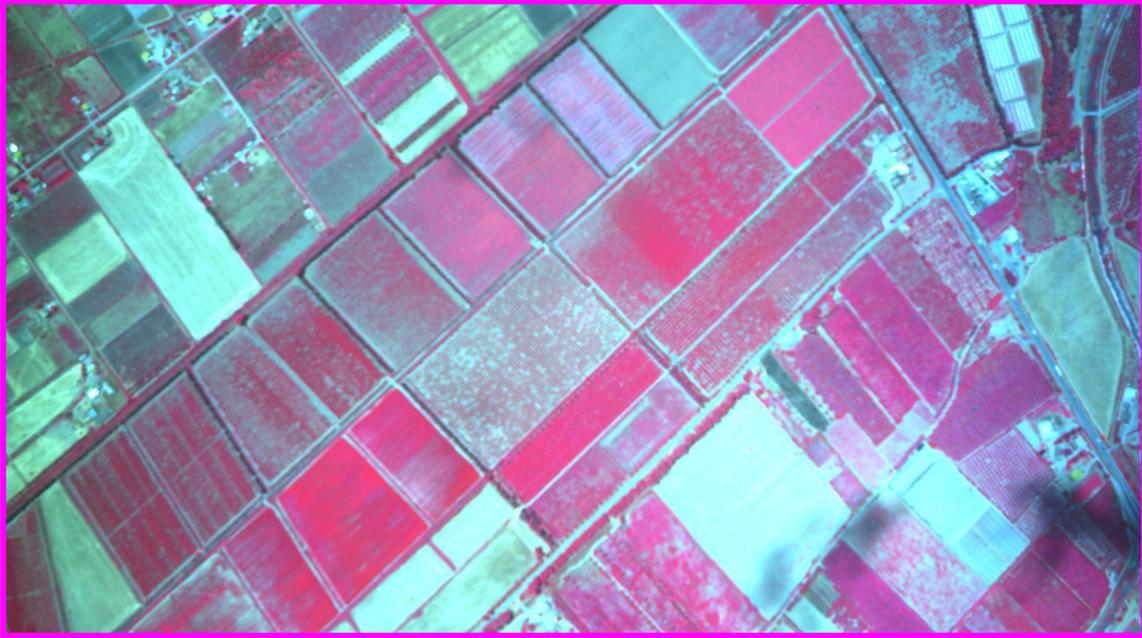


Figura 6.9 – Esempio di immagine multispettrale acquisita mediante camera Duncan. L'immagine a falsi colori (NIR, Green, Red) non è georiferita

In Figura 6.9 è riportato un esempio di immagine Duncan a falsi colori acquisita nel 2004 con risoluzione inferiore ad 1 m.

Per i rilievi nelle aree di Manfredonia e Foggia, in Puglia, i due voli sono stati effettuati in data 27 e 28 aprile 2005 e sono stati finalizzati all'acquisizione di immagini digitali mediante i sistemi ASPIS e DFR, di cui si riportano i piani di volo in Figura 6.10.

I rilievi del 2005 comprendono:

- 889 immagini (ovvero 3556 file) acquisite mediante il sistema ASPIS sull'area di Manfredonia, di cui 321 acquisite nella configurazione RE e 568 in quella NDVI; in particolare 25 immagini costituiscono riprese dell'area costiera utilizzate successivamente per la calibrazione radiometrica e le correzioni atmosferiche;
- 518 immagini ASPIS (corrispondenti a 2072 file) sull'area di Foggia, di cui 260 nella configurazione RE e 258 in quella NDVI;
- 2660 immagini acquisite con sistema DFR, di cui 748 immagini multispettrali acquisite con il sensore Duncan a tre bande (rosso, infrarosso e verde) nell'area di Manfredonia, 393 con il sensore Duncan a tre bande nell'area di Foggia;
- 1152 immagini acquisite mediante la camera termica Flir nelle due aree complessivamente.

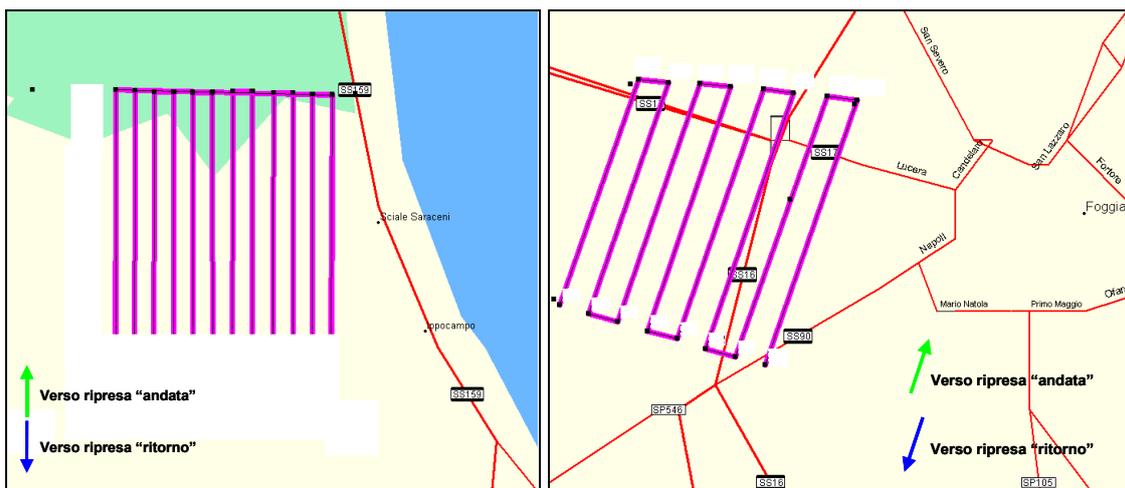


Figura 6.10 – Piani di volo: a sinistra Manfredonia, 27 aprile 2005; a destra Foggia, 28 aprile 2005

In Tabella 6.2 sono riportati i dati geometrici dell'acquisizione effettuata mediante i sistemi ASPIS e DFR nel 2005 sulle aree Pugliesi.

Tabella 6.2 – a) Quota di volo, altezza di volo, risoluzione geometrica per dati ASPIS e DFR. b) Lunghezza focale e dimensione del pixel dei sistemi DFR e ASPIS. c) Quota media s.l.m. delle aree di studio

Sistema	Area di studio	Data di acquisizione	Quota di volo	Quota di volo	Altezza di volo	Risoluzione geometrica
			ft slm	m slm	m	m
DFR	Manfredonia	27/04/2005	5500	1676,4	1674,4	0,89
DFR	Foggia	27/04/2005	5500	1676,4	1596,4	0,84
ASPIS	Manfredonia	27/04/2005	4500	1371,6	1369,6	1,03
ASPIS	Foggia	27/04/2005	4500	1371,6	1291,6	0,97
ASPIS	Foggia	28/04/2005	4500	1371,6	1291,6	0,97

a)

Sistema di acquisizione	Lunghezza focale	dimensione pixel
	mm	micron
DFR	14	7,4
ASPIS	12	9

b)

Area studio	Quota media
	m slm
Manfredonia	2,0
Foggia	80,0

c)

6.3 Elaborazione dei dati misurati in campo

6.3.1 Lo spettroradiometro ASD

Lo spettroradiometro è uno strumento portatile in grado di misurare in modo passivo la radianza/riflettanza in strettissime bande spettrali (1, 2 nm), su uno spettro ampio, includente i range del visibile, NIR e talvolta anche SWIR. Ad ogni oggetto ripreso è possibile così associare uno spettro quasi continuo (firma iperspettrale) che può essere usato per caratterizzare efficacemente le risposte spettrali delle varie coperture della superficie terrestre, in particolare la vegetazione.

Le ragioni legate all'utilizzo di misure spettroradiometriche in campo sono molteplici. Considerando l'impiego di bande strette (1-3 nm) e l'ampio range spettrale disponibile, la spettroscopia in campo è utilizzata come strumento per valutare *a priori* – escludendo gli effetti atmosferici – se ed in che misura un certo oggetto o processo possa essere rilevato ed indagato attraverso il *Remote Sensing* satellitare e/o aereo, per individuare le bande spettrali e le loro combinazioni più sensibili, le risoluzioni radiometriche/geometriche necessarie, al fine di supportare la definizione di specifiche per eventuali nuovi sensori.

Ulteriori applicazioni correnti riguardano la calibrazione di sensori aviotrasportati o montati su satellite e lo sviluppo di metodologie di analisi di dati telerilevati. Per esempio, i valori misurati a terra utilizzando l'illuminazione solare incidente su target sufficientemente omogenei alla scala dell'immagine telerilevata, possono essere utilizzati per la conversione dei valori di radianza al sensore (satellitare o aereo) dell'immagine in valori di riflettanza a terra, connessi alle proprietà ottiche degli oggetti legate ai parametri biofisici da stimare ed indipendenti dall'illuminazione solare e dall'atmosfera. Tenendo conto di ciò nel progetto si è deciso di acquisire uno spettroradiometro portatile da impiegare per le attività di misura in campo.

In una preliminare analisi dei prodotti simili sul mercato che potessero soddisfare le esigenze suddette, sono stati considerati i seguenti apparati: ASD FieldSpec Pro FR della Analytical Spectral Device Inc., Boulder (CO) USA, GER 1500/3700 della GER Corp., Millbrook (NY) USA, e LICOR 1800 della LICOR-biosciences Nebraska 68504-USA.

Alla fine la scelta è caduta sul ASD FieldSpec Pro, in considerazione delle ottime prestazioni in termini di sensibilità, velocità, ripetibilità, intervallo di acquisizione (350-2500 nanometri) e flessibilità operativa, ma anche in considerazione della possibilità di supporto alla manutenzione e di *upgrade*, che permette di soddisfare richieste operative mutevoli nel corso del tempo. La notevole efficienza operativa dello strumento, ottenuta con l'utilizzo di 3 differenti sistemi di rilevazione rispettivamente per il range del visibile e vicino infrarosso VNIR (350-1000 nm), del primo infrarosso intermedio SWIR1 (1000-1800 nm) e del secondo infrarosso intermedio SWIR2 (1800-2500 nm), lo mette in grado di acquisire un intero spettro in 0,1 secondi. La differente sensibilità dei rilevatori (fotodiodi per il VNIR e differenti dispositivi GaAs per SWIR1/2) agli estremi dei suddetti intervalli spettrali, fa sì che in corrispondenza di queste lunghezze d'onda si abbiano spesso dei fuori scala con dati inaffidabili. Il FOV nella configurazione standard è di 25 gradi, corrispondente ad un'area sottesa minore di 0,5 m² a distanza di circa 1,5 metri dal suolo, ma si possono montare ottiche accessorie con FOV sino ad 1 grado.

In questo lavoro l'utilizzo dello strumento, in particolare, è stato finalizzato all'esecuzione di misure in campo sulla vegetazione. Sono state analizzate aree coltivate dove sono in corso processi di salinizzazione dei suoli, e possibilità di stress idrico derivante da insufficiente irrigazione, allo scopo di identificare le bande spettrali significative per l'identificazione e monitoraggio di questi fenomeni. L'attenzione verso questo tipo di degrado dei suoli deriva dalla constatazione che esso sia un fenomeno in crescita, soprattutto nelle pianure costiere del sud Italia, laddove la scarsità della risorsa idrica spinge gli agricoltori da una parte ad emungere a profondità sempre maggiori le acque di falda con abbassamento di quest'ultima e conseguente intrusione del cuneo salino e dall'altra ad irrigare con acque di qualità sempre peggiori (più salate).

Nel seguito sono descritte le procedure messe a punto ed i risultati conseguiti elaborando i dati dei parametri biofisici di coltivazioni, in particolare della conducibilità di terreni coltivati a cereali (grano ed orzo), del contenuto idrico fogliare sotto forma degli indici RWC ed FMC di cerealicoli e frutteti, unitamente ai relativi dati radiometrici costituiti dalle firme iperspettrali acquisite tramite radiometro portatile ASD FieldSpecPro.

6.3.2 Parametri biofisici e firme iperspettrali

Nel maggio 2004 sono state effettuate misure di riflettanza tramite ASD FieldSpecPro su grano duro nella zona pugliese attorno il lago di Lesina, su punti in corrispondenza dei quali in precedenza erano state acquisite misure di conducibilità elettrica specifica (riportata in $\mu\text{s/m}$ nei grafici di Figura 6.11) di campioni di suolo legata al loro contenuto salino (salinizzazione).

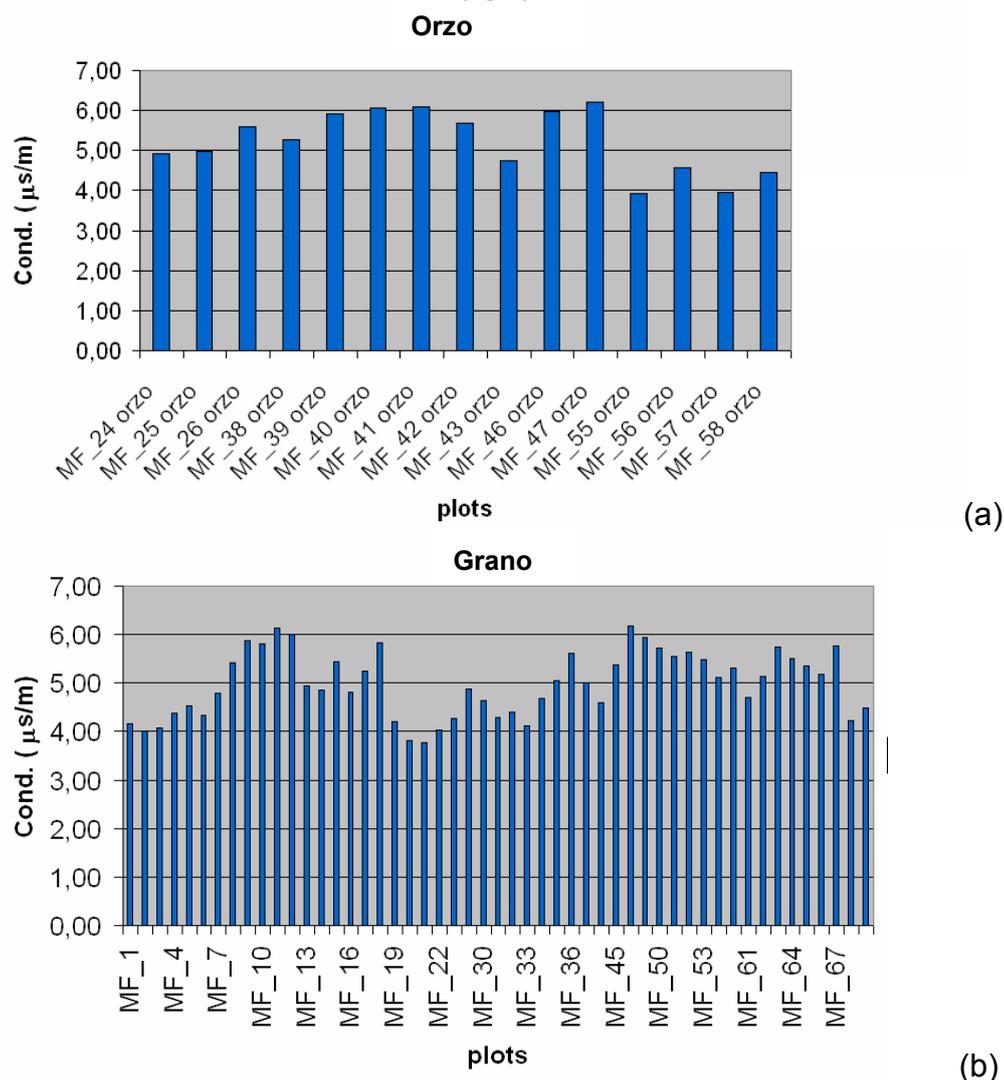


Figura 6.11 – Misure di conducibilità dei suoli da campioni acquisiti nel aprile 2005 su colture cerealicole (orzo e grano) in Puglia (Manfredonia)

Per i rilievi spettrali è stata effettuata una selezione a vista dei campioni da un agronomo esperto delle colture della zona, in modo da considerare piantagioni di grano omogenee dal punto di vista delle *cultivar*, della pratica agricola e dello stadio di sviluppo.

In Figura 6.12 sono riportati a titolo d'esempio i rilievi della riflettanza su un punto (plot) di piantagione di grano. Per la caratterizzazione, sono stati effettuati vari rilievi nadirali nell'intorno del punto (1-2 m), in aggiunta sono stati effettuati rilievi sul suolo sottostante sia in ombra che illuminato.

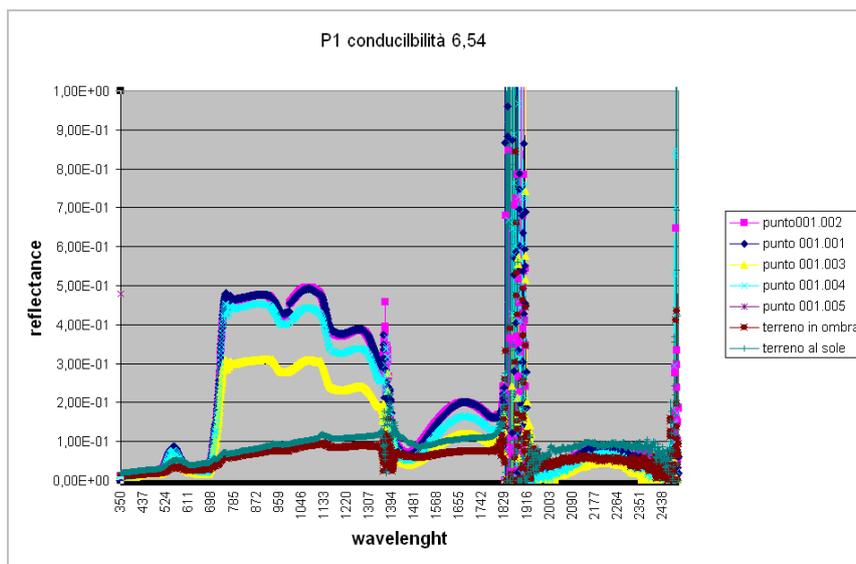


Figura 6.12 – Rilievo della riflettanza su grano duro

La Figura 6.13 invece mostra alcune firme spettrali acquisite su grano in suoli a diversa conducibilità.

Dai grafici (Figura 6.12 e 6.13) si nota la tipica firma spettrale della vegetazione con variazioni evidenti nei range del verde (575 nm), del NIR e dell'inizio del SWIR (da 680 a 1450 nm) e minori nelle lunghezze d'onda maggiori del SWIR (da 2000 a 2500 nm); gli andamenti fuori range (>1) della riflettanza in corrispondenza dei valori di lunghezze d'onda di circa 1350, 1850 e 2500 nm si riferiscono, come detto in

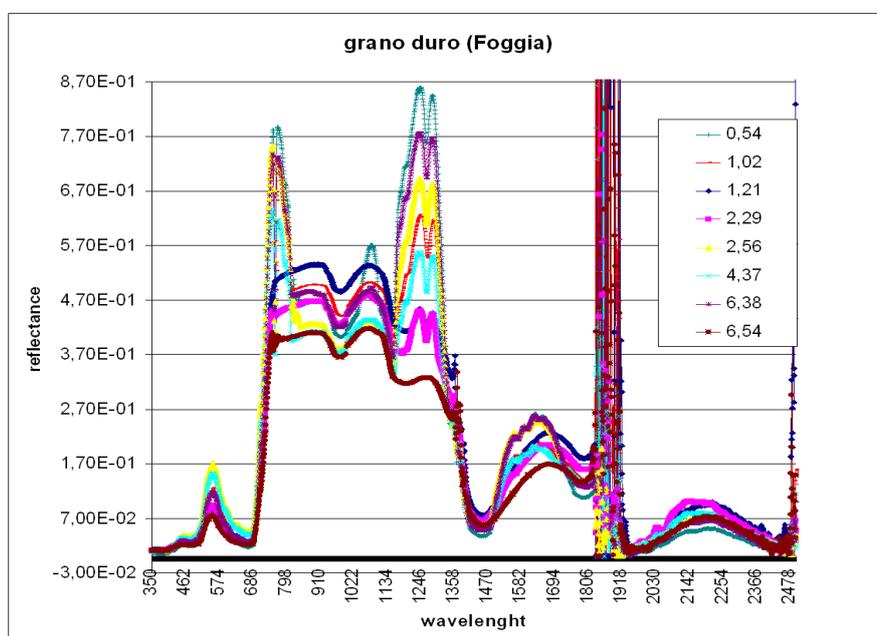


Figura 6.13 - Riflettanza grano duro su suoli a diversa conducibilità

precedenza, ad intervalli non affidabili corrispondenti alle zone di transizione tra un sensore e l'altro dello strumento.

Ovviamente tali variazioni sono complessivamente dovute a fattori diversi; il nostro obiettivo è d'individuare le variazioni di riflettanza connesse alla differente salinità dei suoli qui definita tramite la conducibilità elettrica. A tale scopo per la valutazione della sensibilità delle varie frequenze disponibili utilizzate, è stata calcolata la correlazione tra i valori di conducibilità ed i corrispondenti di riflettanza (nelle varie lunghezze d'onda), sulla base di un modello lineare.

La Figura 6.14 riporta l'andamento della correlazione, in termini del coefficiente R^2 , tra i valori della conducibilità del suolo e della relativa riflettanza. Escludendo i range d'inaffidabilità dei dati (~1370 e 1800 nm) si nota che valori di correlazione superiori a 0,3 si raggiungono in vari intervalli spettrali: 760-765 nm, 820-825 nm, 1075-1100 nm, 1155-1160 nm, 1330-1340 nm.

Tali variazioni risultano alla portata di un sensore aviotrasportato dalle caratteristiche spettrali simili a quelle dell'ASPIS (descritto nel capitolo seguente), con larghezza di banda di circa 10 nm, mentre sono difficilmente rivelabili dai sistemi satellitari multispettrali a media-alta risoluzione (geometrica) utilizzati per il monitoraggio terrestre (SPOT, Landsat, Ikonos) aventi larghezza (risoluzione) spettrale delle bande di 50-100 nm.

Spesso al fine di minimizzare gli effetti di rumore introdotti dall'atmosfera e dalla topografia, i dati di riflettanza acquisiti dai sensori per telerilevamento, dopo il preprocessing, sono combinati sotto forma di indici spettrali consistenti in varie espressioni algebriche dei valori di riflettanza di due o più bande, frequentemente sotto forma di rapporti [1]. In quest'ottica quindi, successivamente, è stata calcolata la correlazione (R ed R^2) tra la conducibilità elettrica (salinizzazione) misurata nei vari punti e le relative combinazioni dei valori di riflettanza nelle 2 bande sotto forma di rapporto (B_n/B_m) e rapporto normalizzato $((B_n-B_m)/(B_n+B_m))$.

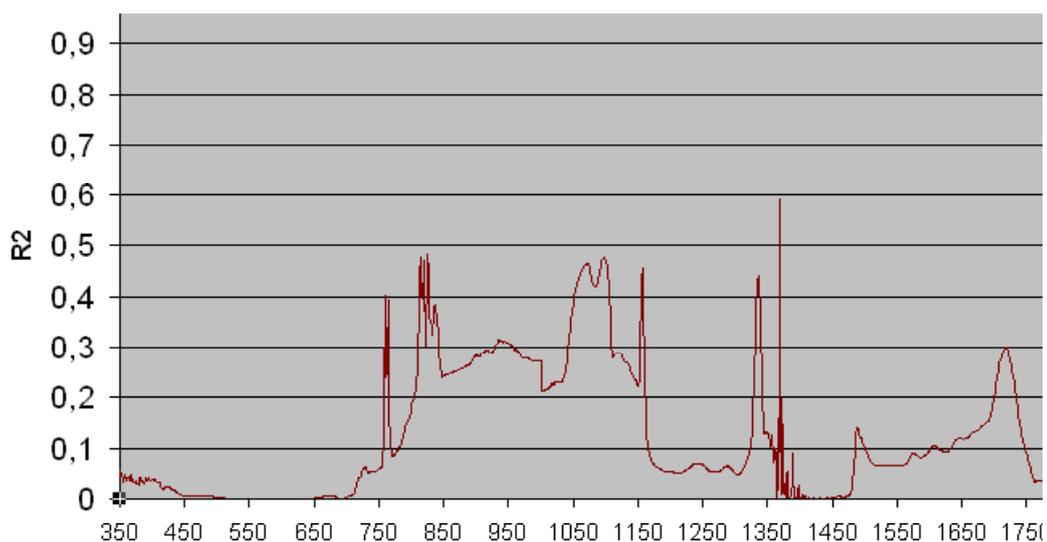


Figura 6.14 - Andamento della correlazione (R^2) tra riflettanza ($\rho(\lambda)$) e conducibilità ($\mu\text{s/cm}$) in funzione della lunghezza d'onda (λ) in nanometri (nm)

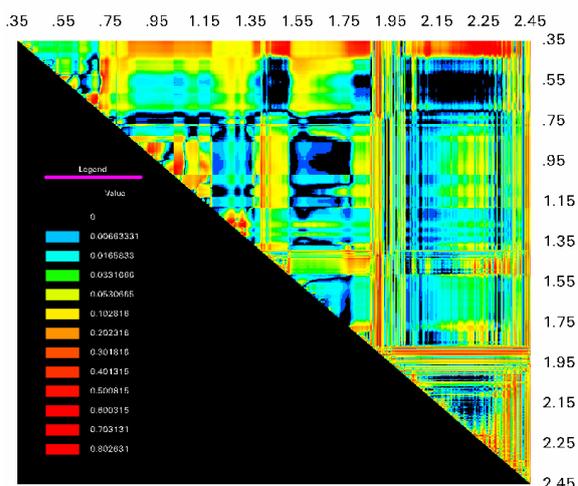


Figura 6.15 – Coefficiente di correlazione (R^2) tra indice spettrale ottenuto da rilievi tramite radiometro ASD Fiel-specPro su grano dell'area del lago di Lesina (Puglia) e conducibilità su suoli soggetti a salinizzazione

In Figura 6.15 è riportata la distribuzione dei valori del coefficiente di correlazione (R^2), pressoché continua, tra il rapporto della riflettanza nelle varie coppie di bande (2150^2) iperspettrali ed i corrispondenti valori di conducibilità elettrica dei suoli [2].

Poiché per R^2 la distribuzione risulta simmetrica rispetto alla diagonale sono riportate solo le parti superiori delle matrici sotto forma di mappe tematiche in cui i colori più tendenti al rosso indicano i massimi mentre quelli tendenti al blu i minimi.

Si ottiene una distribuzione notevolmente simile se si considerano i rapporti normalizzati di bande. Per queste combinazioni di 2 bande sotto forma di rapporti aumentano i valori assoluti della correlazione rispetto alle singole frequenze.

Per evidenziare meglio i range spettrali maggiormente efficaci nella rilevazione di variazioni della riflettanza del grano connesse a salinizzazione dei suoli, in Figura 6.16 è stata adottata una scala di colore che pone a blu tutti i valori minori di 0,15 in modo da far risaltare le zone di massimo locale disposte prevalentemente nella parte superiore del grafico e corrispondenti a range intorno a (1450, 400 nm), (1780, 400 nm), (2280, 400 nm) e di ampiezza 60-80 nm..

Come si nota, altri massimi locali sono disposti all'angolo in alto a sinistra del grafico, in corrispondenza dell'area del *red edge*: (720, 490 nm); e lungo la diagonale: (1030, 950 nm), (1295, 1235 nm). Da ciò appare evidente la necessità di avere bande di

acquisizione dei sensori remoti collocate nelle zone spettrali SWIR (*Short-Wave Infra Red*), Visibile (UV, Blu), "Red Edge" (720-770 nm).

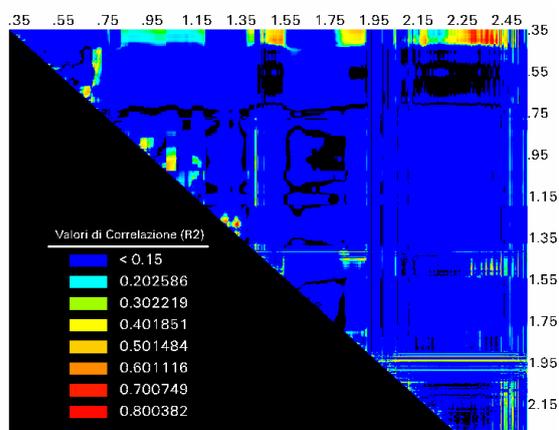
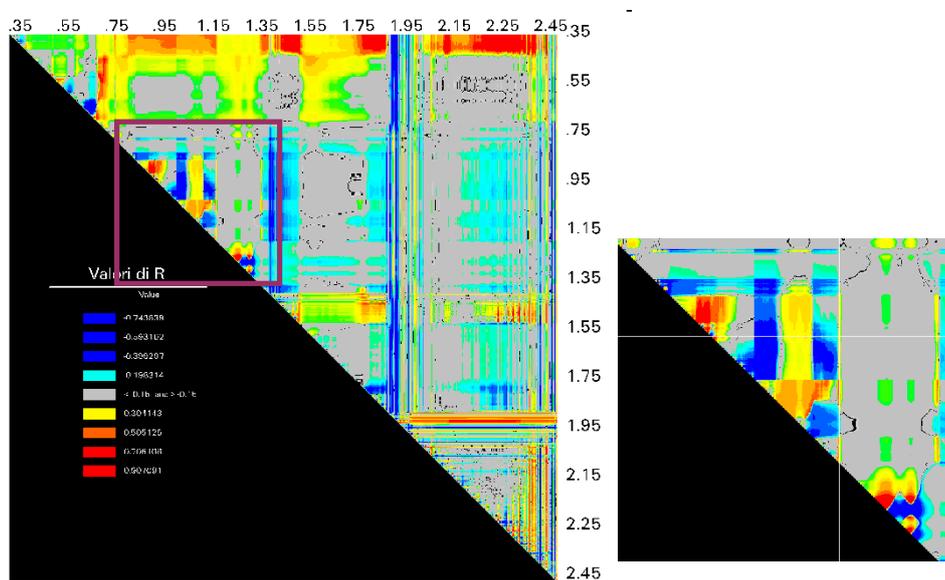


Figura 6.16 – Correlazione (R^2) tra il rapporto dei valori di riflettanza in diverse bande spettrali rilevate su grano e conducibilità dei suoli

In Figura 6.17 è riportata invece la distribuzione della correlazione tra rapporti normalizzati (tra i più noti in letteratura sono ad es. NDVI, NDWI) e conducibilità dei suoli, sotto forma del coefficiente R, il quale, a differenza di R^2 , presenta valori negativi utili per migliorare la valutazione della sensibilità ed efficacia delle varie bande nella rilevazione delle variazioni dei relativi parametri biofisici. In sostanza, con l'utilizzo del coefficiente di correlazione R è possibile la discriminazione di cambiamenti di segno nella correlazione come mostra il riquadro di Figura 6.17, dove al centro si evidenziano delle bande verticali di larghezza di circa 30 nm che possono sfuggire all'analisi basata su R^2 . Tuttavia ampiezze di banda di tale dimensione risultano poco risolvibili da sensori satellitari standard. Più in basso, sempre nel riquadro di Figura 6.17, si nota invece una struttura con dettagli di scala maggiore che necessiterebbe di maggiore risoluzione spettrale per essere adeguatamente sfruttata.

Infine, i risultati indicano che rispetto alla stima tramite rapporti semplici (Figura 6.16), la normalizzazione non introduce cambiamenti significativi nella distribuzione di sensibilità spettrale delle coppie di bande (Figura 6.17).

Occorre sottolineare che le firme iperspettrali dei cereali sono state acquisite a distanza di 1,5 m. dalla superficie della piantagione in geometria nadirale e quindi risentono della struttura tridimensionale della stessa e dei suoi parametri geometrici (LAI, LAD, copertura). A differenza di quelle sul grano, le misure radiometriche sui frutteti delle aree campione della costa ionica della Basilicata sono state acquisite in modo nadirale su campioni di foglie (5-6 prelevati in varie posizioni della chioma) al fine di escludere, in prima istanza, i possibili effetti sul segnale elettromagnetico rilevato dovuti all'architettura ed alla densità della *canopy*, da considerare successivamente [3].



**Figura 6.17 – Correlazione (R) tra rapporto normalizzato di valori di riflettanza in diverse bande spettrali rilevate su grano e conducibilità dei suoli.
A destra particolare in riquadro**

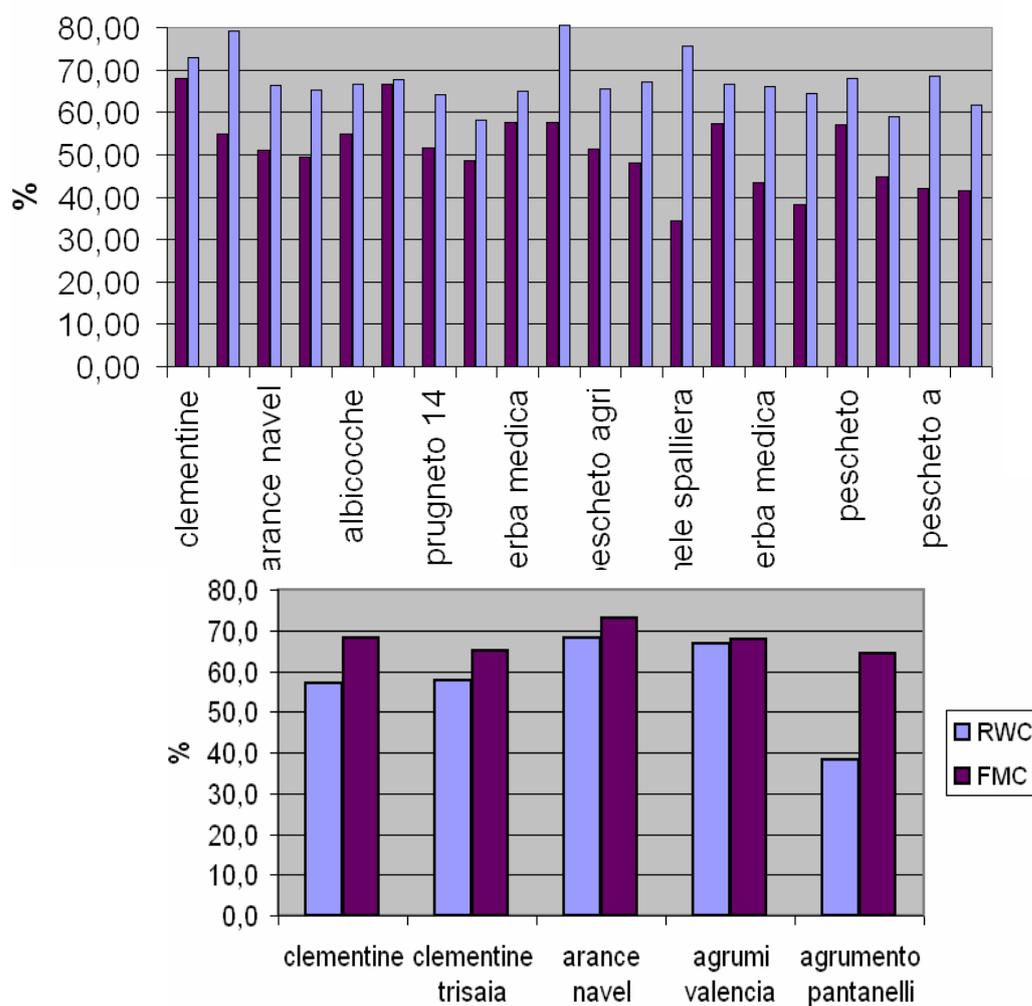


Figura 6.18 - Stime di RWC ed FMC da misure acquisite nel luglio 2004 su fruttiferi della costa Ionica (in alto) e sui soli agrumeti (in basso)

Nella Figura 6.18 vengono riportati i dati relativi agli indici RWC ed FMC di contenuto idrico fogliare derivati dai prelievi effettuati nell'estate 2004, acquisiti in contemporanea ai rilievi iperspettrali a terra e multispettrali aerei tramite sensore ASPIS.

Nella Figura 6.19 è riportato un esempio dei rilievi ASD effettuati sugli stessi frutteti. Insieme alle firme iperspettrali della vegetazione sono state acquisite quelle del terreno nudo intorno (secco e bagnato) unitamente all'eventuale tappeto erboso (interfilare). In tal modo sono stati acquisiti dati georiferiti iperspettrali relativi a vari pescheti ed agrumeti unitamente ad altri fruttiferi (loti, meli, albicocchi) e foraggi (mais, erba medica) con l'obiettivo sia di caratterizzare le varie colture che di valutare la sensibilità al contenuto idrico fogliare correlato ad eventuali stress connessi alla disponibilità d'acqua.

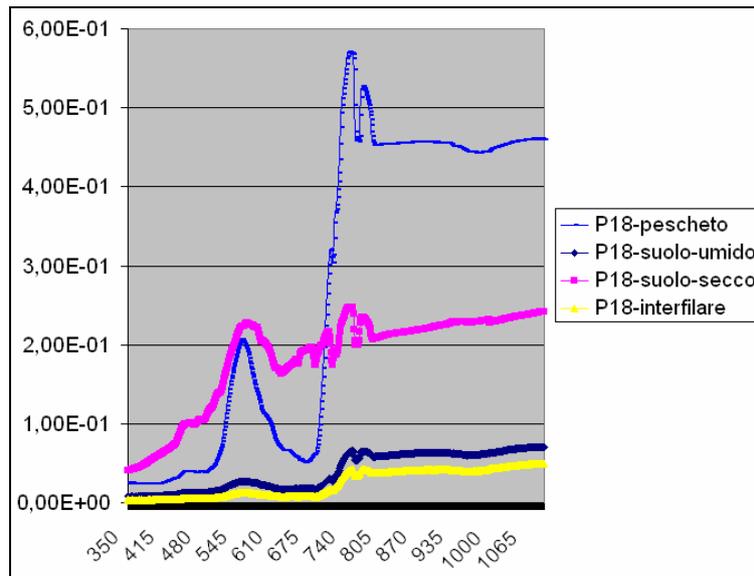


Figura 6.19 – Misure di firme iperspettrali su fruttiferi e terreno sottostante

I grafici di Figura 6.20 evidenziano aree di notevole variazione della riflettanza in corrispondenza delle frequenze nel verde, *Red Edge* (Figura 6.20 (b)), NIR e soprattutto SWIR dove si collocano principalmente le bande di assorbimento dell'H₂O. Si nota altresì la differenza nell'andamento della riflettanza relativa alle diverse specie coltivate. Come già detto tali variazioni possono derivare da una quantità di fattori che influenzano le proprietà ottiche del fogliame, per cui è necessario evidenziare quelle più direttamente connesse ai parametri d'interesse, in questo caso il contenuto d'acqua fogliare.

In quest'ottica sono stati utilizzati i valori di RWC e FMC rilevati dal fogliame del quale era stata acquisita la relativa firma iperspettrale per valutare il livello di correlazione tra i valori di riflettanza su tutto lo spettro acquisito e tali parametri.

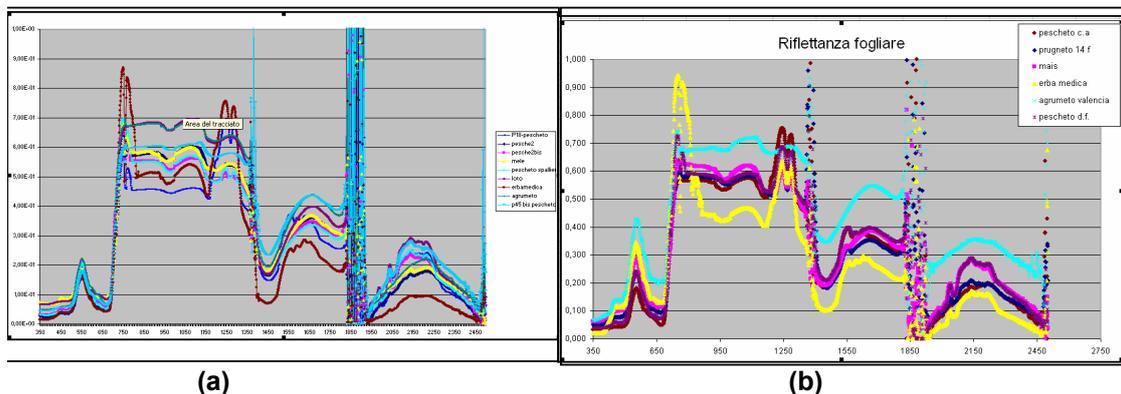


Figura 6.20 – Firme iperspettrali relative a varie colture acquisite nel luglio 2004 nell'area di Policoro (MT)

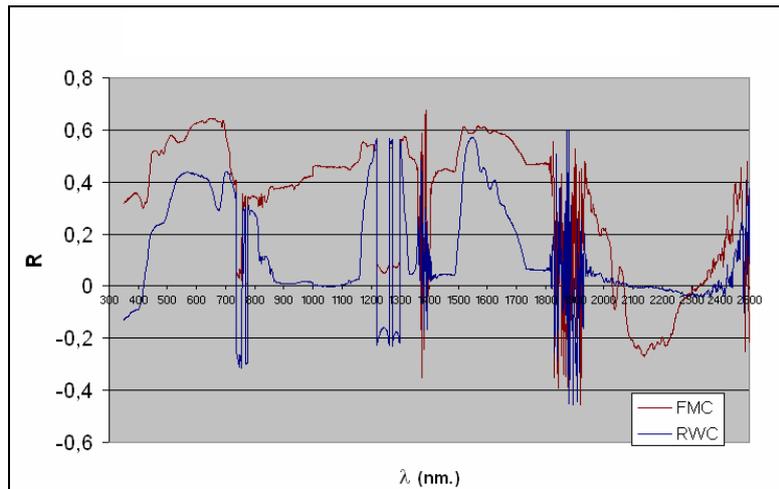


Figura 6.21 – Correlazione (R), tra riflettanza di foglie di fruttiferi e contenuto d'acqua (RWC-FMC)

Come in precedenza per la salinizzazione, sono stati considerati sia i singoli valori rilevati con lo spettroradiometro che le possibili combinazioni sotto forma di indici spettrali (rapporti tra bande o rapporti normalizzati).

Nelle immagini riportate in Figura 6.21, 6.22 e 6.23 è visualizzata la distribuzione del coefficiente di correlazione R calcolato tra i singoli valori di riflettanza nelle varie bande (Figura 6.21) ed il loro rapporto (Figura 6.22, 6.23) e quelli degli indici (FMC, RWC) valutati in laboratorio sui prelievi fogliari.

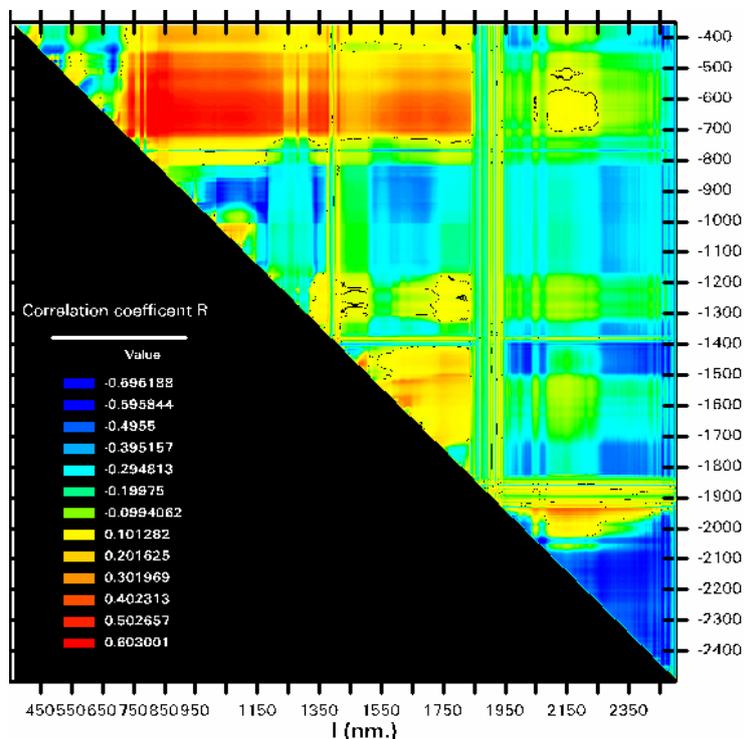


Figura 6.22 – Distribuzione della correlazione (R) tra indice spettrale (rapporto di bande) derivato da misure iperspettrali ASD e contenuto d'acqua fogliare (FMC) di frutteti

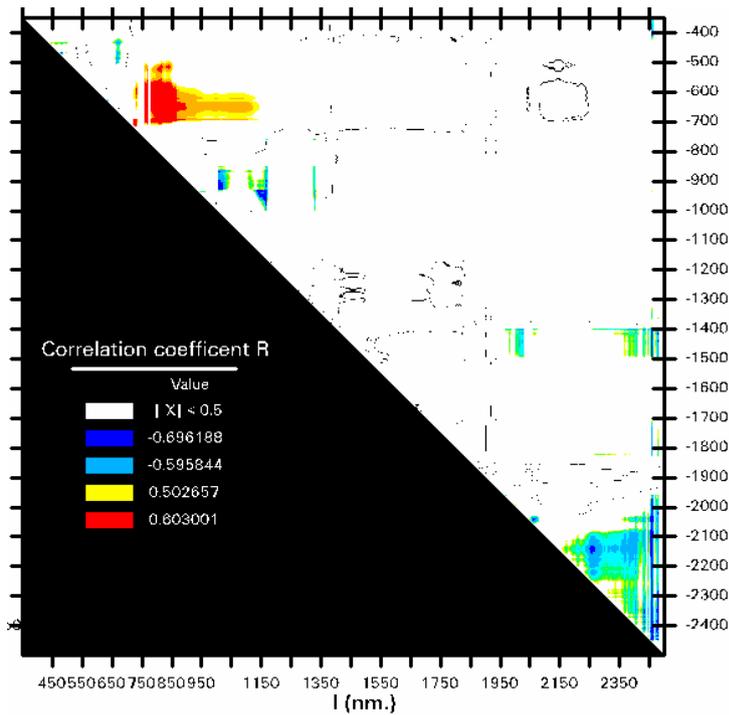


Figura 6.23 – Evidenziazione della distribuzione a fianco delle aree di massimo locale

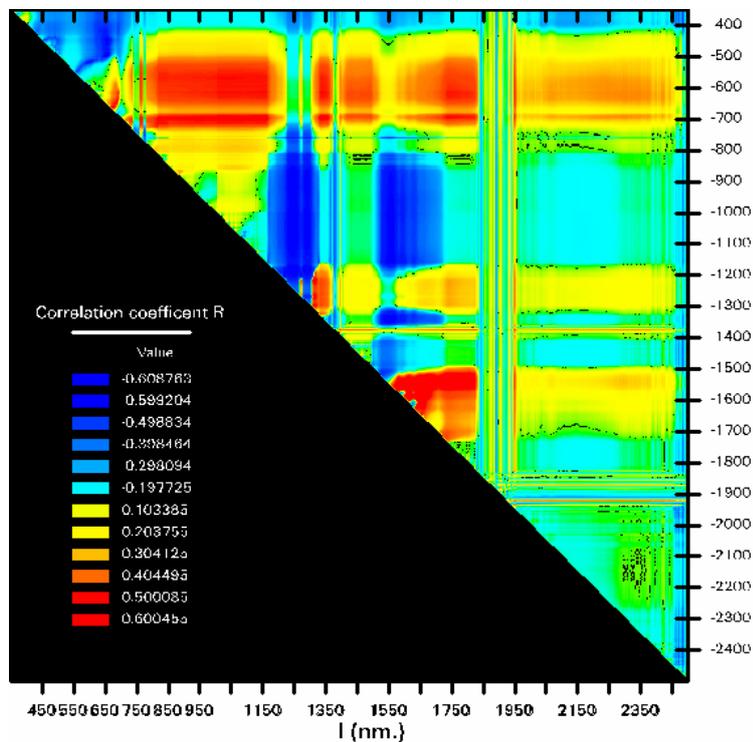


Figura 6.24 – Distribuzione della correlazione (R) tra indice spettrale (rapporto di bande) derivato da misure iperspettrali ASD e contenuto d'acqua fogliare (RWC) di frutteti

I valori massimi assoluti di R calcolati per l'FMC con questo set di misure si attestano intorno a 0,6-0,65 per gli indici spettrali (rapporto normalizzato o no) e risultano maggiori di quelli calcolati per l'RWC.

In Figura 6.22 si evidenzia il diverso andamento di R, con un massimo locale ampio che parte da circa 700 nm e per il numeratore si estende sino al SWIR a circa 1800 nm, con il denominatore limitato nella zona tra verde (500 nm) e NIR (750 nm). Valori negativi significativi di R sono localizzati intorno a 900-1000 nm ma con dimensioni inferiori ai 50 nm, e 2000-2100 nm con ampiezza maggiore.

Dalla Figura 6.23, ottenuta dalla distribuzione in Figura 6.22, selezionando solo le aree corrispondenti a valori assoluti di R maggiori di 0,5 e colorandole secondo la scala di colori riportata, si evince con maggior accuratezza la presenza del massimo nella zona del "red edge" (720-780 nm) con caratteristiche di estensione tali da poter essere utilizzato anche da un sensore su piattaforma satellitare e/o aerea.

Diversa appare la distribuzione di R per l'altro indice (RWC) di contenuto d'acqua fogliare (Figura 6.24) calcolata per lo stesso set di misure a terra. In particolare, a valori assoluti lievemente più bassi (0,6), si evidenzia lo stesso ampio massimo nel range dal "red edge" allo SWIR (1700 nm), ma con la presenza di due ampie bande verticali di massimi negativi in corrispondenza dei valori di numeratore di 1250 e 1600 nm e denominatore 800, 1200 nm, un massimo positivo a 1700 numeratore e 1600 denominatore e l'assenza del minimo a 2350 numeratore e 2200 denominatore.

In Figura 6.25 sono riportati gli andamenti della correlazione (R), tra i rilievi iperspettrali acquisiti nell'aprile 2005 su grano delle aree di Foggia e Manfredonia correlati rispettivamente con i relativi dati di contenuto d'acqua fogliare (RWC) e conducibilità ($\mu\text{s/m}$) dei suoli. Come si vede, i valori assoluti di R risultano notevolmente bassi rispetto a quelli precedenti (Figura 6.17, Figura 6.24), in connessione probabilmente alle scarse variazioni di contenuto d'acqua fogliare dovute da una parte alla stagionalità e dall'altra alle modalità di acquisizione delle firme iperspettrali, rilevate in questo caso in modo nadirale (a distanza di circa 1,5 m) sulla canopy anziché sulla singola foglia. Questo introduce effetti aggiuntivi di *noise* relativi alla geometria, architettura e copertura della piantagione.

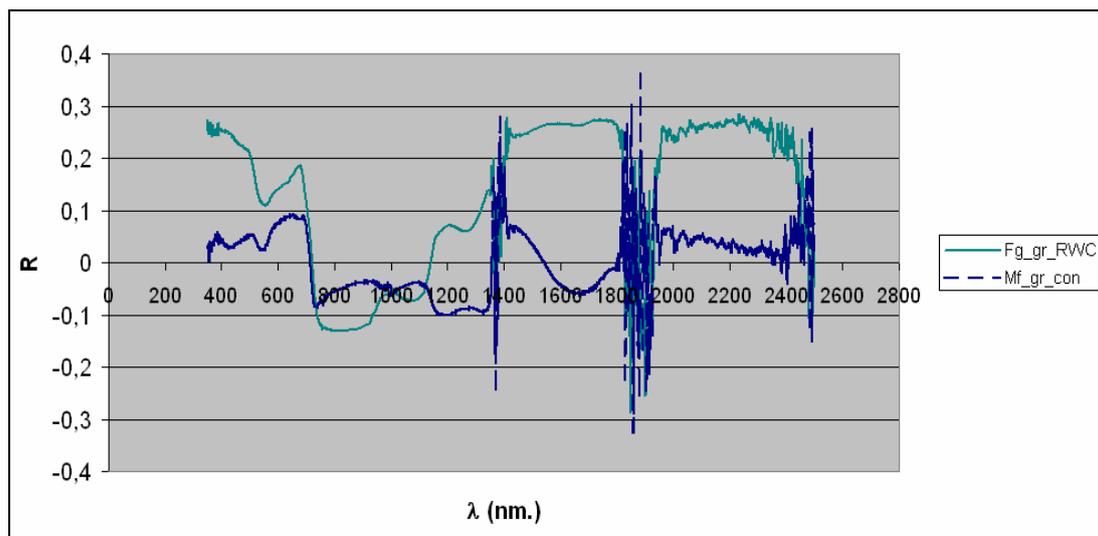


Figura 6.25 – Distribuzione della correlazione (R) tra rilievi iperspettrali ASD e parametri biofisici del grano: RWC nell'area di Foggia, conducibilità nell'area di Manfredonia

Per entrambi i parametri si rilevano massimi locali in corrispondenza del rosso (650 nm), SWIR1 (1400-1800 nm) e SWIR2 (2000-2400 nm), con valori generalmente più alti per l'RWC.

In Figura 6.26 sono riportate le distribuzioni del coefficiente di correlazione R tra il rapporto di riflettanza nelle varie bande iperspettrali dell'ASD e l'RWC del grano misurati nell'area di Foggia nel aprile 2005. I valori assoluti sono lievemente maggiori rispetto a quelli corrispondenti alle singole riflettanze (Figura 6.25).

Uno dei massimi positivi più rilevanti si attesta in corrispondenza del verde ottico (~550 nm) come numeratore e blu (~400 nm), a denominatore. I minimi più rilevanti si collocano in corrispondenza di circa 1400 e 2250 nm (numeratore).

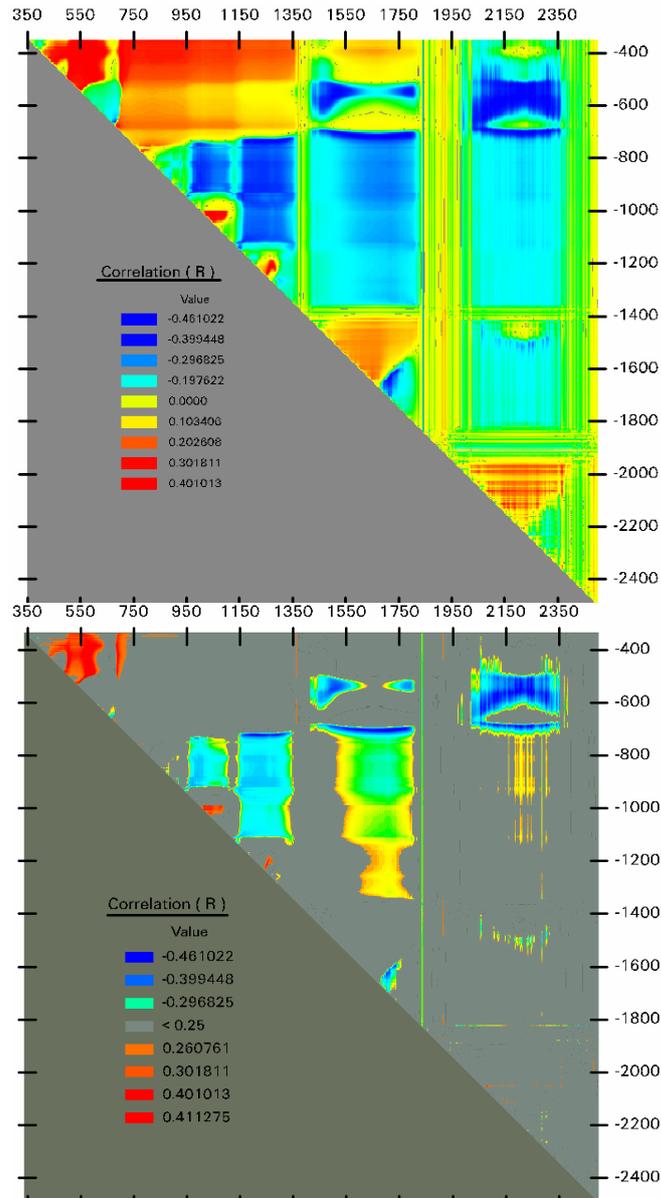


Figura 6.26 – Distribuzione della correlazione (R) tra l'indice iperspettrale (rapporto) dei rilievi ASD e parametri biofisici del grano (RWC) con dettaglio dei valori massimi

In Figura 6.27 e 6.28 sono riportate le stime di correlazione derivanti dalle misure in sito del 2005 (area di Manfredonia) diversificate per i 2 diversi tipi di cereali: grano ed orzo. La correlazione delle riflettanze nelle singole frequenze con la conducibilità (salinizzazione) si conferma notevolmente bassa (Figura 6.27), valori discretamente alti per l'orzo rispetto al grano si hanno per l'indice spettrale (rapporto) in corrispondenza dello SWIR (1100-1200 nm) (Figura 6.28) ma con bande alternate le cui dimensioni mediamente risultano minori di 100 nm.

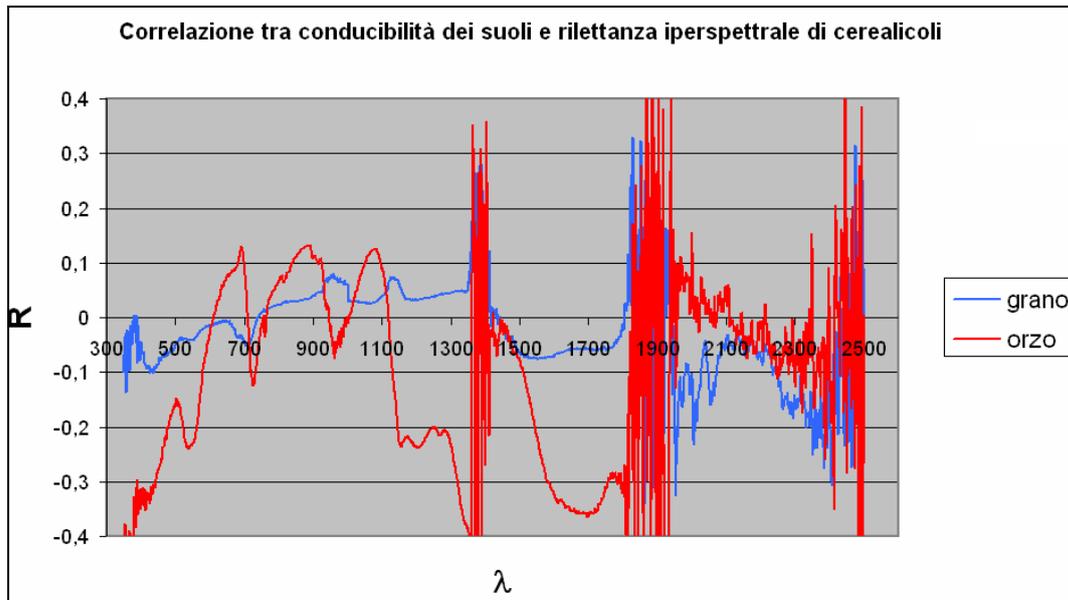


Figura 6.27 – Distribuzione della correlazione (R) tra riflettanza iperspettrale dei rilievi ASD e conducibilità dei suoli coltivati a cereali

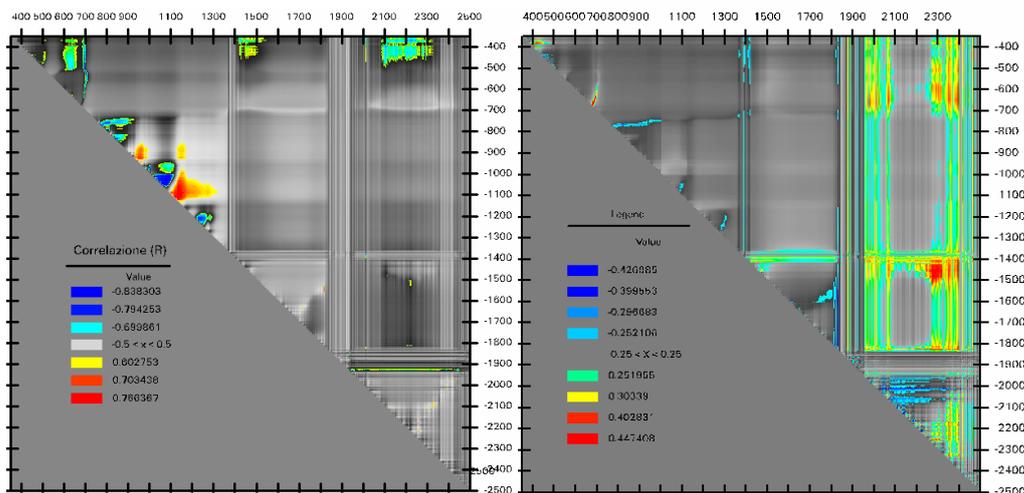


Figura 6.28 – Distribuzione della correlazione (R) tra l'indice iperspettrale (rapporto) dei rilievi ASD e conducibilità di suoli coltivati a grano (destra) e orzo (sinistra)

6.3.3 Simulazione di sensori multispettrali

Per la valutazione dell'efficienza dei sensori satellitari ed aerei utilizzati, i dati rilevati a terra tramite radiometro sono stati combinati con le curve di sensibilità corrispondenti alle varie bande di acquisizione, in modo da simulare le specifiche risposte *a terra* escludendo effetti di rumore atmosferico, disomogeneità nell'illuminazione e nella copertura ed anisotropia nella riflettanza (BRDF) delle superfici [4].

È così possibile stimare direttamente il grado di sensibilità teorico dei vari sensori, a livello della singola banda per le variazioni di riflettanza connesse ai parametri biofisici d'interesse, nel nostro caso il contenuto d'acqua sotto forma di RWC ed FMC, tenendo conto esclusivamente delle caratteristiche spettrali e minimizzando altresì le disomogeneità dell'area ripresa connessa alle dimensioni del IFOV.

Nella Figura 6.29 è mostrata la firma iperspettrale rilevata in località Policoro (MT) nel luglio 2004 e relativa ad agrumi (clementine). Nello stesso grafico sono riportate le curve di sensibilità relative al sensore TM (Thematic Mapper) a bordo dei satelliti Landsat.

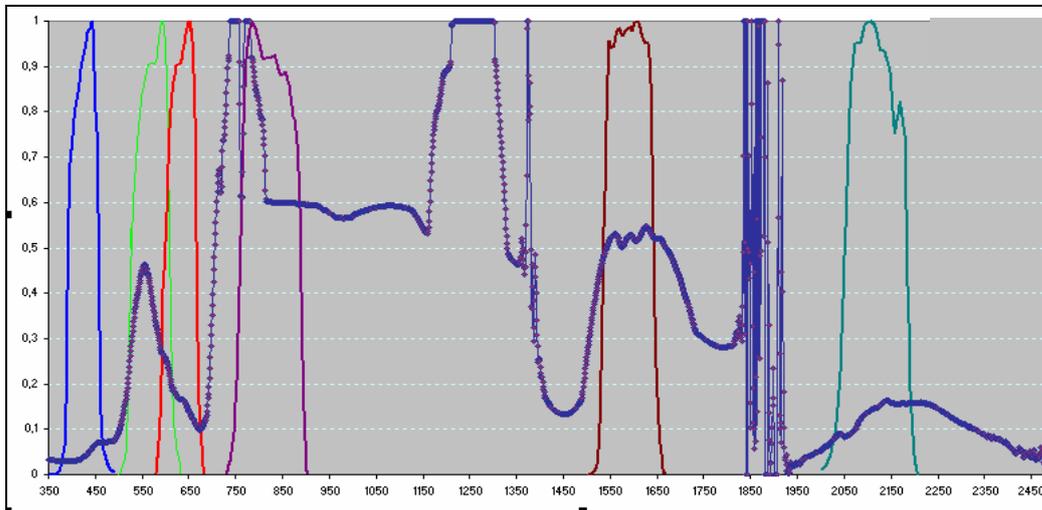


Fig. 6.29 – Firme iperspettrali di agrumeti e bande Landsat TM

Utilizzando tali curve di sensibilità come funzione peso è stata calcolata la riflettanza simulata *a terra* relativa alle varie bande dei sensori d'interesse a partire da quella iperspettrale rilevata a terra tramite spettroradiometro, mediante la formula:

$$\rho_i = \sum_j c_j \rho_j / \sum_j c_j$$

dove ρ_i denota la riflettanza corrispondente alla generica banda i di acquisizione, larga tipicamente (50-100 nm) ed impiegata dai sensori multispettrali satellitari, c_j è il valore della curva di sensibilità spettrale alla frequenza j associata ai filtri e ρ_j il valore rilevato a terra dal radiometro su intervalli di 1 nm; la sommatoria si intende estesa a tutte le lunghezze d'onda contenute nella banda simulata.

In tal modo, premessa la presenza di effetti sulla riflettanza spettrale di variazioni del parametro biofisico d'interesse rilevabili a partire dall'analisi delle curve rilevate a terra

tramite spettroradiometro, è possibile verificare preventivamente l'efficacia di sensori remoti, tenendo conto esclusivamente delle loro caratteristiche spettrali in termini di distribuzione e risoluzione (ampiezza) delle bande di acquisizione ed escludendo effetti di rumore introdotti dall'atmosfera, dalla topografia e dal comportamento anisotropico delle superfici riflettenti. Se le misurazioni a terra sono effettuate esclusivamente sulle foglie prelevate ed in geometria nadirale risulta possibile escludere anche gran parte degli effetti dovuti alla geometria (*hot spot*,...) ed all'architettura della coltura vegetale (LAI, LAD,...). Nell'individuazione di variazioni di riflettanza connesse a particolari fluttuazioni di parametri biofisici della vegetazione naturale ed agricola [5], oltre alla collocazione lungo lo spettro elettromagnetico, ai fini dell'efficacia delle singole bande spettrali, sono importanti sia la loro risoluzione spettrale che quella radiometrica.

La risoluzione spettrale è legata all'ampiezza delle bande di acquisizione determinata sia dalla risoluzione geometrica (IFOV) che dalla sensibilità del sensore, mentre quella radiometrica è espressa in termini di livelli di quantizzazione, utilizzati nella conversione analogico-digitale. Sebbene sia auspicabile avere bande più strette possibile [6] al fine di poter selezionare efficacemente specifici range di assorbimento/riflessione ed il massimo numero di livelli di quantizzazione, tali parametri sono limitati dalla radianza minima che deve raggiungere il sensore e dalla sensibilità dello stesso, che per le piattaforme satellitari devono tener conto anche di una maggiore attenuazione atmosferica e del rapporto segnale/rumore.

Al fine quindi di sperimentare l'impiego di un sensore innovativo, con caratteristiche in termini di risoluzione spettrale e radiometrica più spinte rispetto a quelle dei sensori satellitari menzionati precedentemente è stato introdotto il sensore ASPIS, descritto nel capitolo successivo. Tale sensore, a caratteristiche di risoluzione spettrale (~10 nm) e radiometrica (14 bit) notevolmente migliori di quelle relative ai sistemi satellitari (70-100 nm e 8-12 bit), unisce la flessibilità ed economicità operativa basate su un velivolo ultraleggero, notevolmente efficaci per il monitoraggio della vegetazione, tenendo conto anche della sua evoluzione stagionale.

Nella Figura 6.30 sono riportate le curve di sensibilità delle bande di acquisizione del sensore ASPIS in sovrapposizione alle firme iperspettrali di alcune colture.

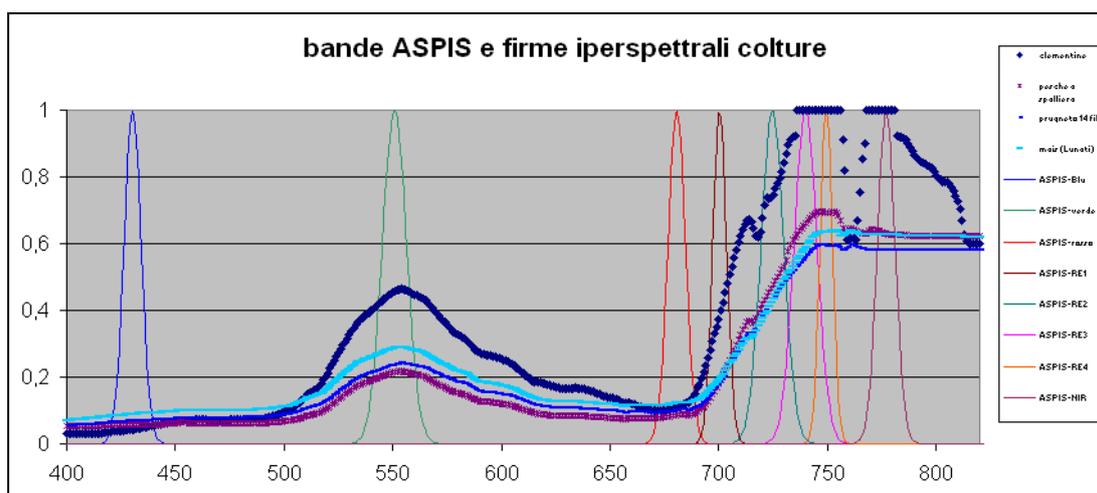


Figura 6.30 – Firme spettrali di colture e curve di sensibilità ASPIS in sovrapposizione

Si noti la risoluzione spettrale, mediamente dell'ordine di 5-10 nm unitamente alla presenza di 4 canali di acquisizione nella zona del *red edge*, da circa 720 a 770 nm, in corrispondenza della repentina crescita della riflettanza della vegetazione, notevolmente sensibile alle situazione di stress transitorio della pianta.

Nella Tabella 6.3 sono riportati i valori di correlazione tra la riflettanza simulata nelle varie bande di acquisizione dei sensori multispettrali, ottenuta come più sopra descritto da quella iperspettrale acquisita a terra tramite spettrometro, e le stime degli indici di contenuto idrico fogliare (RWC, FMC).

Tabella 6.3 – Correlazione (R^2) tra bande di sensori multispettrali simulate e indici di contenuto d'acqua fogliare (RWC,FMC) di fruttiferi

		Fruttiferi					
		Landsat TM		IKONOS		ASPIS	
		RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC
blu	TM1		0,606	IK1	0,592	ASP1	0,391
verde	TM2		0,503	IK2	0,484	ASP2	0,421
rosso	TM3		0,6	IK3	0,563	ASP3	0,628
RE1						ASP4	0,385
RE2						ASP5	
Re3						ASP6	
RE4						ASP7	
NIR	TM4			IK4		ASP8	
SWR1	TM5	0,26	0,426				
SWR2	TM7						

Le misure a terra sono stati acquisite su fruttiferi di colture della costa ionica della Basilicata nel luglio 2004. I sensori utilizzati Landsat TM, IKONOS ed ASPIS, differiscono notevolmente in termini di risoluzione geometrica, radiometrica e spettrale con la presenza di bande di acquisizione in diverse zone dello spettro (SWIR1 presente solo per TM e *red edge* solo per ASPIS che è caratterizzato anche dalla massima risoluzione spettrale e radiometrica). Come si nota la sensibilità ai due indici di contenuto idrico fogliare appare diversa, maggiore nel caso del FMC, per il quale i valori di correlazione massima si collocano in corrispondenza delle bande del blu e rosso, con un massimo sul canale ASPIS corrispondente al valore 0,628. Per la stima dell'RWC appare importante la presenza di canali di acquisizione del medio infrarosso (SWR1-TM).

Restringendo l'analisi ai fruttiferi di una sola specie ovviamente aumentano i valori di correlazione (Tabella 6.4), confermando il trend precedente con aumento dei valori di R^2 in corrispondenza del rosso e per l'RWC che, come indice, risulta maggiormente utilizzabile dell'FMC per la sua caratteristica di contenere un fattore di normalizzazione diverso per ogni specie.

In relazione all'RWC, è da sottolineare il livello della correlazione per la quasi totalità delle riflettanze ASPIS simulate (Tabella 6.4), con un massimo sul rosso, in connessione alle specifiche caratteristiche spettrali. Nella Tabella 6.5 sono riportati infine i valori di correlazione tra gli indici spettrali ottenuti dalle riflettanze simulate come detto in precedenza ed i relativi indici di contenuto idrico fogliare.

Tabella 6.4 – Correlazione (R^2) tra bande di sensori multispettrali simulate e indici di contenuto d'acqua fogliare (RWC,FMC) di agrumi

		Agrumi							
		Landsat TM		IKONOS			ASPIS		
		RWC	FMC	RWC	FMC		RWC	FMC	
blu	TM1		0,864	IK1		0,852	ASP1	0,391	0,608
verde	TM2	0,405	0,795	IK2	0,435	0,672	ASP2	0,472	0,533
rosso	TM3	0,286	0,926	IK3	0,264	0,856	ASP3	0,628	0,897
RE1							ASP4	0,332	0,49
RE2							ASP5		
Re3							ASP6	0,348	
RE4							ASP7	0,39	
NIR	TM4			IK4			ASP8	0,276	
SWR1	TM5	0,483	0,632						
SWR2	TM7								

Tabella 6.5 – Correlazione (R^2) tra indici spettrali simulati e indici di contenuto d'acqua fogliare (RWC,FMC) di agrumi

		Agrumi					
		TM		IK		ASP	
		RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC
INDICI SPETTRALI							
NDVI		0,339	0,997			0,352	0,784
NDVIB			0,908			0,221	0,379
(V-R)/(V+R)							0,38
NDVRE1							0,911
SRE1							
NIR/RED		0,497	0,965			0,215	0,821
V/B		0,471					0,584
RE4/RE1							0,862
(SWIR1-R)/(SWIR1+R)			0,531				
(SWIR1-NIR)/(SWIR1+NIR)		0,28	0,445				
(SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2)							

Dalla tabella si evidenziano una scarsa efficienza degli indici spettrali IKONOS (colonna IK) rispetto a quelli delle bande Landsat (colonna TM) ed inoltre significativi valori di R^2 in corrispondenza delle combinazioni contenenti le riflettanze collocate nel range spettrale ASPIS del *red edge* (RE_x,...), che conferma la sua importanza anche per la stima del contenuto idrico fogliare.

6.4 Elaborazione dei dati telerilevati da ASPIS

6.4.1 Il sistema

In questo capitolo si riportano i primi risultati dell'impiego del sistema aviotrasportato di telerilevamento ASPIS (*Advanced SPectroscopic Imaging System*). Il sensore ASPIS e la sua integrazione con la piattaforma e l'altra strumentazione, sono stati realizzati dal Dip. DISAFRI dell'Università degli Studi della Tuscia e dalla Terrasystem s.r.l. [7].

Il sensore è basato su 4 camere CCD sulle quali è possibile montare filtri interferenziali per ottenere immagini multispettrali con componenti selezionabili da 0,4 a 1,1 μ m, ed ampiezza di banda minore di 10 nm. La risoluzione radiometrica, notevolmente maggiore di quella dei sistemi satellitari, è di 14 bit. Il sistema ASPIS, integrato con GPS ed altra strumentazione (camera termica FLIR, sensore multispettrale RGB DUNCAN, altimetro LASER) ed installato a bordo di piattaforma ultraleggera SKY ARROW 650 TC (Figura 6.31), è dotato di caratteristiche tecniche e di flessibilità innovative che insieme alla economicità di gestione ne fanno uno strumento dalle notevoli potenzialità in molti settori applicativi.



Figura 6.31 - Velivolo ultraleggero SKY ARROW 650 TC

Nel seguito sono descritte le procedure sviluppate per il pre-processing geometrico e radiometrico dei dati acquisiti su aree d'interesse oggetto, nell'estate 2004 e primavera 2005, di campagne di misura a terra di vari parametri biofisici della vegetazione, sia naturale (macchia mediterranea, bosco igrofilo, bosco caducifoglio) che agricola (fruttiferi, cereali) impiegati nell'ambito del progetto RIADE (*Ricerca Integrata per l'Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DESertificazione*) per la calibrazione del sensore.

Per il pre-processing geometrico e radiometrico [8] dei dati acquisiti è stato diffusamente utilizzato il codice 6S (*Second Satellite Simulation code in the Solar Spectrum*) [9] per la simulazione del segnale relativo alle bande ASPIS e la correzione degli effetti atmosferici. I dati di riflettanza estratti dalle immagini multispettrali così pre-processate sono stati utilizzati nella stima di vari parametri relativi alla vegetazione semi-naturale (LAI, Leaf Area Index) ed agricola (RWC, FMC) col supporto delle misure a terra.

Il sensore ASPIS può acquisire nell'intervallo spettrale tra 0,4 a 1,1 μ m, con bande tra il rosso (~680 nm) e l'infrarosso vicino (~776 nm), nella zona del *red edge*, particolarmente indicata per evidenziare situazioni di stress idrico e patologie della vegetazione, connesse a situazioni climatiche e/o degrado dei suoli. L'impiego del sensore aviotrasportato ASPIS è stato finalizzato a testare nel contesto operativo e con le specifiche esigenze applicative una piattaforma innovativa e prototipale con ampia flessibilità sia in termini di modalità operative che di configurazione strumentale.

Nel grafico (Figura 6.32) sono riportate le curve di sensibilità dei canali di acquisizione ASPIS unitamente alle firme spettrali in termini di riflettanza acquisite nell'estate 2004 a terra, tramite ASD FieldSpecPro per suolo nudo e vegetazione erbacea.

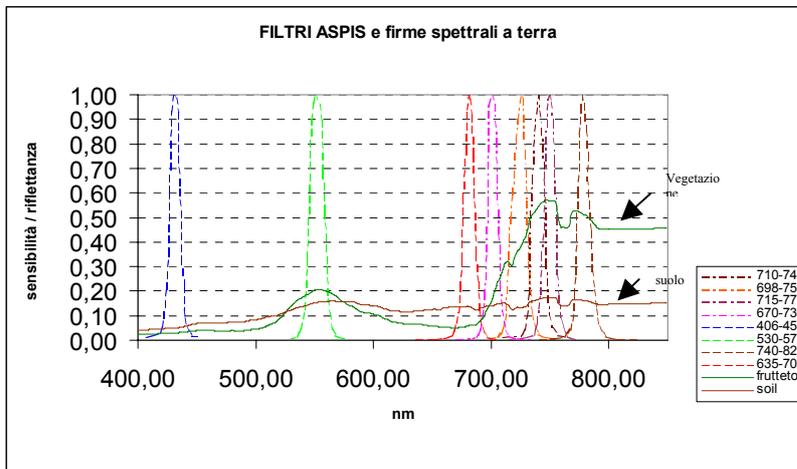


Figura 6.32 - Curve - filtro bande di acquisizione ASPIS e riflettanza a terra misurata con ASD

In considerazione della possibilità di acquisire contemporaneamente con 4 CCD, i canali di acquisizione sono stati raggruppati in due configurazioni denominate NDVI (dall'indice spettrale omonimo utilizzato successivamente) ed RE, composte rispettivamente dalle bande verde, rossa, *red edge*1 e vicino infrarosso (Green, Red, RE1, NIR) e da quelle del *red edge* (RE1, RE2, RE3, RE4).

Nella tabella successiva (Tabella 6.6) sono riportati i dati ottenuti dalle simulazioni tramite il codice 6S utilizzando le riflettanze a terra (suolo e vegetazione erbacea) misurate con lo spettrometro ASD e mediate sulle bande ASPIS. I parametri geometrici di altezza del sensore e visibilità sono stati derivati dai dati di volo e dal processo di ortocorrezione. Come si vede le simulazioni forniscono valori di radianza al sensore evidenziando vari contributi diretto (dir), dell'intorno (env) e dell'atmosfera (atm), utilizzati successivamente per la stima dei coefficienti di calibrazione.

Tabella 6.6 – Risultati della simulazione con 6S delle acquisizioni ASPIS del 15-7-04 su punti a terra di suolo visibilità 20 km (spessore ottico 0,2576 a 555 nm)

λ-cent (nm)	FWHM	band	Ground ρ	TOA L (W/m ² *μ*sr)	Ground IRR. (W/m ² *μ)			TOA Sat. RAD (W/m ² *μ*sr)		
					dir	atm	diff	Env	atm.	env.
550,79	6,51	Green	0,15	66,03	875,20	371,18	25,83	4,54	9,15	52,35
680,65	4,77	Red	0,16	54,39	766,06	272,39	15,36	2,38	5,20	46,82
700,4	3,74	RE1	0,17	52,73	708,24	247,49	14,59	2,09	4,85	45,79
724,64	6,18	RE2	0,18	46,65	595,04	203,38	12,89	1,71	4,11	40,84
739,87	6,20	RE3	0,21	60,77	662,87	223,80	16,00	1,80	5,25	53,71
749,42	3,31	RE4	0,22	66,24	685,01	229,68	16,99	1,82	5,64	58,78
777,00	4,78	NIR	0,22	63,27	648,76	213,65	15,65	1,62	5,16	56,50

6.4.2 Preprocessing

Le immagini acquisite mediante telerilevamento da aereo e da satellite necessitano di essere sottoposte a processi di elaborazione preliminari (*pre-processing*) al fine di un loro utilizzo per analisi quantitative degli oggetti ripresi. Esse infatti, solitamente, sono affette da distorsioni di tipo geometrico e da effetti indesiderati di tipo radiometrico, generati dall'influenza della geometria di osservazione/illuminazione e dallo strato di atmosfera interposto tra il sensore e la scena investigata. Le distorsioni di tipo geometrico derivano invece dalla geometria di acquisizione, dalle variazioni di assetto e velocità della piattaforma durante l'acquisizione, dalla rotazione terrestre, dalla variabilità dell'andamento altimetrico del terreno. A differenza dei sensori per telerilevamento comunemente utilizzati, ASPIS acquisisce le immagini nelle 4 bande selezionate attraverso le differenti ottiche delle relative camere CCD, con conseguenti problemi di sovrapposizione per la ricostruzione del file multispettrale. Nella Figura sono riportate ad esempio le 4 componenti spettrali grezze relative ad un'immagine acquisita nel luglio 2004 sull'area agricola nei pressi del bosco Pantano. Come si vede, le immagini differiscono oltre che per le tonalità di grigio derivanti dai diversi canali selezionati anche per caratteristiche geometriche (rotazione e copertura a terra) dovute al differente assetto delle camere CCD. Al fine di valutare i parametri angolari che definiscono tale assetto, in assenza di un sistema inerziale, si è deciso di mettere a punto una procedura di ortocorrezione con un processo di triangolazione che garantisca la sovrapposibilità delle componenti corrette unitamente alla stima dei parametri di assetto ed altitudine per le varie componenti. Considerando le 4 componenti spettrali (Figura 6.33), che presentano una sovrapposizione pressoché totale, come *frames* di un blocco

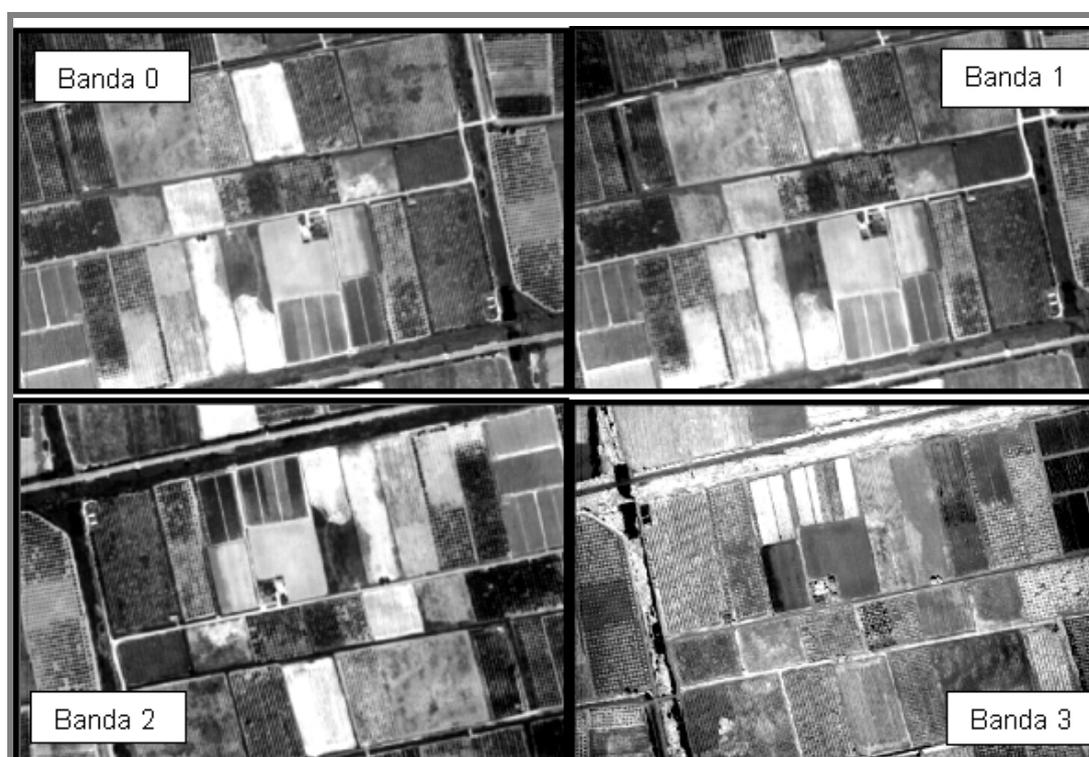


Figura 6.33 – Immagine ASPIS a 4 bande non georiferita dell'area agricola di Pantano acquisita il 13 luglio 2004. Banda 0: red edge (701 nm); banda 1: green (550 nm); banda 2: red (680 nm); banda 3: near infrared (780 nm)

di una copertura stereo, con i processi di triangolazione ed ortocorrezione [4] si rimuovono le distorsioni suddette, utilizzando una descrizione dell'orografia dell'area ripresa, ovvero un DEM (Digital Elevation Model) e punti di controllo al suolo (GCP, Ground Control Point) dalle coordinate cartografiche note. In questo modo, dopo opportuno ricampionamento si ottiene di ricollocare gli elementi della scena nella corretta posizione all'interno di ciascuna immagine indipendentemente dalla loro altimetria, con una scala costante e l'attribuzione di una proiezione cartografica opportuna.

Delle molteplici immagini acquisite nel luglio 2004 sulle aree sono state processate prioritariamente quelle nelle quali ricadevano i punti di misura a terra, ciò ha richiesto un'analisi e selezione preliminare del materiale digitale acquisito effettuate con il supporto dei dati forniti dal sistema GPS a bordo. In appendice sono riportate 2 tabelle relative alle immagini acquisite per l'area di Pantano l'una con la combinazione RE, l'altra con la NDVI. Le immagini, articolate nelle 4 componenti spettrali sono denominate con un codice a 4 cifre (colonna Immagine) e costituiscono solitamente un blocco di 4 componenti spettrali. Talvolta, per ottimizzare le operazioni di triangolazione, più immagini sovrapposte sono state raggruppate in un blocco (ad esempio le 1201 e 1202 della prima tabella).

Al fine di assicurare la compatibilità e sovrapponibilità delle immagini ASPIS ortocorrette con le altre informazioni cartografiche del progetto è stata adottata la proiezione cartografica UTM ed i relativi parametri (Sferoide: International1909, *Datum*: European1950, Zona UTM: 33 Nord).

Con un numero medio di 7 GCP per blocco opportunamente distribuiti si è pervenuti a triangolazioni soddisfacenti con RMSE (errore quadratico medio sui GCP) mediamente dell'ordine del m. Ciò è stato ottenuto utilizzando software commerciale specifico che ha permesso di tener conto anche delle distorsioni introdotte dalle ottiche delle CCD attraverso procedure sviluppate "ad hoc".

Dall'analisi dei risultati si evince che la distribuzione dei punti di controllo influenza la bontà del risultato: nelle aree agricole di Pantano, dove il riconoscimento dei punti GCP è più facile ed è possibile ottenerne una distribuzione uniforme, il RMSE è inferiore o uguale ad 1 *pixel*; nelle aree coperte da boschi i risultati della triangolazione sono peggiori a causa della distribuzione non omogenea dei punti di controllo. Miglioramenti significativi nella generazione delle orto-immagini e nella stima dei parametri di orientamento esterno (coordinate del centro di prospettiva, angoli di rotazione della piattaforma aerea) in aree "difficili" sono stati ottenuti ortocorreggendo più immagini adiacenti con differenti aree di sovrapposizione in un unico blocco. Generalmente parametri di orientamento esterno ottenuti dalla triangolazione, impiegati poi nella ricostruzione della geometria di osservazione al fine di eliminarne l'influenza sulla radiometria (BRDF), sono coerenti con la posizione delle camere digitali all'interno del sensore.

Le caratteristiche geometriche medie delle camere CCD impiegate sono state le seguenti:

- lunghezza focale: 12 mm;
- coordinate del punto principale PP: $x_0 = 0,1440$ mm, $y_0 = -0,1080$ mm;
- distorsione radiale delle lenti;
- dimensioni in direzione x e y del *pixel* del CCD: 9 μ .

Di ciascuna immagine relativa a ciascuna banda utilizzata sono stati ottenuti i parametri di assetto del volo (X_0, Y_0, Z_0 del centro di prospettiva; ω , rotazione intorno all'asse X, ϕ , rotazione intorno all'asse Y, κ , rotazione intorno all'asse Z. Tali dati sono necessari per ricostruire la geometria del processo di acquisizione delle bande delle diverse immagini.

In Figura 6.34 sono riportate alcune delle immagini ASPIS ortocorrette in sovrapposizione ad una ortoimmagine IKONOS pancromatica della stessa area (Pantano).

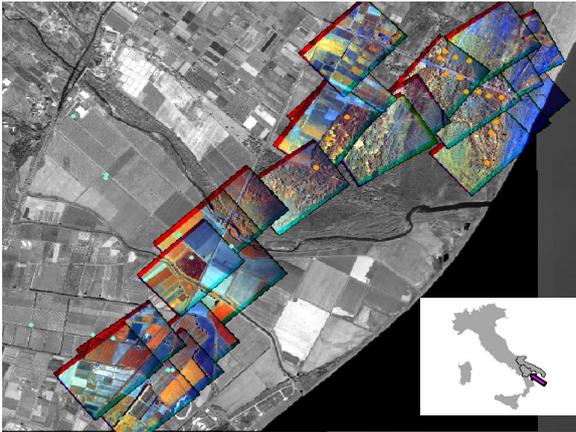


Figura 6.34 – Area Pantano. Pancromatica IKONOS in sovrapposizione a falsi colori RE -ASPIS ortocorrette e punti di misura a terra (in arancio e celeste)

Il pre-processing radiometrico delle immagini ASPIS è consistito nella calibrazione e nella attenuazione degli effetti di rumore introdotti dall'atmosfera, tramite l'utilizzo del codice di simulazione atmosferica 6S. In mancanza di coefficienti (gain ed offset) "preflight", la calibrazione delle immagini ASPIS, ovvero la stima del gain e dell'offset per la conversione dei Digital Number in radianza al sensore, ha richiesto la messa a punto di una metodologia che ha comportato anche la valutazione del contributo additivo di rumore atmosferico (path radiance) e l'utilizzo di misure di riflettanza a terra, tenendo conto degli effetti di riflettanza bidirezionale (BRDF) tipici di un sensore ad alta apertura (Field Of View, FOV, di 38°) come ASPIS. A partire dalla nota relazione che lega la radianza al sensore (TOA) al Digital Number è possibile definire un sistema di due equazioni a due incognite, da cui, noti $DN_{t\lambda}$, $DN_{p\lambda}$, $L_{t\lambda}$ e $L_{p\lambda}$ ricavare gain e offset:

$$\left. \begin{cases} L_{p\lambda} = \text{gain}_\lambda DN_{p\lambda} + \text{offset}_\lambda \\ L_{t\lambda} = \text{gain}_\lambda DN_{t\lambda} + \text{offset}_\lambda \end{cases} \right\} \text{Eq. 1}$$

dove $L_{t\lambda}$ è la radianza del target nella banda spettrale λ intesa come somma della radianza propria del punto (colonna *dir* di Tabella 6.6) e della radianza dell'intorno (colonna *env* di Tabella 6.6), $L_{p\lambda}$ è il valore di *path radiance* nella banda λ (colonna *atm* di Tabella 6.6), $DN_{t\lambda}$ e $DN_{p\lambda}$ sono rispettivamente il Digital Number del target e corrispondente alla *path radiance* nella stessa banda λ . Individuati i punti di misura a terra ASD FieldSpecPro sulle immagini ASPIS ortocorrette tramite le relative coordinate, sono stati estratti i corrispondenti $DN_{t\lambda}$ come media su un'intorno delle dimensioni di 3x3 pixel del punto di riferimento.

Le relative coordinate angolari (*zenit* ed *azimut*) sono state derivate dalle rispettive posizioni nelle immagini con i parametri ottenuti dal processo di ortocorrezione. Alcuni di questi punti sono stati scelti su più immagini in modo da fornire dati multiangolari con cui si è proceduto all'inversione del modello per il calcolo degli effetti di riflettanza bidirezionale (BRDF). Per gli effetti BRDF è stato adottato un modello lineare semi-empirico, il modello di Walthall [10], costituito da una combinazione dei cosiddetti *kernels* (funzioni standard delle coordinate angolari) pesati con i rispettivi parametri determinati tramite regressione con i dati derivati dalle differenti immagini dello stesso punto. L'inversione del modello è stata effettuata sui DN depurati preventivamente per il contributo della *path radiance*. $L_{t\lambda}$ e $L_{p\lambda}$ nell'eq.1 sono state calcolate per mezzo del codice 6S (Tabella 6.6), per ogni banda ASPIS caratterizzata dalla propria curva di sensibilità (Figura 6.32), è stata simulata la radianza al sensore nell'ipotesi di ripresa nadirale nelle stesse condizioni geometriche (configurazione sole-target-sensore) e radiometriche (modelli di atmosfera/aerosol) e riflettanza a terra del target ottenuta dalle misure a terra con ASD FieldSpecPro mediate su curve-filtro ASPIS.

Il codice 6S ha fornito, nelle condizioni geometriche specificate, il valore della radianza totale (in $W/m^2 sr$) e delle sue componenti: path radiance, radianza propria del punto (pixel), radianza dell'intorno. Nell'ipotesi di terreno omogeneo, la radianza intrinseca del suolo nudo e la radianza dell'intorno sono state sommate per il calcolo di $L_{t\lambda}$ nell'eq. 1.

In mancanza di dati meteo sincroni ai passaggi aerei per la stima della path radiance (Tabella 6.7) in termini di $DN_{p\lambda}$ nelle diverse bande ASPIS, è stato adottato il metodo della regressione/intersezione (RIM) di Crippen [11], di tipo *image-based* che non richiede la presenza di un canale nel medio infrarosso in cui la *path radiance* è pressoché nulla.

Nella tabella seguente (Tabella 6.8) sono riportati i coefficienti di calibrazione stimati con la procedura sopra descritta per le bande ASPIS della configurazione NDVI.

Tabella 6.7 – Valori di DN corrispondenti alla path radiance calcolati per le varie bande ASPIS della configurazione NDVI

	Green	Red	RE1	NIR
λ -cent	550,79	680,65	700,4	777
Radianza	4,537	2,375	2,100	1,608
$DN_{\lambda p}$	3632,960	2067,910	2709,320	3033,180
N. aree	45	62	73	

Tabella 6.8 – Gain e offset ricavati per le bande ASPIS della configurazione NDVI

Green		Red		RE1		NIR	
Gain	Offset	Gain	Offset	Gain	Offset	Gain	Offset
0,04090	-144.051	0,01240	-23.267	0,02501	- 65.676	0,02087	-61,674

6.4.3 Stima dei parametri biofisici

Sulle immagini ASPIS preprocessate è stata effettuata l'estrazione delle firme spettrali, espresse in riflettanza, in corrispondenza dei punti di misura a terra dell'indice di area fogliare LAI, RWC, FMC.

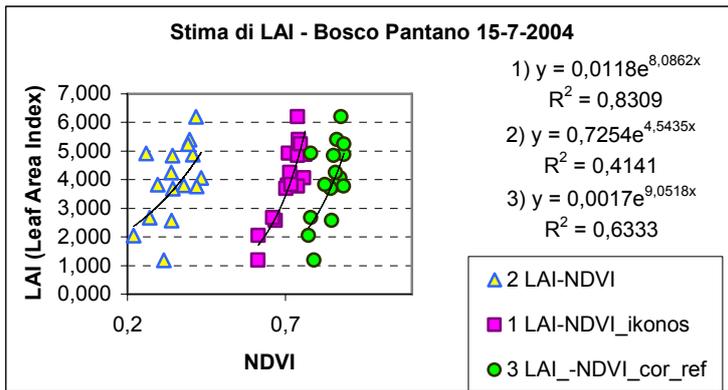


Figura 6.35 – Stima di LAI da dati ASPIS ed IKONOS

In Figura 6.35 è riportato un primo set di valori di NDVI corrispondenti ai punti di misura del LAI, calcolato utilizzando le firme spettrali in DN mediate sui valori dello stesso punto estratti dalle varie immagini ASPIS in cui esso ricadeva (ortocorrette ma non corrette radiometricamente). Tali valori presentano bassa correlazione ($R^2=0,41$) con le misure di LAI (Figura 6.35, curva 2), mentre se il calcolo del NDVI si effettua a partire dai dati di riflettanza ottenuti dal preprocessing la correlazione diventa maggiormente significativa ($R^2=0,6333$, $p=0,0001$, curva 3) e si avvicina a quella dei dati ikonos ($R^2=0,83$), riportati sullo stesso grafico (curva 1).

Nella Figura 6.36, a titolo d'esempio, sono riportati gli andamenti del contenuto d'acqua fogliare di fruttiferi in funzione dei valori di radianza al sensore (lato a) relativi ai 4 canali nell'intervallo del *red edge* (RE1, RE 2, RE 3, RE 4), non corretti per gli effetti atmosferici e di riflettano bidirezionale connessi alla struttura tridimensionale ed ai relativi parametri della pianta (LAI, LAD, background,...), mentre nel lato b della stessa si nota il miglioramento della correlazione dopo il preprocessing radiometrico con la stima dei relativi dati di riflettanza al suolo.

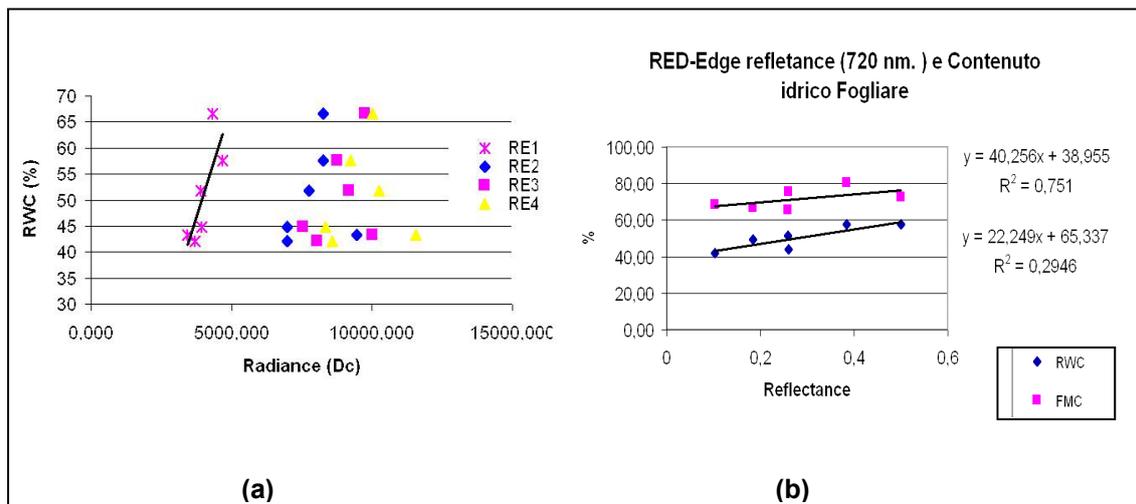


Figura 6.36 – Stima di contenuto d'acqua fogliare di fruttiferi da dati ASPIS grezzi (a) e preprocessati (b)

Uno stesso punto di misura può ricadere su più immagini ASPIS a causa della parziale sovrapposizione di queste (Figura 6.34).

Ai punti, quindi, sono state attribuite tante firme spettrali quante sono le immagini su cui essi ricadono utilizzate poi per la stima degli effetti di BRDF dovuti ai differenti angoli di vista (*zenit* ed *azimut*).

In Figura 6.37 è riportato l'andamento dell'RWC e dello spostamento del REIP (*Red Edge Inflection Point*), calcolato a partire dai dati ASPIS RE preprocessati, per i punti a terra dove sono stati effettuati i prelievi fogliari su frutteti in aree irrigate. Per il calcolo del REIP è stato utilizzato il metodo LIM (*Lagrangian Interpolation Method*), [12].

Come si vede tale indice spettrale appare correlato negativamente al RWC, sebbene l'esiguo numero dei punti di misura, dovuto alla perdita di alcune immagini per inconvenienti tecnici, richieda ulteriori indagini.

In conclusione, da questi risultati preliminari il sistema ASPIS conferma le sue potenzialità anche per la valutazione di alcuni importanti parametri biofisici della vegetazione per la stima degli effetti legati ai fenomeni di desertificazione. A conferma di quanto avevamo ottenuto utilizzando i dati iperspettrali acquisiti a terra tramite lo spettrometro per la simulazione delle bande ASPIS, i canali utilizzati da questo sensore, specialmente quelli nell'intervallo del *red edge* (in particolare RE1), nonostante le problematiche di correzione radiometrica e geometrica, si sono dimostrati notevolmente utili nella stima dei parametri biofisici sensibili ai fenomeni di desertificazione quali il LAI per le aree a vegetazione naturale ed il contenuto d'acqua fogliare (RWC, FMC) per i fruttiferi. Le procedure di preprocessing qui descritte sono risultate efficaci nel migliorare le capacità predittive dei dati telerilevati da tale sistema ma richiederebbero ulteriori sforzi per una loro sistematizzazione, ingegnerizzazione ed utilizzo operativo.

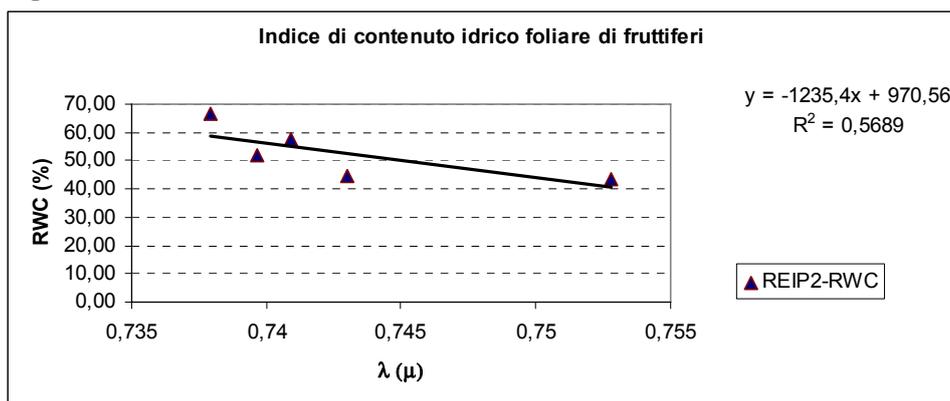


Figura 6.37 – Stima dell'RWC dalla posizione del REIP

6.5 Intercomparazione di sensori satellitari ed aerei

Nelle tabelle successive sono riportati i dati di correlazione (R^2) tra la riflettanza a terra ed i valori di contenuto di acqua fogliare, sotto forma dei due indici RWC ed FMC, definiti nei precedenti capitoli. Le misure puntuali di riflettanza sono state estratte dalle immagini multispettrali ortocorrette e preprocessate radiometricamente per minimizzare gli effetti di rumore introdotti dall'atmosfera. Per le immagini multispettrali telerilevate dai sensori Landsat TM/ETM, Ikonos ed ASPIS, tali effetti atmosferici sono stati corretti utilizzando il codice 6S e le riflettanze a terra nelle singole bande di acquisizione calcolate dalle firme iperspettrali rilevate su coperture riconoscibili nelle immagini. I coefficienti di calibrazione dei sensori satellitari sono stati derivati dai dati ancillari inviati con le *frames* multispettrali mentre per quelli ASPIS è stata utilizzata la procedura di calibrazione *on flight* precedentemente descritta. In prima approssimazione, considerando che le aree di studio sono prevalentemente pianeggianti

non sono stati considerati effetti dovuti alla topografia né all'anisotropia della riflettanza (BRDF), di cui però si tenuto conto per la calibrazione on flight di ASPIS utilizzando diverse misure su suolo nudo (vedi cap. precedente). Rispetto ai valori simulati per mezzo delle firme iperspettrali riprese a terra, questi dati effettivamente telerilevati dai sensori multispettrali remoti, oltre che della distribuzione e risoluzione radiometrica delle varie bande risentono maggiormente non solo dello spessore di atmosfera attraversato ma anche della struttura tridimensionale della pianta/piantazione (LAI, LAD,..) e del livello di copertura al suolo. Da questo punto di vista la diminuzione nei livelli di correlazione, rispetto alle simulazioni risulta in molti casi rilevante. Nelle tabelle seguenti sono indicati solamente i valori di R^2 superiori a 0,25 del modello regressivo (lineare) adottato. I valori corrispondenti all'insieme delle misure sui fruttiferi acquisite nell'estate del 2004, al contrario delle simulazioni riportate nei capitoli precedenti, sono risultati tutti minori di 0,25, per cui la relativa tabella non è stata riportata.

Nelle Tabelle 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 sono elencati invece i risultati ottenuti per i tre sensori satellitari, Landsat TM, Landsat ETM, ed Ikonos, i primi due con 7 bande di acquisizione (visibile, vicino e medio infrarosso) e 30 m di risoluzione a terra, l'altro con 4 bande (visibile e vicino infrarosso) e 4 m di risoluzione a terra. I dati TM sono relativi a 2 passaggi, l'uno del 26-5 e l'altro del 30-8, mentre l'ETM è relativo al giorno 21-7, più vicino alla campagna di misure a terra, effettuata a metà luglio. Purtroppo tuttavia quest'ultimo sensore a causa di guasti all'apparato SLC (*Scan Line Corrector*) ha fornito delle immagini degradate con perdita parziale di dati ed un ulteriore degrado della qualità radiometrica parzialmente compensata dalle procedure di preprocessing. Gli indici spettrali menzionati nelle tabelle sono così definiti:

1. $NDVI = (NIR - \text{rosso}) / (NIR + \text{rosso})$
2. $VI = NIR / \text{rosso}$
3. $GVI = \text{verde} / \text{rosso}$
4. $BVI = NIR / \text{blu}$
5. $NDWI1 = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$
6. $NDWI2 = (SWIR1 - SWIR2) / (SWIR1 + SWIR2)$
7. $NDVRE1 = (NIR - RE1) / (NIR + SWIR1)$
8. $MF'RE = \Sigma [(RE2 - RE1) / \delta\lambda_1 + (RE3 - RE2) / \delta\lambda_2 + (RE4 - RE3) / \delta\lambda_3]$
9. $REIP = \Sigma_i (RE_{i+1} - RE_i) / ((\lambda_{i+1} - \lambda_i) * (\lambda_{i-1} - \lambda_i) * (\lambda_{i-1} - \lambda_i))$

Il NIR indica la generica banda di acquisizione nel vicino infrarosso, a circa 750-900 nm, SWIR1 e SWIR2 si riferiscono a bande del medio infrarosso intorno rispettivamente a 1550-1750 nm e 2350-3090 nm. Le bande di tipo REx (x=1-4) ed i relativi indici (7,8,9) sono quelle relative all'intervallo *red edge* del sensore ASPIS, particolarmente sensibile alle variazioni di riflettanza fogliare connesse a stress transitori della pianta.

Lo stesso sensore è dotato anche di bande nel visibile (rosso, verde, blu) e NIR che, come le precedenti, sono caratterizzate da risoluzione spettrale (5-10 nm) e radiometrica (14 bit) superiore a quella degli apparati satellitari. Gli indici spettrali 8 e 9, sono ottenuti dalle bande ASPIS nell'intervallo *red edge*, il primo è proporzionale alla derivata media della riflettanza mentre il secondo esprime il valore di λ corrispondente al punto di flesso della curva di riflettanza cui si è fatto cenno nel capitolo precedente.

I valori di R^2 relativi ai dati Ikonos sono riportati sia utilizzando valori di riflettanza puntuali mediati su un intorno di 3x3 pixel (12 m) che su di un'area di 8x8 pixel, assimilabile al pixel Landsat TM/ETM. Nelle Tabelle 6.9 e 6.10 sono riportati i valori di R^2 calcolati per pescheti relativi alla correlazione tra il contenuto idrico fogliare e le singole bande e tra il contenuto idrico fogliare e gli indici rispettivamente. Le Tabelle 6.11 e 6.12 riportano l'analogo per gli agrumi. Per quanto attiene i pescheti con asterisco, sono riportate le stime che si riferiscono all'intero set di dati, mentre quelle senza sono relative ai pescheti che insistono su terreni con un unico tipo di tessitura (franca) che risultano circa l'80% del totale. Come si vede per questo subset di dati aumentano notevolmente i livelli di correlazione a causa verosimilmente dell'influenza del suolo nelle firme spettrali satellitari, con una prevalenza della banda 4 (NIR) per il TM e delle bande nel visibile (Red, Green, Blu) per Ikonos mentre bassa appare la correlazione per il sensore ETM, sebbene l'acquisizione sia stata la più vicina in termini temporali alla relativa campagna di misure a terra. La stima dell'RWC effettuata tramite singola banda (Tabella 6.9) risulta più efficace di quella dell'FMC.

Per quanto attiene l'utilizzo di indici spettrali, dalla Tabella 6.10 si evince che quelli derivati dai dati multispettrali ETM, acquisiti a ridosso delle campagne di misura a terra, presentano la correlazione maggiore con l'RWC e l'FMC, con massimi ottenuti per l'NDWI2. Tale indice normalizzato è calcolato dalle bande ETM 5 e 7, nel medio infrarosso (SWIR) in cui si collocano principalmente le bande di assorbimento dell'acqua.

Tabella 6.9 – Correlazione tra contenuto idrico fogliare di pescheti e riflettanza per sensori multispettrali satellitari

VI	Lds_TM_26_5		Lds_ETM_21_7		Lds_TM_30_8		IKONOS 3x3		IKONOS 8x8	
	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC
NDVI			0,581	0,374						
VI			0,737	0,625			0,445			
GVI			0,698	0,73	0,7-0,317*	0,635	0,412		0,431	
BVI	0,530*	0,26-0,273*			0,412-0,316*	0,594-0,423*			0,455	
NDWI1	0,263*		0,643	0,372						
NDWI2			0,991	0,82						

Tabella 6.10 – Correlazione tra contenuto idrico fogliare di pescheti ed indici spettrali per sensori satellitari

VI	Lds_TM_26_5		Lds_ETM_21_7		Lds_TM_30_8		IKONOS 3x3		IKONOS 8x8	
	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC
NDVI			0,581	0,374						
VI			0,737	0,625			0,445			
GVI			0,698	0,73	0,7-0,317*	0,635	0,412		0,431	
BVI	0,530*	0,26-0,273*			0,412-0,316*	0,594-0,423*			0,455	
NDWI1	0,263*		0,643	0,372						
NDWI2			0,991	0,82						

Come si vede nelle Tabelle 6.11 ed 6.12, nonostante la migliore risoluzione geometrica e radiometrica di Ikonos, anche in questo caso i dati derivati dai sensori Landsat TM/ETM appaiono maggiormente efficaci nella stima del contenuto idrico fogliare. Valori più rilevanti si hanno in corrispondenza delle riflettanze nell'infrarosso (NIR e SWIR) mentre per gli indici spettrali assumono importanza anche i rilievi nel visibile da cui derivano il GVI e il BVI, in corrispondenza dei quali si registrano dei massimi per il passaggio TM del 26-5, circa 2 mesi prima delle campagne a terra e verosimilmente in coincidenza con l'apice vegetativo prima della calura estiva.

A titolo d'esempio nella tabella seguente (Tabella 6.13) si riportano valori di significatività statistica calcolati (F-test) per i valori relativi ad alcuni indici di Tabella 6.12 derivati dai dati Ikonos 3x3.

Tabella 6.11 – Correlazione tra contenuto idrico fogliare di agrumi e riflettanza per sensori multispettrali satellitari

Band	Lds_TM_26_5		Lds_ETM_21_7		Lds_TM_30_8		IKONOS 3x3		IKONOS 8x8	
	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC
blu	TM1	0,479				0,396	IK1	0,435		0,436
verde	TM2	0,552					IK2	0,39		0,395
rosso	TM3	0,555				0,408	IK3	0,366		0,359
NIR	TM4			0,479	0,834		IK4		0,28	
SWIR1	TM5	0,576				0,59				
SWIR2	TM7	0,541				0,424				

Tabella 6.12 – Correlazione tra contenuto idrico fogliare di agrumi e indici spettrali per sensori satellitari

VI	Lds_TM_26_5		Lds_ETM_21_7		Lds_TM_30_8		IKONOS 3x3		IKONOS 8x8	
	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC	RWC	FMC
NDVI		0,629		0,464	0,377	0,385		0,404		
VI					0,54	0,433	0,482	0,445		0,382
GVI	0,748						0,511		0,491	0,398
BVI	0,691		0,471						0,47	
NDWI1		0,641		0,588	0,587	0,475				
NDWI2		0,599								

Tabella 6.13- Significatività statistica relativa alla colonna Ikonos 3x3 della Tabella 6.12

	NDVI	VI	GVI	BVI
RWC	0,293821	0,005684	0,002266	1,27786E-07
FMC	0,019175	0,008759	0,069751	1,1522E-07

Nota: i valori in rosso hanno una significatività inferiore al 95%

I valori riportati sono assimilabili alla probabilità di ottenere casualmente le correlazioni relative. Come si vede per gran parte dei valori di correlazione (R^2) maggiori della soglia (0,25) anche la significatività risulta superiore al 95%.

Nelle Tabelle seguenti (6.14, 6.15, 6.16) sono stati riportati i valori di correlazione tra riflettanze a terra ASPIS ed indici di contenuto idrico fogliare, ottenute utilizzando i coefficienti di calibrazione stimati tramite le procedure descritte e la correzione atmosferica del codice 6S. Sui dati spettrali della vegetazione non è stata effettuata la correzione per la riflettanza bidirezionale (BRDF) in quanto il modello (Walthall) utilizzato per la stima dei coefficienti di calibrazione su suolo nudo si è rivelato inadeguato.

Band	ASPIS°	ASPIS°	
		RWC	FMC
blu	ASP1		
verde	ASP2		0,89
rosso	ASP3		
RE1	ASP4		0,914
RE2	ASP5		
RE3	ASP6		
RE4	ASP7		
NIR	ASP8	0,752	0,497

Tabella 6.14 - Correlazione (R^2) tra riflettanze spettrali a terra ASPIS ed RWC/FMC

VI	ASPIS°	
	RWC	FMC
NDVI	0,696	
VI	0,294	
GVI		0,472
NDVRE1		0,932
MF'RE		0,763

Tabella 6.15 -Correlazione (R^2) tra indici spettrali derivate da riflettanze ASPIS ed RWC/FMC

	RE1	RE2	RE3	RE4
RWC	1,43E-07	1,51E-07	1,51E-07	1,50E-07
FMC	5,68E-10	5,94E-10	5,92E-10	5,88E-10

Tabella 6.16 - Significatività (F-test) del modello regressivo lineare tra riflettanze spettrali a terra ASPIS ed RWC/FMC

A causa delle loro ampie sovrapposizioni e della distribuzione discontinua, rispetto alle immagini multispettrali satellitari, quelle riprese tramite ASPIS contenevano un numero minore di punti di misura a terra (comprendente coltivazioni di fruttiferi vari). Nell'ipotesi di operare inizialmente senza correzione BRDF, sono stati mediati i valori di digital number (DN) corrispondenti allo stesso punto di misura a terra ripreso da più immagini preventivamente ortocorrette sia per le riprese ASPIS in configurazione NDVI che RE. Utilizzando tali valori medi si è proceduto con la calibrazione per ottenere i dati di radianza al sensore nelle varie bande di acquisizione.

Come si vede dalle tabelle precedenti, la correlazione degli indici RWC ed FMC con le singole riflettanze a terra ASPIS (Tabella 6.14) presenta valori elevati sia nel visibile (verde) che nel red edge (RE1), mentre a livello di indici spettrali (Tabella 6.15) otteniamo i valori più alti in quelli utilizzando le bande del *red edge* (NDVRE1 e MF'RE).

In Tabella 6.16 sono riportati valori di significatività della correlazione relativa alla Tabella 6.14. Si sottolinea che tali valori ottenuti per i dati ASPIS risultano maggiormente indicativi in quanto sono ottenuti per l'insieme delle diverse tipologie di fruttiferi presenti, laddove utilizzando i dati multispettrali satellitari pur nella loro completezza, si erano registrati livelli di correlazione con RWC/FMC inferiori a 0,25 sia utilizzando i valori di riflettanza che gli indici spettrali.

6.6 Discussione

In questo lavoro sono state implementate metodologie finalizzate alla valutazione dell'efficacia dei sensori per il telerilevamento aerospaziale nella stima di alcuni importanti parametri biofisici della vegetazione sensibili agli effetti della desertificazione (diminuzione e frammentazione della vegetazione seminaturale, salinizzazione dei suoli e stress idrici), legati allo sfruttamento ed alla disponibilità della risorsa idrica. Tali metodologie sono state focalizzate su importanti parametri biofisici correlati agli effetti suddetti: la conducibilità elettrica dei suoli (legata alla salinizzazione), il contenuto idrico fogliare, valutato attraverso i due indici RWC ed FMC, la biomassa e la struttura tridimensionale della vegetazione arborea, sintetizzate nel LAI (Leaf Area Index). I primi 2 parametri sono stati utilizzati per le colture agricole considerate (fruttiferi e cerealicoli) mentre il LAI è stato usato per aree a vegetazione semi-naturale e la descrizione relativa a quest'ultimo aspetto, trattato qui in modo limitato, è rimandata alla parte iniziale di questo documento. Le suddette metodologie sono state sviluppate quindi per colture agricole (cereali e fruttiferi) rappresentative di ampie zone del Sud d'Italia. Esse partono dalle misurazioni a terra dei parametri unitamente alle relative firme iperspettrali (misurate tramite spettrometro portatile) e multispettrali telerilevate (satellitari e ASPIS). L'approccio, finalizzato alla valutazione della dipendenza valori di riflettanza dai parametri biofisici (conducibilità, contenuto idrico), è stato articolato su tre livelli:

1. utilizzo delle firme iperspettrali per l'analisi fine sia a livello delle singole frequenze che di indici spettrali basati su rapporti semplici e/o normalizzati;
2. impiego di firme multispettrali a terra dei vari sensori "simulate" tramite i dati iperspettrali;
3. valutazione dell'efficienza dei sensori multispettrali satellitari ed ASPIS a partire dai rilievi acquisiti in coincidenza con le varie campagne ed opportunamente preprocessati (correzioni geometriche ed atmosferiche).

Dalle elaborazioni dei dati iperspettrali, effettuate anche con software sviluppato "ad hoc", oltre che gli intervalli di frequenza più significativi sono state derivate anche le valutazioni delle risoluzioni spettrali necessarie per un monitoraggio efficace.

Tabella 6.17 – Bande spettrali correlate alle variazioni di riflettanza del grano dovute alla salinizzazione dei suoli

	λ	corr	FHWM
	nm.	R^2	$d\lambda$ (nm.)
blu			
verde			
rosso			
RE1			
RE2			
RE3			
RE4	770	0,4	3
NIR	810	0,45	5
SWR1	1110	0,45	80
SWR2			

Per quanto attiene le variazioni di riflettanza legate agli effetti di salinizzazione sui cerealicoli, dai dati relativi alla campagna 2004 (Tabella 6.17) si evince che risultano notevolmente importanti gli intervalli di frequenza che si collocano nella zona spettrale del *red edge* (RE4), del NIR e SWIR che appaiono significativamente correlati ai valori di conducibilità dei suoli.

Considerando poi i calcoli effettuati sugli indici spettrali tali intervalli si ampliano includendo tutto il *red edge* (RE1), lo SWIR intorno a 2280 nm ed il blu. Da rilevare però che l'ampiezza degli intervalli interessati (colonna FHWM di Tabella 6.17), legata alla risoluzione spettrale delle ipotetiche bande di acquisizione, risulta notevolmente bassa e mediamente minore di

quella degli usuali sensori satellitari che si colloca intorno ai 100 nm. I dati ulteriori di conducibilità dei suoli, acquisiti nel 2005 si sono rivelati scarsamente correlati a quelli della riflettanza iperspettrale dei relativi cerealicoli, probabilmente a causa del periodo (aprile-maggio), troppo anticipato in relazione all'insorgenza dei fenomeni. Infatti dalla Tabella 6.18 anche per il contenuto idrico fogliare del grano si rileva una bassa correlazione, con dei picchi in corrispondenza del blu e medio infrarosso (SWIR) e risoluzione spettrale sino a 20 nm.

La correlazione tra questo parametro biofisico e la riflettanza iperspettrale (rilevamenti nell'estate 2004) aumenta invece nel caso dei fruttiferi (Tabella 6.19), in corrispondenza di intervalli nel visibile (verde, rosso) e dello SWIR che, se si considera l'utilizzo di indici spettrali (rapporti/normalizzati) includono anche rosso, *red edge* e NIR (Figure 6.22-6.24).

Tabella 6.18 – Bande spettrali correlate alle variazioni di riflettanza del grano dovute al contenuto idrico fogliare

	λ	corr	FHWM
	nm.	R ²	d λ (nm.)
blu	400	0,25	20
verde			
rosso			
RE1			
RE2			
RE3			
RE4			
NIR			
SWR1	1600	0,27	110
SWR2	2200	0,27	110

Tabella 6.19 – Bande spettrali correlate alle variazioni di riflettanza dovute a quelle del contenuto idrico fogliare di fruttiferi

	λ	corr	FHWM
	nm.	R ²	d λ (nm.)
blu			
verde	550	0,5	50
rosso	650	0,65	100
RE1			
RE2			
RE3			
RE4			
NIR			
SWR1	1250	0,55	120
SWR2	1600	0,6	110

Le risoluzioni spettrali (FHWM) non superano i 100 nm e quelle relative al *red edge* si attestano intorno a 10-20 nm.

Poiché i sensori utilizzati per telerilevamento satellitare ed aereo, al contrario dello spettroradiometro portatile, possono generalmente utilizzare solo un numero limitato di bande di acquisizione, dall'ampiezza (risoluzione spettrale) maggiore mediamente di un fattore 10², e considerando che questo, unitamente alla loro distribuzione, rappresenta un fattore notevolmente importante nella determinazione della sensibilità a variazioni di particolari parametri biofisici, sono state simulate le risposte a terra dei vari sensori utilizzati a partire dai dati iperspettrali al fine di verificarne "a priori" l'efficacia nella stima dei parametri considerati.

Avendo considerato i sensori satellitari Landsat-TM/ETM ed Ikonos unitamente ad ASPIS si coprono gran parte degli intervalli spettrali d'interesse che includono visibile, NIR, SWIR e *red edge*, con diverse risoluzioni spettrali (80-100 nm per i satellitari e 5-10 nm per ASPIS).

La simulazione di tali sensori tramite i dati iperspettrali di riflettanza rilevati tramite spettrometro e le relative curve-filtro (cap. precedente) ha messo in evidenza, per quanto attiene i rilievi estivi di contenuto d'acqua fogliare (RWC, FMC) sui fruttiferi, la miglior efficienza spettrale dei canali di acquisizione ASPIS e dei relativi indici rispetto ai sensori satellitari.

Nonostante la peggiore risoluzione geometrica a terra i dati (riflettanze e relativi indici) simulati per Landsat-TM hanno presentato una correlazione superiore rispetto a quelli Ikonos. Tale tendenza risulta ulteriormente rafforzata considerando esclusivamente gli agrumeti con un massimo di correlazione sul canale rosso.

Per quanto riguarda gli indici spettrali simulati, è da rilevare l'efficienza di quelli TM classici (NDVI, VI) unitamente a quelli ASPIS utilizzando i canali del *red edge*.

L'utilizzo dei dati ripresi dai sensori Landsat TM/ETM ed Ikonos ha previsto l'impiego di procedure di preprocessing (geometrico e radiometrico) che comunque non hanno consentito di raggiungere una correlazione maggiore di 0,25 per l'intero set di misure relative a varie specie di fruttiferi. Questo è indice sia dell'importanza della diversa struttura tridimensionale e copertura al suolo delle varie colture che richiederebbe correzioni radiometriche in grado di tener conto dei fattori di riflettanza bidirezionale specifici unitamente alla topografia locale.

Per i soli pescheti si rilevano valori superiori alla soglia della correlazione in banda 4 TM (valori NIR con asterisco in Tabella 6.8 colonne 1,3) che aumentano notevolmente (valori senza asterisco) se si considerano solo i rilievi su terreni dalla tessitura omogenea (franca). Per gli stessi pescheti su questa tessitura aumentano notevolmente i valori relativi agli indici spettrali calcolati dalle riflettanze Landsat ETM, il cui passaggio è il più prossimo temporalmente alla campagna di misure a terra, con massimo in corrispondenza dell'NDWI2 ottenuto tramite canali SWIR.

Non si notano variazioni significative al variare della risoluzione a terra ottenuta mediando su due diverse estensioni superficiali (intorni) i valori delle riflettanze Ikonos (corrispondenti alle colonne Ikonos 3x3 ed Ikonos 8x8).

Per quanto attiene gli agrumeti, appare una dipendenza temporale meno accentuata con valori sufficienti di correlazione su tutte le bande spettrali in date anche abbastanza lontane da quella dei rilievi a terra, mentre per gli indici spettrali i massimi si registrano per il passaggio di maggio (Tabella 6.12, colonna Lds_TM_26_5) evidentemente in coincidenza all'apice vegetativo.

Dal punto di vista della risoluzione geometrica a terra, si è visto che quella Landsat TM/ETM (30X30 m) non risulta sufficiente a discriminare sufficientemente gli appezzamenti tipici delle aree considerate, in quanto i valori medi calcolati su finestra di 3x3 pixel (come solitamente si opera per tener conto delle eventuali incertezze dovute alle correzioni geometriche) si riferiscono visivamente a tipologie di coperture diverse.

Da rilevare infine gli alti valori di correlazione calcolati in corrispondenza delle varie riflettanze ASPIS (Tabella 6.14) e dei relativi indici (Tabella 6.15) che raggiungono il massimo per la zona iniziale del *red edge* (RE1).

Tale risultato è ancora più apprezzabile poiché è stato ottenuto per un insieme di diversi tipi di fruttiferi sebbene non comprensivo di tutti i rilievi a terra poiché non presenti sulle immagini riprese.

Nelle precedenti valutazioni, si è tenuto conto solo limitatamente degli effetti radiometrici dovuti alla topografia ed alla struttura geometrica 3-D delle piante che attraverso i vari parametri (LAI, LAD,...) e la percentuale di copertura al suolo è in

grado d'influenzare notevolmente i valori di radianza rilevati dai sensori remoti, per cui, specialmente per quelli ad alto FOV, come ASPIS, occorrerà migliorare ulteriormente le procedure di preprocessing per tener conto più efficacemente di questi contributi.

In definitiva le indicazioni generali desunte dai risultati esposti sottolineano l'importanza della capacità di poter rilevare oltre che nel visibile e NIR anche nell'infrarosso medio (SWIR) e nel *red edge* ai fini di sviluppare un eventuale sensore da utilizzare per il monitoraggio dei fenomeni connessi alla desertificazione. L'impiego di tale sensore a supporto anche della gestione agricola, specialmente a livello nazionale, è però subordinato a caratteristiche di risoluzione spaziale dell'ordine di 2-5 m e spettrale intorno a 10-30 nm con alta sensibilità radiometrica (~ 12-14 bit). Se si prevede d'installare tale sensore su piattaforma satellitare polare sarebbe opportuno prevederne più di una in modo da superare i limiti dovuti al periodo di rivisitazione, che nella nostra area geografica risulta troppo lungo per poter assicurare un monitoraggio efficace della vegetazione, specialmente per alcune specie ed in alcuni periodi critici di rapido sviluppo vegetativo. Per sensori ad alta risoluzione eventualmente aviotrasportati risulta opportuno prevedere preventivamente procedure di correzione geometrica e radiometrica che tengano conto efficacemente oltre che degli effetti atmosferici, anche di quelli di copertura a terra e di riflettanza bidirezionale delle varie tipologie di vegetazione.

6.7 Bibliografia

- [1] Yoshioka H., Miura T., Huete A.R., Ganapol B.D.- Analysis of Vegetation Isolines in Red-NIR Reflectance Space. *Remote Sens. Environ.*, 74(2) 2000, 313-326
- [2] Thenkabail P. S., Enclona E. A., Ashton M. S. Van Der Meer B. (2004) – Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis application. *Remote Sensing of Environment*, 91 (2004), 354-376.
- [3] Epiphonio R., José C. N - Dependence of NDVI and SAVI on Sun/Sensor Geometry and Its Effect on fAPAR Relationships in Alfalfa. *Remote Sens. Environ.*: 51(3), 1995, 351-360
- [4] Ekstrand, S. - LANDSAT TM-based forest damage assessment: correction for topographic effects. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 62 (1996), 151-161.
- [5] Thenkabail P. S., Smith R. B., De-Pauwv E. (2000) – Hyperspectral narrowbands vegetation indices for determining agricultural crops characteristics. *Remote Sensing Environ.*: 71, 158-182.
- [6] Elvidge, C.D., Chen, Z. - Comparison of broad-waveband and narrow-waveband red and near-infrared vegetation indices, *Remote Sens. Environ.*: 54(3), 1995, 38-48
- [7] Belli C., 2003. L' Advanced SPectroscopic Imaging System (ASPIS). Un nuovo sistema digitale di telerilevamento aereo per lo studio delle risorse agricole - forestali. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ecologia Forestale XV Ciclo. DISAFRI, Università degli Studi della Toscana
- [8] Chavez Jr. P. - Image-based atmospheric correction, revised and improved. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 62 (1994), 1025-1036.

[9] Vermote E.F., Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Morcrette J.J., 1997 – Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 35 (3): 675-686.

[10] Walthall C. L., Norman J. M., Welles J. M., Campbell G., Blad B. L. (1985) – Simple equation to approximate the bi-directional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. Applied Optics, 24(3), 383-387.

[11] Crippen R. E. (1987) – The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing. International Journal of Remote Sensing, 8(2), 137-155.

[12] Dawson T.P., Curran P.J. (1998) – A new technique for interpolating the reflectance red edge position. International Journal of Remote Sensing, 19(11), 2133-2139.

6.8 Appendice: parametri del processo di ortocorrezione

Pantano

Risoluzione immagini ortocorrette: 1 m

DEM = risoluzione 20 m

Metodo di campionamento: Bilinear

banda 0 = 700 nm

banda 1 = 550 nm

banda 2 = 680 nm

banda 3 = 780 nm

NDVI

x_0, y_0, z_0 : coordinate del centro di prospettiva

omega: angolo di rotazione intorno all'asse X.

phi: angolo di rotazione intorno all'asse Y.

kappa: angolo di rotazione intorno all'asse Z.

1s, 2s, 3s... =prima strisciata, seconda strisciata ecc..

Immagine	GCP	Tie Point	RMSE Totale (GCP)	Bande	x_0	y_0	z_0	omega	phi	kappa
			pixel		(m)	(m)	(m)	(°)	(°)	(°)
1s										
1201	8		1,0001	c0_01201	644549,759	4446905,312	1409,203	-3,071	2,764	-148,137
blk 1201-1202				c1_01201	644516,728	4446895,566	1414,628	-2,499	1,313	-148,584
				c2_01201	644616,481	4446859,227	1402,359	-0,156	4,500	31,258
				c3_01201	644600,764	4446916,664	1401,011	-2,434	3,860	30,971
1202				c0_01202	644410,963	4446726,120	1401,604	-3,344	6,277	-139,089
blk 1201-1202				c1_01202	644354,981	4446711,766	1412,496	-2,531	3,929	-139,736
				c2_01202	644436,798	4446661,075	1399,619	0,541	6,605	40,079
				c3_01202	644436,087	4446721,235	1400,709	-1,860	6,547	39,787
1202b										
	5		0,8872	c0_01202	644404,280	4446726,490	1405,112	-3,321	6,014	-139,073
				c1_01202	644351,718	4446714,721	1413,438	-2,633	3,799	-139,745
				c2_01202	644435,936	4446688,496	1399,402	-0,567	6,537	39,963
				c3_01202	644448,198	4446677,207	1403,482	-0,102	7,033	39,660
2s										
1216	4		1,9236	c0_01216	644523,414	4447363,079	1402,895	-0,175	5,154	-149,272
				c1_01216	644442,375	4447386,922	1410,401	-0,976	1,791	-149,711
				c2_01216	644524,209	4447360,117	1402,902	1,002	4,210	29,912
				c3_01216	644544,088	4447352,502	1403,954	1,323	5,039	29,393
1217	4	si	0,9305	c0_01217	644225,060	4447102,091	1405,283	1,098	-0,068	-141,482
				c1_01217	644206,198	4447067,218	1404,405	2,724	-0,905	-141,843
				c2_01217	644241,105	4447159,286	1400,027	-0,079	-0,242	37,871
				c3_01217	644306,845	4447283,269	1371,286	-5,218	2,332	37,518
1218	9		1,5587	c0_01218	644023,860	4446980,715	1391,351	-4,749	-0,815	-137,625
blk 1218 - 1219				c1_01218	643998,787	4446961,619	1390,840	-3,736	-1,928	-138,033
				c2_01218	644069,253	4446956,665	1389,418	-2,510	0,284	41,846
				c3_01218	644143,599	4446945,760	1383,690	-2,057	3,317	41,375
1219				c0_01219	643897,146	4446655,816	1399,871	-3,685	0,627	-134,950

blk 1218 - 1219				c1_01219	643866,232	4446616,336	1401,119	-1,837	-0,701	-135,483
				c2_01219	643883,221	4446688,113	1401,812	-3,702	-0,649	44,295
				c3_01219	643950,800	4446622,175	1401,143	-1,016	2,086	44,157
3s										
1231	5	si	1,3448	c0_01231	644162,523	4447616,039	1396,395	-0,192	1,847	-143,371
				c1_01231	644106,294	4447632,516	1396,402	-0,684	-0,547	-143,789
				c2_01231	644185,179	4447602,437	1392,492	1,477	1,873	35,910
				c3_01231	644338,170	4447721,195	1358,443	-3,462	8,029	35,770
1232	4		0,7669	c0_01232	643951,875	4447353,302	1398,398	-3,077	0,713	-131,105
				c1_01232	643975,599	4447317,144	1397,831	-1,327	1,635	-131,520
				c2_01232	644004,114	4447366,290	1399,211	-2,196	2,178	48,304
				c3_01232	644004,542	4447364,039	1396,406	-2,173	2,252	47,983
4s										
1247	4		0,8188	c0_01247	644053,666	4447941,542	1418,374	1,608	3,987	-161,691
				c1_01247	644028,554	4448009,643	1417,820	-0,959	2,818	-162,193
				c2_01247	644097,806	4448078,310	1417,476	-3,091	4,681	17,402
				c3_01247	644154,946	4448006,270	1409,808	-0,271	6,886	17,305
1248	5		1,0148	c0_01248	643940,912	4447816,671	1409,830	3,001	8,461	-155,733
				c1_01248	643911,471	4447834,235	1415,749	2,470	7,144	-156,108
				c2_01248	643933,137	4447810,388	1412,832	4,178	7,111	23,530
				c3_01248	643954,147	4447832,947	1413,872	3,328	7,878	23,280
1249	6		1,6954	c0_01249	643782,022	4447639,641	1408,074	-3,865	5,468	-138,375
				c1_01249	643739,170	4447619,117	1413,445	-2,857	3,619	-138,948
				c2_01249	643765,254	4447658,592	1414,358	-3,437	3,957	40,667
				c3_01249	643873,592	4447626,854	1387,559	-2,181	8,392	40,519
1250	4		1,4846	c0_01250	643481,250	4447365,044	1423,097	-0,049	-1,294	-131,523
				c1_01250	643699,620	4447419,581	1430,837	-1,996	7,316	-131,401
				c2_01250	643624,424	4447468,804	1432,932	-2,927	3,787	48,291
				c3_01250	643630,196	4447460,318	1427,506	-2,568	3,987	48,130
5s										
1267	4		0,5234	c0_01267	643560,273	4447794,513	1425,877	-1,539	3,496	-142,963
				c1_01267	643541,489	4447806,113	1425,912	-1,761	2,611	-143,389
				c2_01267	643589,514	4447824,652	1417,808	-1,480	3,793	36,454
				c3_01267	643588,297	4447849,064	1415,915	-2,487	3,815	36,217
1269	5		0,9298	c0_01269	643297,537	4447378,991	1411,100	-1,915	4,968	-134,991
				c1_01269	643261,118	4447323,360	1416,669	0,478	3,453	-135,669
				c2_01269	643285,881	4447393,123	1412,280	-1,237	3,807	44,248
				c3_01269	643277,830	4447321,423	1413,051	1,635	3,537	43,714
1270	7		1,2229	c0_01270	643120,580	4447136,646	1415,756	-1,202	3,042	-139,114
				c1_01270	643082,767	4447124,273	1416,538	-0,496	1,490	-139,582
				c2_01270	643154,850	4447170,804	1404,554	-1,326	3,674	40,274
				c3_01270	643110,851	4447104,907	1418,061	-0,457	4,039	39,950
1271	5		0,8151	c0_01271	642926,309	4446904,242	1411,886	-1,185	1,109	-138,643
				c1_01271	642902,722	4446889,398	1410,130	-0,383	0,026	-138,889
				c2_01271	642950,487	4446916,018	1406,587	-0,429	1,308	40,736
				c3_01271	643020,380	4446896,273	1405,248	0,313	4,024	40,080
1272	4		1,5443	c0_01272	642798,250	4446566,411	1404,461	2,235	1,460	-132,663
				c1_01272	642757,049	4446547,435	1403,569	3,223	-0,247	-133,104
				c2_01272	642808,901	4446629,865	1400,837	1,021	1,284	46,718
				c3_01272	642835,935	4446641,927	1404,849	0,531	2,340	46,424
1273	5		1,8331	c0_01273	642615,853	4446375,646	1397,790	-0,945	1,535	-130,548
				c1_01273	642656,243	4446410,306	1390,539	-2,163	3,113	-131,112
				c2_01273	642670,811	4446409,984	1390,054	-1,077	3,161	48,667
				c3_01273	642734,482	4446422,720	1372,839	-1,637	5,797	48,032

1280	4	0,7495	c0_01280	641552,385	4444700,405	1401,058	1,086	0,400	-138,034
			c1_01280	641533,099	4444686,053	1402,237	1,874	-0,489	-138,476
			c2_01280	641575,439	4444698,141	1398,510	2,397	0,574	41,328
			c3_01280	641614,548	4444719,303	1398,572	1,531	2,170	40,931
1281	5	0,8475	c0_01281	641384,448	4444440,618	1396,879	1,456	0,812	-141,310
			c1_01281	641322,496	4444424,897	1397,085	2,194	-1,745	-141,803
			c2_01281	641387,705	4444460,920	1397,718	1,743	0,188	38,090
			c3_01281	641460,999	4444427,525	1394,086	3,107	3,169	37,633
1282	4	0,6137	c0_01282	641200,928	4444289,412	1415,655	-0,496	4,498	-139,154
			c1_01282	641167,476	4444267,003	1418,599	0,658	3,101	-139,607
			c2_01282	641199,630	4444298,728	1411,948	0,485	3,792	40,115
			c3_01282	641257,093	4444319,998	1402,290	-0,285	6,156	39,762
6s									
1286	4	0,8365	c0_01286	643033,883	4447639,460	1429,377	-6,149	3,804	-127,209
			c1_01286	643030,650	4447642,504	1428,951	-6,019	3,593	-127,603
			c2_01286	643095,315	4447610,134	1424,018	-3,614	5,713	52,233
			c3_01286	643037,446	4447641,757	1428,997	-4,803	3,458	51,736
1287	5	1,1969	c0_01287	642884,677	4447376,253	1436,854	-2,108	3,304	-125,286
			c1_01287	642860,859	4447385,821	1443,367	-2,248	2,296	-125,754
			c2_01287	642908,000	4447388,582	1434,329	-1,204	3,774	54,200
			c3_01287	642954,942	4447352,152	1425,346	0,196	5,782	53,880
1288	5	0,7355	c0_01288	642846,117	4447087,732	1421,506	-4,795	1,963	-128,329
			c1_01288	642921,008	4446964,239	1416,331	0,340	4,907	-128,855
			c2_01288	642819,756	4447102,749	1423,747	-4,088	0,356	50,827
			c3_01288	642753,260	4447194,218	1421,756	-7,740	-2,333	50,275
1289	5	0,965	c0_01289	642691,301	4446898,568	1417,615	-7,291	1,351	-139,430
			c1_01289	642650,012	4446917,586	1421,551	-7,827	-0,345	-140,033
			c2_01289	642681,662	4446793,807	1416,387	-1,923	0,288	39,486
			c3_01289	642685,444	4446930,976	1418,269	-7,343	0,407	39,309
1290	6	1,7153	c0_01290	642434,510	4446682,420	1423,487	-3,657	-0,432	-140,260
			c1_01290	642442,509	4446660,767	1426,455	-2,581	-0,147	-140,685
			c2_01290	642455,493	4446702,956	1416,076	-3,258	-0,364	39,247
			c3_01290	642504,873	4446646,190	1425,048	-0,966	1,689	38,773
1293	6	1,5368	c0_01293	642305,966	4445861,926	1364,548	-0,101	11,575	-135,100
			c1_01293	642266,420	4445871,343	1378,461	-0,278	9,809	-135,663
			c2_01293	642151,892	4445929,233	1396,968	-1,604	4,458	44,490
			c3_01293	642176,676	4445903,353	1393,023	-0,526	5,538	44,186
1297	6	0,8312	c0_01297	641397,813	4444987,621	1419,993	-2,704	-1,221	-137,154
			c1_01297	641431,986	4444948,287	1424,409	-0,943	0,076	-137,522
			c2_01297	641401,200	4444976,715	1417,716	-1,101	-1,836	42,217
			c3_01297	641443,965	4444980,083	1415,723	-1,349	-0,092	41,764
1298	4	0,8493	c0_01298	641307,243	4444672,708	1420,846	-1,055	0,615	-137,214
			c1_01298	641257,485	4444649,730	1421,861	0,034	-1,424	-137,663
			c2_01298	641314,046	4444670,776	1420,090	0,228	0,168	42,052
			c3_01298	641316,480	4444695,630	1424,141	-0,763	0,282	41,712
1299	5	0,9727	c0_01299	641123,058	4444479,593	1421,293	-3,077	0,150	-139,965
			c1_01299	641087,351	4444445,454	1424,624	-1,539	-1,347	-140,404
			c2_01299	641151,152	4444461,611	1421,020	-1,187	0,483	39,359
			c3_01299	641176,842	4444457,700	1423,130	-1,006	1,544	38,911
7s									
1306	15	1,0733	c0_01306	642752,392	4447360,735	1406,548	-1,173	2,587	-142,236
blk 1306-1307-1308			c1_01306	642650,662	4447290,233	1415,795	-0,349	1,240	-142,794
			c2_01306	642686,967	4447320,914	1410,847	-0,617	1,967	37,253
			c3_01306	642706,457	4447307,748	1410,029	-0,056	2,803	36,750

1307				c0_01307	642509,434	4447111,325	1409,062	-2,130	2,364	-140,863
blk 1306-1307-1308				c1_01307	642465,465	4447101,756	1411,960	-1,542	0,483	-141,388
				c2_01307	642524,438	4447111,845	1408,425	-1,001	2,136	38,620
				c3_01307	642557,860	4447112,470	1400,736	-1,023	3,547	38,198
1308				c0_01308	642291,601	4446917,353	1405,922	-2,129	0,624	-139,177
blk 1306-1307-1308				c1_01308	642314,017	4446958,194	1409,039	-1,438	-1,041	-139,552
				c2_01308	642338,513	4446885,470	1405,126	0,353	1,731	40,420
				c3_01308	642343,519	4446881,994	1402,651	0,538	1,986	40,167
1311	5	si	0,8116	c0_01311	641895,390	4446130,773	1399,340	-0,143	1,504	-135,941
				c1_01311	641829,330	4446095,061	1397,444	1,492	-1,219	-136,483
				c2_01311	641898,151	4446137,713	1399,066	0,799	0,929	43,457
				c3_01311	641986,189	4446083,865	1384,468	3,010	4,584	43,052
1312	4		1,0264	c0_01312	641706,770	4445967,176	1401,488	-3,687	2,147	-136,525
				c1_01312	641688,773	4445943,183	1402,538	-2,463	1,387	-136,949
				c2_01312	641726,750	4445922,387	1399,700	-0,626	2,326	42,867
				c3_01312	641789,004	4445954,631	1387,660	-1,834	4,928	42,585
1313	5		0,8786	c0_01313	641553,552	4445720,721	1404,346	-3,741	3,044	-136,677
				c1_01313	641494,801	4445701,116	1410,275	-2,780	0,612	-137,355
				c2_01313	641562,805	4445707,293	1407,658	-1,958	2,665	42,473
				c3_01313	641622,574	4445651,979	1403,669	0,234	5,098	41,692

Pantano

RE

Risoluzione immagini ortocorrette: 1 m
 DEM = risoluzione 20 m
 Metodo di campionamento: Bilinear

x_0, y_0, z_0 : coordinate del centro di prospettiva
 omega: angolo di rotazione intorno all'asse X.
 phi: angolo di rotazione intorno all'asse Y.
 kappa: angolo di rotazione intorno all'asse Z.

banda 0 = 700 nm banda 2 = 733 nm
banda 1 = 719 nm banda 3 = 748 nm

Immagine	GCP	Tie Point	RMSE Totale (GCP)	Bande	x_0	y_0	z_0	omega	phi	kappa
			pixel		(m)	(m)	(m)	(°)	(°)	(°)
1000	7		1,4178	c0_01000	644258,068	4447433,128	1365,520	-7,157	-6,065	-139,601
				c1_01000	644476,337	4447281,858	1398,131	-0,812	2,785	-139,633
				c2_01000	644423,098	4447307,806	1400,403	-0,726	-0,019	40,307
				c3_01000	644413,750	4447337,234	1399,589	-1,947	-0,345	39,943
1001	5		1,7282	c0_01001	644276,811	4447043,295	1384,980	1,159	2,214	-143,212
				c1_01001	644210,066	4447085,166	1389,398	-0,545	-0,723	-143,708
				c2_01001	644242,552	4447097,368	1384,961	0,075	-0,124	36,294
				c3_01001	644309,445	4447162,471	1386,392	-2,581	2,553	36,085
1002	5	si	0,764	c0_01002	64407,582	4446917,258	1373,751	-2,560	-0,747	-136,605
				c1_01002	644059,830	4446905,384	1371,534	-1,947	-1,591	-136,968
				c2_01002	644137,057	4446933,112	1372,707	-1,869	0,939	42,920
				c3_01002	644161,818	4446925,413	1374,190	-1,649	2,025	42,504
1027	5		1,469	c0_01027	644244,071	4447770,746	1425,470	-1,010	-3,837	-151,459
				c1_01027	644219,291	4447696,363	1405,852	2,066	-4,976	-151,829
				c2_01027	644265,238	4447818,024	1439,000	-1,941	-3,959	28,147
				c3_01027	644377,069	4447745,244	1441,037	0,873	0,474	28,148
1028	4		1,6589	c0_01028	644249,018	4447523,751	1422,652	0,130	3,717	-151,796
				c1_01028	644180,878	4447527,195	1414,211	0,031	0,935	-151,972
				c2_01028	644251,422	4447545,648	1409,500	0,273	2,781	27,746
				c3_01028	644281,251	4447535,292	1411,588	0,619	4,044	27,307
1029	5		1,9273	c0_01029	643947,641	4447279,989	1430,218	0,981	0,419	-143,669
				c1_01029	643901,695	4447264,501	1426,737	1,704	-1,583	-143,960
				c2_01029	643948,227	4447269,752	1429,381	2,580	-0,523	35,799
				c3_01029	644016,488	4447261,720	1429,421	2,831	2,201	35,435
1043	4		1,1148	c0_01043	644055,577	4447811,479	1382,747	1,329	-3,007	-144,921
				c1_01043	644113,091	4447882,092	1402,872	-1,458	-0,883	-145,284
				c2_01043	644172,622	4447913,485	1396,760	-1,616	0,685	34,826
				c3_01043	644207,954	4447882,520	1396,825	-0,466	2,200	34,362
1058	6		1,9076	c0_01058	643642,112	4447625,607	1432,589	-6,664	-1,073	-128,897
				c1_01058	6435921,226	4447599,246	1435,687	-5,523	-3,207	-129,457
				c2_01058	643644,878	4447645,313	1427,858	-6,105	-1,568	50,656
				c3_01058	643677,995	4447662,245	1427,150	-6,841	-0,245	50,383
1060	4		0,7694	c0_01060	643351,286	4447166,766	1405,663	-1,897	1,684	-147,467
				c1_01060	643214,529	4447394,943	1339,111	-1,142	-4,114	-148,182
				c2_01060	643366,873	4447154,064	1407,142	-0,310	1,300	31,979
				c3_01060	643405,700	4447143,992	1406,927	0,016	2,893	31,582
1061	5		1,2194	c0_01061	643187,708	4446972,836	1404,888	-1,815	1,287	-147,120
				c1_01061	642927,830	4446914,020	1385,001	0,536	-9,584	-147,706
				c2_01061	643040,628	4446968,768	1398,362	-0,564	-5,762	32,821
				c3_01061	643064,700	4446952,463	1403,495	0,009	-4,705	32,655

1078	5		0,7204	c0_01078	642845,404	4447333,751	1429,987	-3,972	0,801	-134,510
				c1_01078	642861,444	4447359,665	1417,470	-4,897	1,252	-134,889
				c2_01078	642896,085	4447323,965	1423,468	-2,235	2,089	44,768
				c3_01078	642928,797	4447324,841	1424,451	-2,415	3,528	44,476
1079	5		1,0243	c0_01079	642757,624	4447014,973	1429,745	0,614	3,020	-125,286
				c1_01079	642722,031	4446992,755	1429,027	1,682	1,485	-125,859
				c2_01079	642769,032	4446994,820	1427,599	2,942	3,026	54,113
				c3_01079	642790,395	4447012,470	1426,711	2,143	3,970	53,937
1081	4	si	1,1812	c0_01081	642502,926	4446471,008	1409,516	-0,014	4,287	-143,088
				c1_01081	642570,350	4446564,215	1395,956	-3,627	6,723	-143,152
				c2_01081	642533,777	4446555,030	1400,040	-2,150	4,528	36,512
				c3_01081	642558,638	4446583,814	1396,442	-3,427	5,571	36,261
1085	7		1,3828	c0_01085	641849,196	4445578,194	1413,365	-0,431	1,409	-138,782
				c1_01085	641791,276	4445548,628	1411,158	0,843	-1,118	-139,259
				c2_01085	641877,182	4445571,302	1419,248	1,120	1,635	40,434
				c3_01085	641901,311	4445569,295	1416,767	1,100	2,721	40,281
1088	5		0,8075	c0_01088	641364,065	4444895,766	1417,491	-0,079	-0,752	-138,221
				c1_01088	641368,299	4444836,030	1413,697	2,367	-0,855	-138,489
				c2_01088	641348,935	4444904,602	1418,167	0,804	-2,246	41,314
				c3_01088	641386,121	4444897,380	1421,157	0,968	-0,727	40,800
1089	5		0,7928	c0_01089	641201,554	4444623,129	1422,246	-0,544	-1,295	-138,689
				c1_01089	641187,002	4444565,255	1415,838	1,874	-2,062	-139,118
				c2_01089	641231,768	4444650,898	1423,518	-0,353	-0,937	40,689
				c3_01089	641264,783	4444626,093	1424,476	0,523	0,442	40,400
1090	6		0,6728	c0_01090	641074,111	4444430,906	1421,322	-1,248	2,053	-139,784
				c1_01090	641036,869	4444443,415	1416,236	-1,661	0,378	-140,241
				c2_01090	641016,327	4444373,299	1421,321	0,224	1,390	39,564
				c3_01090	641113,465	4444415,583	1419,976	0,491	2,805	39,179
1091	5		1,0603	c0_01091	642944,206	4448016,038	1392,430	-6,919	0,840	-134,949
				c1_01091	642922,568	4448010,463	1392,905	-6,534	-0,243	-135,563
				c2_01091	643001,446	4447992,992	1392,496	-4,644	2,454	44,283
				c3_01091	643032,915	4447989,897	1394,920	-4,596	3,720	44,118
1099	7		1,3374	c0_01099	641800,696	4446145,843	1411,414	1,421	-1,181	-137,814
				c1_01099	641768,526	4446079,483	1397,532	4,228	-2,654	-138,216
				c2_01099	641816,116	4446100,045	1401,798	4,615	-1,347	41,868
				c3_01099	641853,234	4446076,741	1401,138	5,478	0,226	41,537
1100	9		0,974	c0_01100	641614,562	4445993,566	1412,214	-1,127	0,743	-138,431
				c1_01100	641573,937	4445851,398	1396,849	4,748	-1,041	-138,798
				c2_01100	641663,024	4445869,788	1399,982	5,242	1,979	41,179
				c3_01100	641688,766	4445821,043	1390,693	7,169	3,064	40,835
1101	5		1,1506	c0_01101	641604,799	4445536,707	1381,837	5,622	6,429	-137,005
				c1_01101	641536,677	4445528,346	1385,233	5,993	3,503	-137,317
				c2_01101	641557,763	4445564,618	1387,197	5,773	3,691	42,434
				c3_01101	641525,845	4445693,363	1398,571	0,367	2,395	42,392
1104	5		1,226	c0_01104	640949,522	4444973,060	1405,107	-3,060	1,815	-141,856
				c1_01104	640952,572	4444938,922	1407,380	-1,645	1,701	-142,301
				c2_01104	641032,695	4444953,441	1403,663	-1,124	4,189	37,494
				c3_01104	641044,572	4444927,701	1405,318	-0,223	4,710	37,021
1105	5		1,1617	c0_01105	640807,087	4444757,193	1405,784	-3,084	4,177	-139,755
				c1_01105	640800,895	4444738,294	1405,143	-2,204	3,748	-140,238
				c2_01105	640836,561	4444739,049	1403,819	-1,030	4,494	39,512
				c3_01105	640846,647	4444739,666	1404,405	-1,158	4,981	39,133

7. CONCLUSIONI

L. Giordano, P. Menegoni, G. Schino, C. Trotta

Nel corso di questo lavoro abbiamo applicato le tecniche del telerilevamento satellitare allo studio della vegetazione naturale in ambiente mediterraneo, allo scopo di sviluppare metodi di studio in grado di fornire una visione sinottica delle problematiche ambientali e di acquisire informazioni sulla risposta degli ecosistemi mediterranei ai cambiamenti climatici.

Tre sono le principali conclusioni di questo studio:

1. Le metodologie attuali consentono solo in misura limitata l'extrapolazione temporale dei modelli predittivi sviluppati sulla base di un determinato insieme di dati satellitari. Esiste quindi una fortissima priorità scientifica per lo sviluppo di metodologie che consentano una migliore stima quantitativa di variabili biofisiche a partire da dati telerilevati e con un ridotto uso di dati di calibrazione da raccogliere a terra.
2. L'utilizzo di tecniche di analisi di immagini satellitari ad elevato dettaglio risulta di estremo interesse per la mappatura di tipologie di vegetazione mediterranee complesse, di mosaici articolati, di strutture con fisionomie apparentemente molto simili. La realizzazione di mappe di *stato* della componente vegetazionale del territorio o dei paesaggi è determinante nell'analisi di trend dinamici naturali o procurati da fattori antropici specifici. La valutazione delle *pressioni* in funzione di determinate attività e delle *risposte* in ragione di programmazioni gestionali specifiche può essere validamente verificata utilizzando la vegetazione nelle sue componenti strutturali o funzionali come indicatore di qualità e cambiamento, avendo questa le importanti capacità di adattarsi agli stress (entro specifici limiti) ma anche di mantenerne la memoria.
3. Gli ecosistemi naturali mediterranei rispondono in maniera complessa e non facilmente prevedibile ai cambiamenti climatici. In particolare, le tipologie di risposta caratteristiche degli ecosistemi posti a latitudini medio-alte sembrano differire da quelle degli ecosistemi posti a latitudini più basse. Anche in questo caso quindi una priorità scientifica maggiore dovrà essere data al tentativo di colmare il divario di informazioni esistente a proposito delle risposte dei diversi ecosistemi ai cambiamenti climatici.

Sebbene questo studio abbia contribuito in maniera sostanziale al progresso verso la soluzione dei problemi evidenziati qui sopra, è auspicabile che ulteriori sforzi vengano fatti in questa direzione, in maniera da consentire una migliore capacità di previsione e di adattamento alle sfide imposte dai cambiamenti globali che attendono le future generazioni.

**STUDIO DELLA VEGETAZIONE TRAMITE TECNICHE DI
BIOLOGIA MOLECOLARE**

8. UN APPROCCIO MOLECOLARE ALLA DESERTIFICAZIONE: STUDIO IN GRANO DURO DI GENI CORRELATI ALLO STRESS IDRICO

P. Galeffi, C. Cantale, G. Cavicchioni, D. Chiaretti, A. Latini, E. Palmieri, C. Rasi, M. Sperandei

8.1 Introduzione

Negli ultimi anni le variazioni climatiche del pianeta hanno aperto nuovi campi di investigazione scientifica ovvero hanno fornito ulteriore enfasi ed urgenza a settori già studiati, come la selezione genetica di specie agricole. Su una base globale, la siccità (intesa sia come carenza nell'atmosfera che nel suolo) in congiunzione con il contemporaneo innalzamento della temperatura e dell'irraggiamento, pone i più importanti limiti ambientali alla sopravvivenza delle piante e alla loro produttività.

Una migliore comprensione degli effetti della siccità sulle piante è vitale per migliorare sia le pratiche agricole, in relazione ad un ottimale utilizzo delle risorse idriche, sia gli sforzi di incrocio e selezione dei "breeders" per ottenere varietà sempre più adattate alle mutate situazioni climatiche.

Molto lavoro in questo campo è stato fatto negli ultimi venti anni per individuare le strategie usate dalle piante per controllare il bilancio idrico e i processi fisiologici e biochimici alla base delle risposte in condizioni di deficit idrico e di stress ossidativo. Grandi progressi sono anche stati fatti sull'interpretazione delle relazioni tra struttura e funzione delle foglie e morfologia delle radici in carenza di acqua. Gli strumenti della biologia molecolare e i progetti di genomica, per il sequenziamento completo di alcune specie vegetali, hanno fortemente contribuito ai grandi progressi che sono stati compiuti nella comprensione dei meccanismi molecolari che sono alla base della risposta fisiologica delle piante allo stress abiotico (salinità, freddo e carenza di acqua).

Il quadro che si va delineando è molto complesso, un network in cui sono coinvolte molte vie metaboliche interconnesse a vari livelli, basato su centinaia di geni con attività sia funzionale (per la produzione di proteine che servono a proteggere le cellule dalla disidratazione o dal cambiamento di temperatura) che regolatoria dell'attività di altri geni.

I percorsi che permettono di partire da meccanismi molecolari, che sono alla base, ed arrivare alle risposte della pianta nel suo insieme, che sono l'effetto finale, sono estremamente complessi. Ad esempio, il potenziale idrico della pianta disidratata può tornare al suo valore ottimale per mezzo di fattori che agiscono nel ristabilire il giusto equilibrio osmotico.

Una risposta generale delle piante allo stress riguarda il cambiamento nel metabolismo primario. Gli enzimi che partecipano al metabolismo degli zuccheri sono critici nella tolleranza alla disidratazione.

Un accumulo di osmoliti, per la maggior parte zuccheri ed altri soluti compatibili, rappresenta una modalità comune di adattamento allo stress idrico. Canali ionici ed idrici regolano il flusso d'acqua, e il coinvolgimento di questi canali nella risposta allo stress è supportato dall'isolamento di geni codificanti per proteine-canale (acquaporine). Molte delle proteine coinvolte nei meccanismi di risposta allo stress sono proteasi, necessarie sia per demolire altre proteine, che sono state irrimediabilmente danneggiate dagli effetti dello stress, sia per riparare quelle ancora utilizzabili.

Altri enzimi servono a rimuovere intermedi tossici del metabolismo ossidativo, spesso risultato della chiusura degli stomi sulle foglie per ridurre la perdita di acqua, con conseguente accumulo di composti tossici dell'ossigeno. Inoltre sono coinvolti complessi sistemi chimici ed idraulici correlati alla percezione dello stimolo, la trasmissione del segnale di stress fino all'attuazione delle varie risposte.

Nelle Figure 8.1 e 8.2 sono descritti due schemi che riassumono alcuni dei fenomeni legati alla risposta della pianta allo stress idrico sia a livello di pianta intera, sia a livello molecolare [1]. Nonostante tutte le conoscenze che si vanno accumulando, la comprensione dei meccanismi fisiologico-molecolari alla base della risposta delle piante ai cambiamenti del loro habitat naturale è ancora insufficiente.

Dall'analisi delle variazioni ambientali del territorio italiano sono emerse aree particolarmente vulnerabili ai cambiamenti climatici, che ospitano colture agricole importanti per la nostra alimentazione e per l'economia. È pertanto rilevante l'ottenimento di nuove varietà di tali specie, come il grano duro, che siano in grado di adattarsi sempre meglio ad importanti cambiamenti climatici e a situazioni ambientali estreme, come il deserto.

A tale fine, in questa parte del lavoro relativo al WP 2.4, abbiamo condotto in grano duro uno studio molecolare di quei geni che a vario livello sono coinvolti nella risposta della pianta alle varie sollecitazioni ambientali e climatiche, quali le alte temperature, la siccità, l'alta salinità.

In particolare è noto in letteratura [2,3,4] che i geni DREB, isolati per la prima volta in *Arabidopsis t.*, risultano essere geni-chiave nella risposta allo stress idrico, alla elevata salinità ed al freddo. I geni DREB codificano per fattori di trascrizione che controllano l'espressione di vari altri geni che attivano la "tolleranza" agli stress abiotici, con meccanismi in cui può essere o meno coinvolto l'acido abscissico (ABA). Abbiamo pertanto cercato ed isolato geni DREB-omologhi in diversi genotipi di grano duro.

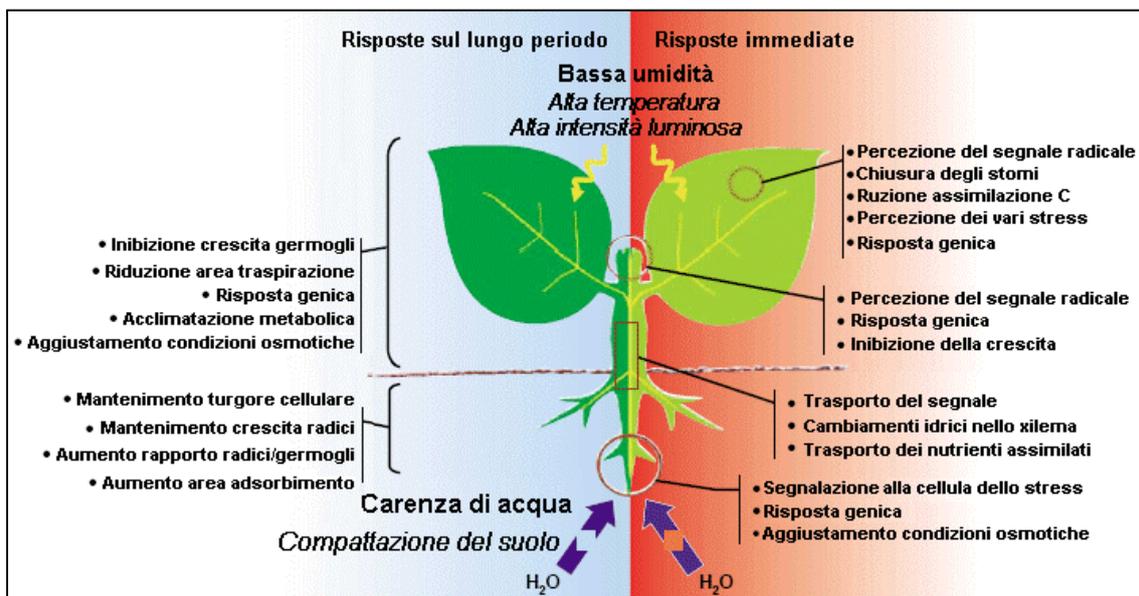


Figura 8.1 – Risposte della pianta nel suo insieme allo stress idrico (tratto da [1])

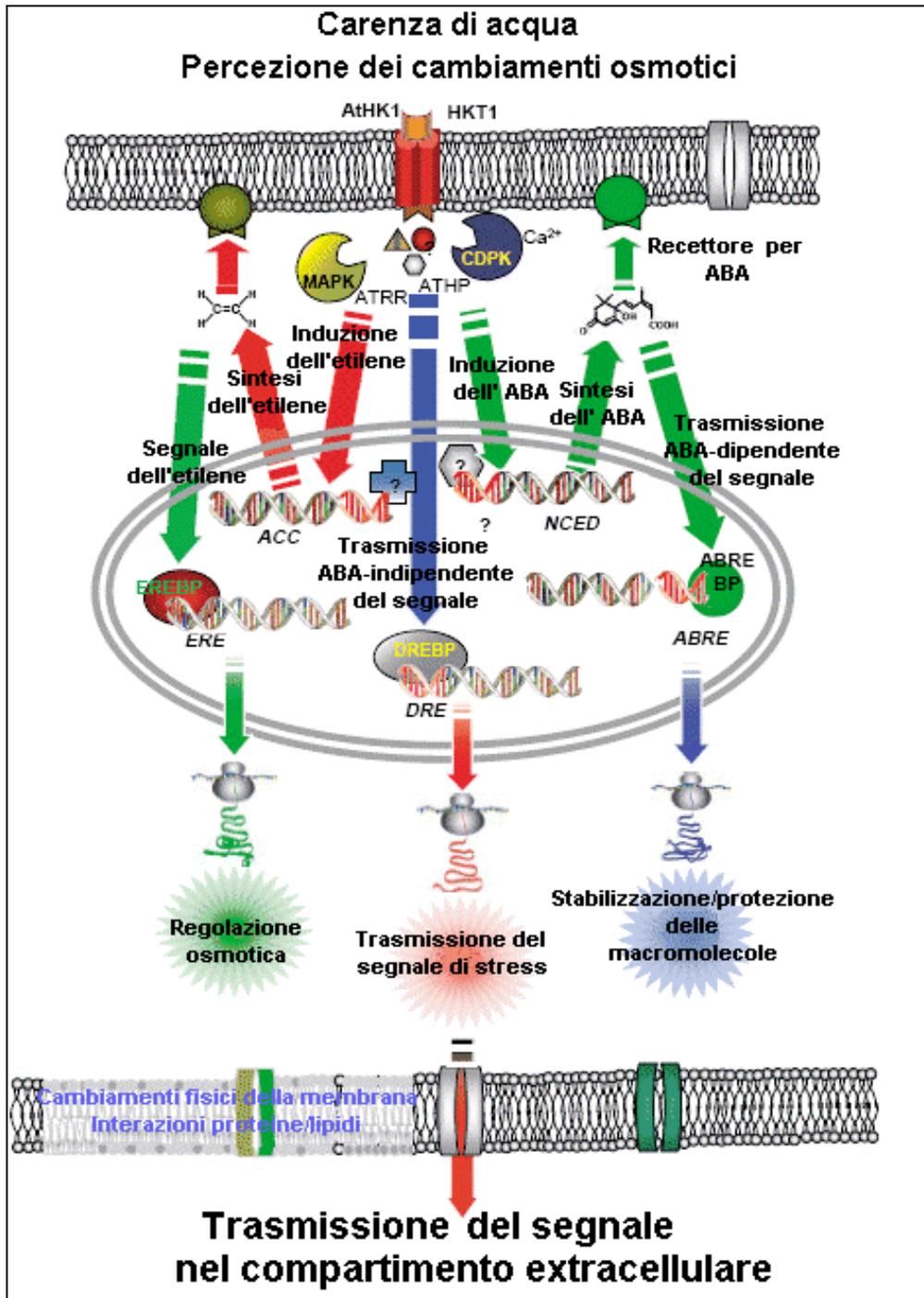


Figura 8.2 – Percezione dello stimolo, trasmissione del segnale e risposta a livello cellulare allo stress idrico (tratto da [1])

8.2 Materiali e metodi

Tutte le attività sperimentali si sono avvalse di diverse tecniche biochimiche e biomolecolari, come il sequenziamento del DNA, il clonaggio, l'amplificazione tramite PCR, etc., congiuntamente a quelle del breeding tradizionale di valutazione morfometriche, fisiologiche e agronomiche in campo e di incrocio e selezione.

La parte sperimentale si è articolata nelle seguenti fasi:

- saggiare a livello molecolare genotipi interessanti (già preliminarmente saggiati al punto zero del progetto) in condizioni di serra controllata con esperimenti di stress idrico per selezionarne i più promettenti.
- saggiare lo stesso panel di genotipi analizzati in serra in campi sperimentali
- analisi del trascrittoma di questi genotipi di grano duro, per l'identificazione e lo studio dei geni DREB-omologhi e di altri geni coinvolti nella risposta allo stress idrico.

8.2.1 Materiale biologico vegetale

Le varietà di grano duro italiano esaminate in questo lavoro sono: Creso, Ciccio, Colosseo, Cannizzo, Simeto, Duilio, Gianni, Atil C2000, Karalis e Vitromax. È stata anche saggiata una varietà di triticale, Pollmer TCL 2003 ed una linea sperimentale di grano tenero, il giallo-verde. Queste varietà di grano duro sono state scelte tra quelle disponibili sul mercato e sono tra le più ampiamente diffuse, presentando una produttività e dei tratti qualitativi molto interessanti, ovvero sono particolarmente interessanti perchè segnalate tra quelle ad alte rese e più tolleranti alla siccità. In particolare, la cultivar Creso, costituito presso l'ENEA e registrato in Italia nel 1975, ha rappresentato nel nostro paese la più importante cultivar per almeno 20 anni; attualmente rappresenta circa il 20% di tutta la produzione nazionale di grano duro. Il Creso si caratterizza per il suo ciclo tardivo, la taglia bassa e soprattutto per la sua alta potenzialità produttiva, che si mantiene costante anno dopo anno. Inoltre, le caratteristiche dei suoi grani permettono la produzione di una pasta di buona qualità. Ciascuna delle varietà di grano duro esaminate possiede un diverso grado di tolleranza allo stress idrico e differenti caratteristiche biometriche e fenologiche. In Tabella 8.1 sono elencate qualità di importanza agronomica di alcune delle varietà di grano duro selezionate.

8.2.2 Crescita delle piante e simulazione dello stress in serra controllata

I semi di grano sono stati messi a germinare e, dopo una settimana, i semenzali sono stati trapiantati in terra e posti in serra, in condizioni controllate di luce, temperatura e ventilazione (16 ore di luce al giorno, temperatura costante di 25 °C) e sono state irrigate quotidianamente a saturazione (vedi Figura 8.3). Dopo 5-6 settimane dalla germinazione la maggior parte delle piante aveva spigato (1-3 spighe a seconda del numero degli steli, ogni stelo presenta 6-8 foglie) e venivano sottoposte all'esperimento di stress idrico.

Nella scelta del protocollo di stress si è voluto utilizzare condizioni il più possibile correlate allo stress idrico in campo e pertanto si è messo a punto un protocollo in cui il tempo è misurato in giorni, a differenza di altri esperimenti presenti in letteratura che analizzano le risposte allo stress in tempi molto più brevi, minuti e/o ore.

Si è definito "tempo zero" (T0) l'ultimo giorno in cui le piante hanno ricevuto acqua. Da questo momento in poi non si è più somministrata acqua alle piante da sottoporre a stress e, seguendo il protocollo stabilito (T0, 2 g, 4 g, 7 g e 10 g di stress idrico), vari campioni di foglie sono stati raccolti ed immediatamente congelati in azoto liquido. Generalmente la pianta risultava praticamente morta tra l'8° e il 10° giorno di stress.

Parallelamente un analogo numero di piante che costituiva il controllo negativo, ha continuato ad essere annaffiato tutti i giorni.

Tabella 8.1 – Varietà di grano duro italiano utilizzate negli esperimenti: genealogia e tratti qualitativi interessanti da un punto di vista agronomico

Varietà	Genealogia	Ciclo Vegetativo	Accestimento	Taglia	Produttività	Contenuto Proteico	Allettamento
CRESO	CpB 144 x [(Yt54-N10-B), Cp ² 63 Tc ³]	tardivo	elevato	elevato	buona	buono	resistente
CICCIO	F6 (Appulo x Valnova) x F5 (Valforte x Patrizio)	precoce	basso	basso	ottima	medio	suscettibile
COLOSSEO	mutante Mexs x Creso	medio	buono	buono	buona	buono	mediamente resistente
CANNIZZO	N D	precoce	N D	N D	N D	N D	N D
SIMETO	Capeiti8 x Valnova	Medio precoce	basso	basso	buona	buono	resistente
DUILIO	Cappelli x (Anhinga x Flamingo)	precoce	elevato	elevato	buona	buono	mediamente resistente
GIANNI	incroci di genotipi turchi e varietà italiane	precoce	elevato	elevato	buona	scarso	resistente
GIALLO VERDE	mutante di laboratorio Cappelli x grano tenero	?	?	?	?	?	?

(ND: non disponibile)

(<http://www.cerealcoltura.it>; <http://meteo.regione.marche.it/agrometeo/notizie/granoduro.htm>).



Figura 8.3 – Serra controllata presso il centro ENEA Casaccia



Figura 8.4 – (a) Confronto tra due piante di DUILIO, a sinistra, il controllo negativo è sempre stato abbondantemente irrigato, mentre a destra, la pianta al 7° giorno di stress. (b) Aspetto sofferente di una pianta di CRESO al 7° giorno di stress

Sono state utilizzate almeno 10 piante per cultivar.

In Figura 8.4a-b sono mostrati materiali vegetali ottenuti nel corso degli esperimenti.

Le foglie raccolte venivano congelate intere in provette singole oppure triturate in aliquote di 100 mg e poi conservate sempre a -80°C

8.2.3 Estrazione di RNA totale, purificazioni e amplificazione

Il tessuto fogliare è stato triturato in azoto liquido con mortaio e pestello e successivamente l' RNA totale veniva estratto utilizzando il kit "RNAfastTM-II (RNA isolation system)" di M-Medical. Si sono così ottenuti campioni di RNA totale purificato dagli altri componenti del tessuto fogliare. Eventuali contaminazioni residue di DNA venivano eliminate con un trattamento di enzima DNASI I e la qualità dell'RNA totale estratto veniva controllata dal punto di vista dell'integrità e la sua concentrazione misurata al biofotometro.

Un' ulteriore purificazione permetteva di isolare solo gli mRNA, necessari per analisi più precise di quantificazione dei trascritti.

8.2.4 Selezione dei primer ed esperimenti di amplificazione *rt-pcr*

Nel database "TIGR Wheat (*Triticum aestivum*)" contenente le sequenze di frammenti genici di grano tenero è stata cercata una sequenza simile a quella del gene AtDREB2A (un fattore di trascrizione indotto da disidratazione in *Arabidopsis thaliana*).

Questa sequenza (numero d'accesso: TC85717) è stata utilizzata come template per selezionare, con il programma software "GENE FISHER", in <http://bibiserv.techfak.uni-bielefeld.de/genefisher/>, i seguenti primer (sintetizzati da M-Medical):

drebfor1: 5'CATGACGGTAGATCGGAA3'	(18 nucleotidi, Tm: 53.7°C)
drebfor2: 5'ATGATCCACAGGGTGCAA3'	2
drebfor3: 5'CTGAAATTCGGGAGCCAA3'	2
drebrev1: 5'TGCACAGGGAAGTTGGTA3'	2
drebrev2: 5'GCTCCCGAATTCAGCAA3'	2

Il corretto appaiamento dei primers sul template è stato verificato mediante il software "AMPLIFY" che fornisce anche lo schema dei frammenti attesi. Le reazioni di RT-PCR sono state eseguite utilizzando il kit "puReTaq Ready-To-Go RT-PCR Beads" di Amersham. Al termine della reazione il prodotto viene esaminato su gel d'agarosio al 2% e il cDNA delle bande d'interesse viene purificato e successivamente sequenziato tramite il kit "GFX PCR DNA and Gel Band Purification Kit" di Amersham.

Le reazioni di MULTIPLEX RT-PCR sono state eseguite sempre con il kit "puReTaq Ready-To-Go RT-PCR Beads" di Amersham.

8.2.5 Analisi bioinformatica delle sequenze

Sono stati usati database specifici dei geni di grano: Plant Genome Database (http://www.plantgdb.org/triticum_aestivum.html), TIGR wheat gene index (http://www.tigr.org/tigr-scripts/tgi/T_index.cgi?species=wheat) e KOMUGI Integrated Wheat Science database (<http://www.shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/top/top.jsp>).

BLAST (<http://www.ebi.ac.uk/blast2/index.html>) è stato utilizzato per esaminare e confrontare le nostre sequenze.

Il software ClustalW è stato utilizzato per allineare le sequenze nucleotidiche e amminoacidiche.

8.2.6 Esperimenti di Real-time RE-PCR

L' RNA viene estratto dalle foglie usando il kit RNAfast™-II Isolation System (Molecular System, San Diego/CA) and viene retro-trascritto con oligo d(T)16 utilizzando il kit TaqMan® Reverse Transcription (Applied Biosystems).

Gli esperimenti di Real-time RT-PCR quantitativa sono stati realizzati con lo strumento ABI PRISM 7000 SDS (Applied Biosystems) utilizzando la tecnologia basata sulla probe TaqMan® MGB. Primers e probes per selezionare e quantificare i tre diversi trascritti sono stati selezionati tramite il software Assay-By-Design (Applied Biosystems). Le seguenti coppie, ciascuna con il suo probe, sono state individuate per i tre frammenti:

Primers FOR:

drf1.1for: 5' GCAAACCCCAAGGGAGATG 3',
 drf1.2for: 5' AGAACTTGTGGAGCAGAGGAAAG 3'
 drf1.3for: 5' GCCGCACCCTTCGAGAT 3'.

Primers REV:

drf1.1rev: 5' GTGATCTCCGAGGTCGCTTTT 3',
 drf1.2rev: 5' CTCCGAGGTCGCTTTTCCTA 3',
 drf1.3rev: 5' CAGAGACTGAATTAGGCCCATCAC 3'.

TaqMan® Probe:

drf1.1probe: 5' CCTGTGCCATCTATTCTG 3',
drf1.2probe: 5' TCATGTTCTCGTCAAACCAA3',
drf1.3probe: 5' CAGCCTGGAAGGAAA3'.

Ciascuna probe include il FAM (490 nm) reporter dye al 5' terminus e un Non Fluorescent Quencher (NFQ) al 3' terminus. La lunghezza attesa dei tre ampliconi è rispettivamente 68nt, 72nt e 85nt.

In ciascuna reazione RT-PCR veniva usato un volume finale di 20 µl con 2,2 µl di cDNA (25, 50, 150 e 250 ng provenienti dall'RNA retrotrascritto), 10 µl di 2X TaqMan® PCR MasterMix (Applied Biosystems, USA) and 1 µl di 20X TaqMan® Gene Expression Assay (Applied Biosystems, USA). Sono state utilizzate le consuete condizioni di ciclo termico. Quantità diverse di RNA totale (25, 50, 150 and 250 ng) sono state testate per ogni trascritto ad ogni tempo (0, 4 e 7 giorni) per ciascun trascritto per determinare l'efficienza dell'amplificazione. Tutte le reazioni e i controlli sono stati condotti in triplicato.

Le analisi dei risultati di ogni corsa di PCR sono state condotte seguendo le istruzioni del produttore: i dati RT-PCR vengono graficati come variazione del segnale della fluorescenza R_n (ΔR_n) verso il numero di cicli. L'utilizzo del segnale a $T=0$ come riferimento ci ha permesso di avere delle quantificazioni relative.

Il livello di espressione dei tre trascritti è stato misurato utilizzando il valore del C_t medio (Threshold Cycle). L'efficienza di amplificazione è stata calcolata dal coefficiente angolare (m) della retta che si ottiene diagrammando i valori di C_t in funzione delle quantità di RNA iniziale utilizzato (25, 50, 150 and 250 ng), seguendo la seguente equazione: $E_x = 10^{(-1/m)} - 1$ [5].

8.3 Risultati

8.3.1 RT-PCR con i primer *drebfor1* e *drebrev1*

Numerose piante di grano per ciascuna varietà sono state analizzate tramite RT-PCR a tempi diversi dello stress idrico (T_0 , 4 g e 7g). Sulla base dello schema di frammenti attesi, una PCR con primer *drebfor1* e *drebrev1* avrebbe dovuto produrre una banda unica di 449bp. Invece in tutte le piante analizzate, il principale prodotto della reazione è un frammento di ≈ 500 bp e, nei casi in cui si ottiene il frammento di 449bp, esso compare sempre come la banda meno intensa di un doppietto. Più raramente è stato ottenuto un tripletto centrato a 500bp, con una banda maggiore di circa 590bp. Un esempio dei risultati è mostrato in Figura 8.5.

Sono stati analizzati anche diversi campioni fogliari raccolti da una pianta nello stesso giorno di stress idrico, allo scopo di rilevare variazioni di espressione genica in foglie diverse di una stessa pianta. In questo tipo di esperimenti, non è stata rilevata nessuna variabilità di espressione tra una foglia basale, una foglia media e una foglia bandiera.

Esperimenti sono anche stati condotti con una tecnica più sensibile, la MULTIPLEX, utile per definire meglio il pattern dei frammenti e per evidenziare possibili fenomeni di amplificazioni aspecifiche. Gli esperimenti hanno confermato i risultati precedentemente ottenuti, evidenziando anche che i pattern di amplificazione, in differenti momenti del "time-course", mostrano delle variazioni che giustificano un cambiamento quantitativo dell'espressione del gene in esame durante lo stress.

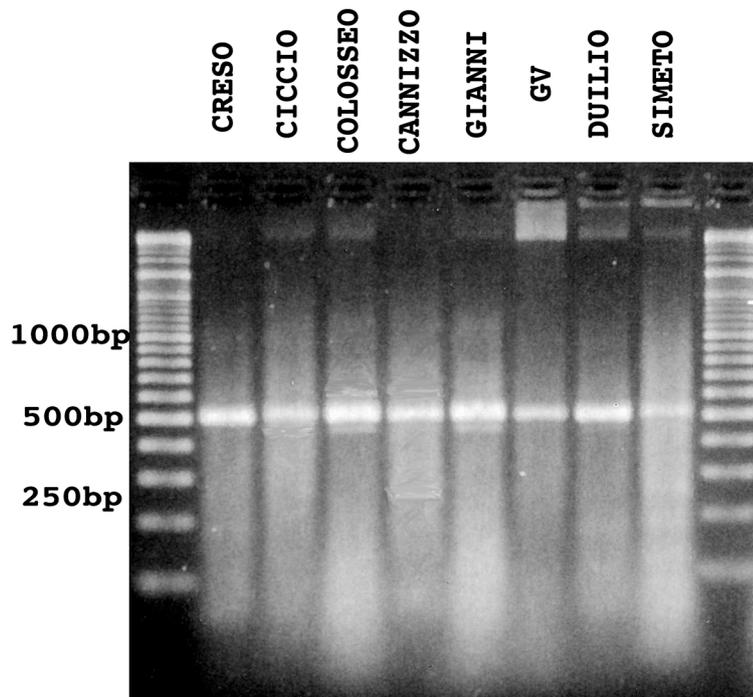


Figura 8.5 – RT-PCR di foglie di grano duro analizzate al 4°giorno di stress idrico. Primer *drebfor1* e *drebrev1*. Gel d'agarosio 2,5%. In ciascuna lane sono stati caricati 18 μ l di RT-PCR. In Colosseo si può osservare la presenza del "tripletto", costituito dalla banda centrale predominante di \approx 500bp, dalla banda di \approx 450bp e dalla banda a \approx 590bp

8.3.2 Analisi genetica

Dagli esperimenti di "time-course" RT-PCR sono state selezionate alcune bande ed il corrispondente DNA è stato purificato e sequenziato. L'analisi delle sequenze è stata realizzata con "tools" bioinformatici.

L'allineamento delle sequenze nucleotidiche ottenute dai frammenti di \approx 500bp delle otto varietà di grano duro mostra un'identità tra di esse quasi completa (vedi Figura 8.6).

Le sequenze nucleotidiche sono state anche tradotte in sequenze amminoacidiche ed i tradotti di ciascuna varietà sono stati allineati tra di loro. Ciascun tradotto è costituito di soli 68 amminoacidi (short ORF), infatti la 69a tripletta in frame codifica per un codone di stop. Nella regione ammino-terminale della sequenza proteica è presente uno "stretch" di 7 alanine. In Colosseo e Duilio manca un'alanina, per cui essi hanno la sequenza proteica (e la corrispondente nucleotidica) più corta di un amminoacido rispetto a tutte le altre varietà di grano studiate (vedi Figura 8.7).

L'identità quasi "assoluta" tra queste sequenze suggerisce che questo frammento di \approx 500nt sia un prodotto specifico dello stesso gene in tutte le piante studiate.

L'allineamento tra la sequenza del template di grano tenero usato per disegnare i primers e i prodotti ottenuti negli esperimenti ha evidenziato la presenza di un

frammento di 53nt che non era presente nel templatò e che giustifica la diversa dimensione ottenuta per il frammento (≈ 500 nt contro il 449nt atteso).

Un BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) del breve segmento di 53nt tra tutte le sequenze nei database GenBank ha mostrato un'altissima omologia di sequenza con una regione di un gene di orzo, *HvDRF1*, già correlato allo stress idrico [6]. Questo gene di orzo codifica per un attivatore trascrizionale di tipo AP2 ed i suoi trascritti primari sono sottoposti a splicing alternativo, producendo tre possibili mRNA.

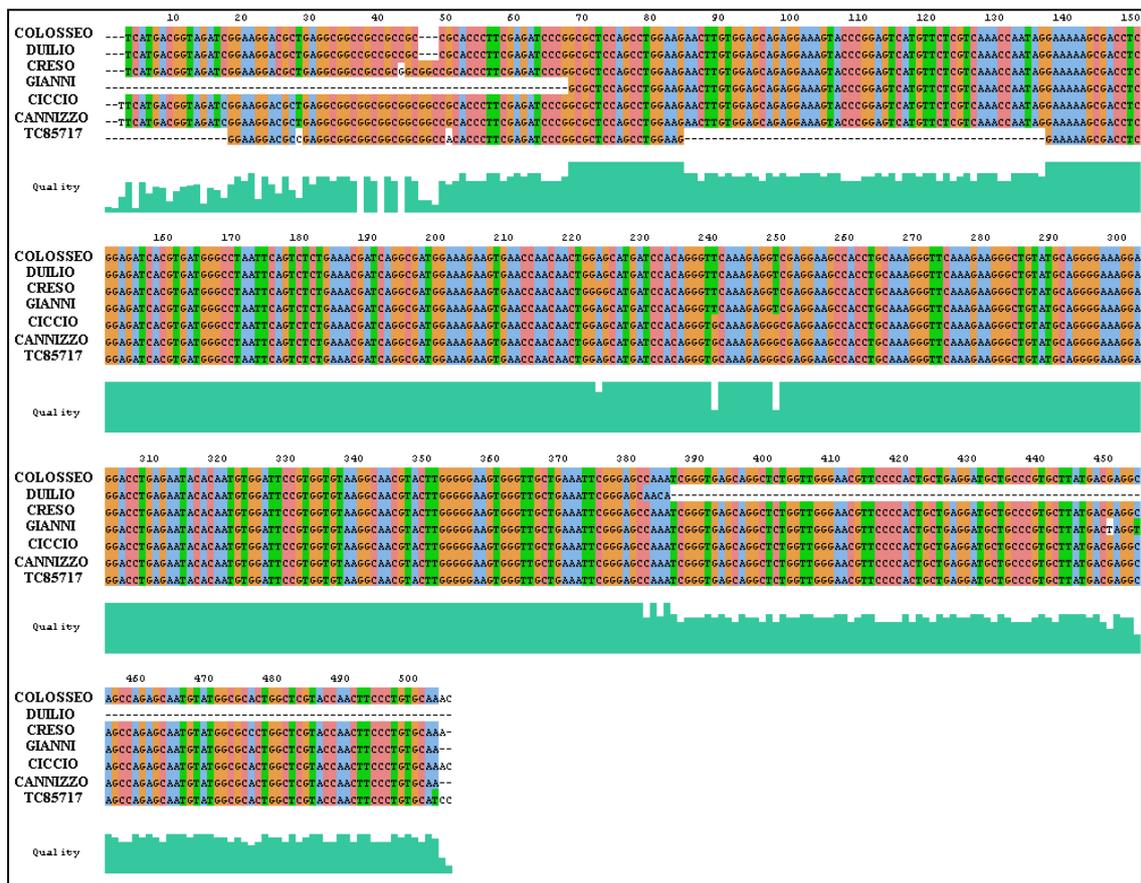


Figura 8.6 – Allineamento nucleotidico delle sequenze della banda ≈ 500 nt nelle cultivar esaminate e della sequenza templatò di grano tenero

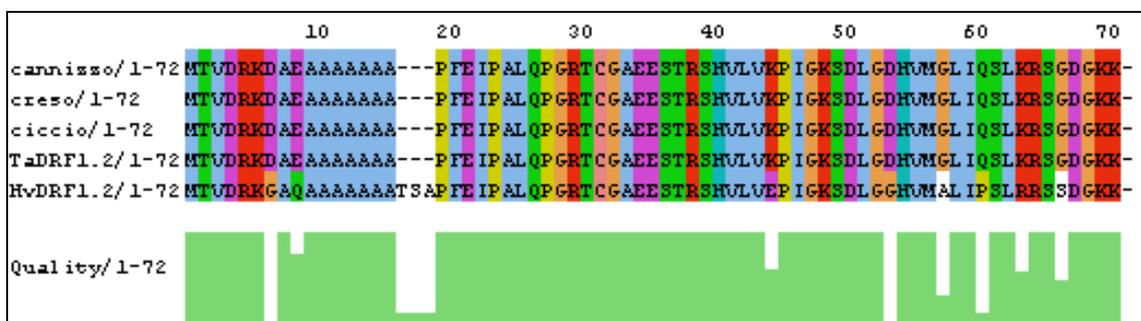


Figura 8.7 – Allineamento proteico della putativa proteina corrispondente alla banda ≈ 500 nt nelle cultivar esaminate, alla sequenza templatò di grano tenero e all'orzo

L'analisi dei nostri dati e delle sequenze ottenute ha rivelato che abbiamo individuato in grano duro il gene *TdDRF1*, appartenente alla famiglia dei geni DREB, omologo al gene *DREB2A* di *Arabidopsis* e al gene *HvDRF1* di orzo con cui condivide lo stesso meccanismo di *splicing* alternativo con la produzione di tre diversi trascritti (corrispondenti alle tre bande osservate). I geni DREB codificano per fattori di trascrizione che controllano l'espressione di vari altri geni che attivano la "tolleranza" agli stress abiotici, con meccanismi in cui può essere, o meno, coinvolto l'acido abscissico (ABA).

È stato effettuato uno studio puntuale della sequenza dei tre trascritti. I tre prodotti di espressione sono diversi. Due di essi sono caratterizzati dalla presenza, nel putativo prodotto proteico, di un segnale di trasferimento nucleare, tramite i quali la proteina viene indirizzata nel nucleo dove si lega al DNA per esercitare la sua funzione di fattore di trascrizione e di un dominio AP2 (caratteristico dei geni DREB) [7] per il riconoscimento del sito di legame sul DNA. Il terzo prodotto si traduce in un putativo prodotto proteico tronco, mancante sia del dominio AP2 che del segnale di trasferimento nucleare, e la cui funzione è ancora sconosciuta.

Tutte le sequenze ottenute durante questo lavoro sperimentale sono state depositate sulla banca mondiale delle sequenze (GenBank).

8.3.3 Risultati della Real-time RT-PCR

Tramite la Real-time RT-PCR abbiamo valutato le quantità di trascritti in funzione del tempo di stress in alcuni genotipi di grano duro scelti tra quelli più resistenti allo stress idrico e in triticale.

La tecnica della Real-time RT-PCR è stata utilizzata con il duplice scopo di amplificare quantità sufficienti dei due trascritti presenti in quantità minori per poterli sequenziare e di verificare e quantificare la relazione tra il profilo di espressione dei tre trascritti e lo stress idrico.

Questo esperimento è stato condotto utilizzando le cultivar di grano duro Ciccio, Atil C2000, Karalis, Vitromax e il triticale Pollmer TCL2003.

Le cultivars Ciccio e Karalis sono state scelte per il loro ben consolidato comportamento nelle zone più aride del sud-Italia, mentre Atil C2000 e Pollmer-TCL 2003 sono cultivars messicane caratterizzate da una buona tolleranza in terreni semiaridi sia in condizioni sperimentali che di produzione commerciale. La cultivar Vitromax, derivata da incroci del genitore Yavaros selezionati per l'adattabilità a terreni semiaridi (Southern Spain, Northern Africa, Turkey, Iran), è caratterizzata da una buona tolleranza allo stress idrico.

Nella Figura 8.8 sono mostrati i valori dell'espressione dei tre trascritti al tempo T=0 e dopo lo stress. Le quantità relative dei tre trascritti sono diverse e *TdDRF1.2* è il più abbondante e il più espresso in qualsiasi condizione, confermando i risultati precedentemente ottenuti con la RT-PCR e la MULTIPLEX. Sia *TdDRF1.2* che *TdDRF1.3* aumentano nettamente dopo 4 giorni di stress e poi diminuiscono a 7 giorni. *TdDRF1.1* è il meno espresso in assoluto, con valori a volte al limite della rivelabilità e con variazioni minime nel tempo. I valori dell'efficienza di amplificazione e la buona riproducibilità dei replicati confermano la validità di questi risultati.

Come si vede in Figura 8.8, nella cultivar Vitromax sia *TdDRF1.2* che *TdDRF1.3* diminuiscono con lo stress. In particolare, la quantità di *TdDRF1.2*, la cui funzione non

è nota, codificando per un prodotto proteico con una terminazione precoce, non diminuisce mai nelle altre cultivar esaminate, e pertanto questo risultato suggerisce che Vitromax usi sistemi genici alternativi per elicitarne la sua risposta allo stress nelle condizioni sperimentali usate. In Atil C2000 si osserva una diminuzione di *TdDRF1.3* e questa è l'unica varietà in cui si osserva un simultaneo lieve aumento di *TdDRF1.1*.

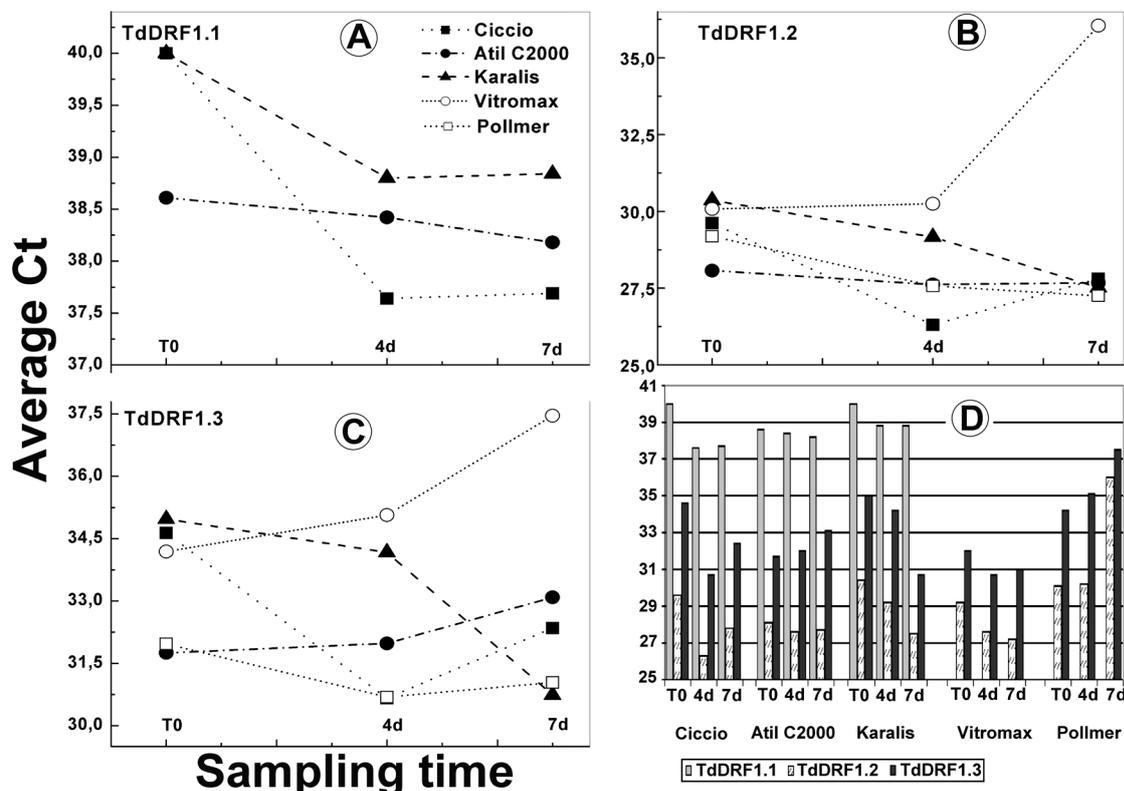


Figura 8.8 – Profili di espressione dei tre trascritti del gene TdDRF1. Pannelli A, B e C: livelli dei trascritti TdDRF1.1, TdDRF1.2 e TdDRF1.3, espressi come media dei valori diCt nelle diverse cultivar a 0, 4 e 7 giorni di stress. Pannello D: livelli dei tre trascritti espressi come valore medio di Ct eraggruoppati per cultivar. I valori diCt sono inversamente proporzionali alla quantità di trascritto presente nel campione

Se possiamo assumere, per analogia con l'orzo, che entrambi i trascritti siano attivatori trascrizionali, questo risultato suggerisce che in Atil C2000 la risposta allo stress si esplica preferenzialmente attraverso l'espressione di *TdDRF1.1*, pur se i livelli estremamente bassi delle variazioni suggeriscono un comportamento genico "pseudo-costitutivo". Nelle altre varietà, *TdDRF1.3* sembra indotto in modo significativo dallo stress, particolarmente in Karalis, che mostra anche un buon aumento di *TdDRF1.1* nel primo periodo di stress.

In conclusione, la cultivar Karalis sembra che risponda allo stress utilizzando molto questo sistema genico e questo risultato è molto significativo, perchè è stato dimostrato che una sovraespressione di geni di tipo DREB, realizzata in piante transgeniche per questi geni, migliora la loro tolleranza allo stress [9,10] in laboratorio, legando così direttamente l'espressione genica con la tolleranza.

8.3.4 Prove in campo sperimentale

Parallelamente allo studio in piante soggette a deidratazione in serra controllata, sono in corso esperimenti in campo con questi e altri genotipi di grano duro per valutare la modulazione dell'espressione di questo gene in condizioni più correlabili a quelle naturali [8]. Tali esperimenti vengono condotti sia in Italia che presso i campi sperimentali del CIMMYT ad Obregon, Messico, nell'ambito di una collaborazione in atto.

In Messico, i campi sperimentali sono situati nella zona desertica al nord ovest, particolarmente adatti per esperimenti controllati in campo. Nella stagione 2004-2005, 13 genotipi di grano duro italiani e messicani e due genotipi di triticale sono stati coltivati in condizioni di piena irrigazione e irrigazione a goccia, ridotta e controllata. Gli esperimenti si sono sviluppati lungo plots di 7 righe di 5 m arrangiate in un blocco completo randomizzato con 3 repliche, sia per l'esperimento di stress che per il controllo. Entrambi i blocchi sono stati gestiti nello stesso modo fino al raggiungimento dello stadio di spiga, momento in cui l'irrigazione è stata ridotta nel blocco sottoposto al trattamento di stress (tempo 0) mentre è continuata in condizioni ottimali nel blocco del controllo positivo.

I campioni sono stati prelevati sia in parcelle irrigate che stressate a distanza di 5 giorni dal tempo 0 e a seguire per circa 2 mesi. La Figura 8.9a-b mostra uno dei blocchi sperimentali in Messico all'inizio dell'esperimento e durante lo stesso.



Figura 8.9 – Campi sperimentali ad Obregon (MX) nella fase di crescita iniziale (a) e di stress (b)

Nella Tabella 8.2 sono elencati le cultivar oggetto dell'esperimento. Un altro esperimento che include anche altri genotipi è tuttora in corso (stagione 2005-2006).

Tabella 8.2 – Genotipi saggiati in campo sperimentale controllato in Messico
(nella tabella sono anche indicati a titolo di esempio i numeri delle varie parcelle nel blocco)

	Colosseo 5003 5045	Ciccio 5002 5044	Liron 5011 5043	Yavaros 5014 5042	Capeiti 6009 5041	Simeto 5008 5040	Cannizzo 5001 5039
Karalis 5010 5031	Atil C2000 5013 5032	GialloVerde 5007 5033	Creso 5004 5034	Duillio 5005 5035	Pollmer 5012 5036	Gianni 5006 5037	Stot 5015 5038

Altri campi sperimentali sono stati realizzati presso l'ENEA Casaccia e presso il CRAS (Centro Regionale Agrario Sperimentale, Sardegna) con l'obiettivo di testare situazioni di campo in ambiente mediterraneo più variabile. Tali esperimenti sono stati invalidati dalla particolare piovosità registrata in Italia tra il 2004 e il 2005.

8.4 Discussione

Le tecniche di biologia molecolare, di genomica e proteomica si inseriscono nel contesto del progetto RIADE come uno strumento di supporto all'agricoltura avanzata per contrastare gli effetti avversi del clima e della desertificazione. La risposta all'ambiente di una pianta, la sua capacità di manifestare tolleranza allo stress è il risultato di un gran numero di strategie diverse che essa mette in atto, eventi che si intersecano e si sommano a comporre un fenomeno estremamente complesso. Gli aspetti molecolari, fisiologici ed agronomici rappresentano piani diversi della stessa problematica, caratterizzati da una diversa dimensione degli oggetti diretti dello studio: il gene, la pianta nel suo complesso e gli ettari di campo coltivato. Da qui una certa difficoltà di comunicazione e di circolazione delle conoscenze, che si è cercato di superare in questo lavoro sperimentale.

La collaborazione con breeder e agronomi, che si è realizzata, ha indirizzato molte delle scelte sperimentali effettuate per il lavoro molecolare, come ad esempio la scelta delle cultivar e il protocollo di stress idrico in serra. Inoltre ha reso possibile l'utilizzo di campioni di materiali biologici da campo per valutazioni di tipo molecolare.

Nel corso di questo lavoro sperimentale, è stato individuato in grano duro un nuovo gene, *TdDRF1*, appartenente alla famiglia dei geni DREB correlati allo stress idrico, omologo al gene DREB2A di *Arabidopsis*, e caratterizzato da un meccanismo di splicing alternativo analogo a quello del gene *HvDRF1* di orzo.

Sono stati analizzati diversi genotipi di grano duro sottoposti a stress idrico simulato in serra controllata, utilizzando condizioni il più possibile correlate allo stress idrico in campo, per individuare una correlazione tra questo gene, lo stress idrico e la cultivar. Poiché è stato confermato che tale correlazione esiste, si può utilizzare questo gene come marcatore per l'identificazione di cultivar tolleranti allo stress idrico.

Sono stati programmati degli incroci di tre cultivar, ognuna caratterizzata da uno specifico pattern di espressione del gene *TdDRF1* (CiccioxAtil C2000, CiccioxKaralis e Atil C2000xKaralis), per approfondire l'impatto dell'espressione di questo gene sia sulle capacità di resistenza che su altre caratteristiche, quali la produttività in situazioni di stress.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Dott. K. Ammar del CIMMYT (MX) e il Dott. M. Dettori del CRAS per il loro importante contributo alla realizzazione di questo lavoro sperimentale.

8.5 Bibliografia

[1] Chaves, M. M., Maroco, J. P., and Pereira, J. S., 2006. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30:239-264.

- [2] Bray, E.A., 2004. Genes commonly regulated by water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana*. *Journal Experimental Botany*, 55:2331-2341.
- [3] Liu, Q., Kasuga, Y., Sakuma, H., Abe, S., Miura, K. and Yamaguchi-Shinozaki K., 1998. Two Transcription factors, DREB1 and DREB2 with an EREBP/AP2 DNA binding domain separate two cellular signal transduction pathways in drought – and low-temperature responsive gene expression, respectively, in *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 10: 1391-1406.
- [4] Nakashima, K., Shinwari, Z.K., Sakuma, Y., Seki, M., Miura, S., Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., 2000. Organization and expression of two *Arabidopsis* DREB2 genes encoding DRE-binding proteins involved in dehydration- and high-salinity-responsive gene expression. *Plant Mol. Biol.*, 42:657-665.
- [5] Rutledge, R.G. and Cote, C., 2003. Mathematics of quantitative kinetic PCR and the application of standard curves. *Nucleic Acids Res*, 31(16 e93):1-6.
- [6] Xue, G.P. and Loveridge, C.W., 2004. HvDRF1 is involved in abscisic acid-mediated gene regulation in barley and produces two forms of AP2 transcriptional activators, interacting preferably with a CT-rich element. *Plant J.*, 37: 326-339.
- [7] Okamoto, J.K., Caster, B., Villarroel, R., Van Montagu, M., Jofuku, K.D., 1997. The AP2 domain of APETALA2 defines a large new family of DNA binding proteins in *Arabidopsis*. *Proc Natl Acad Sci USA*, 94:7076-7081.
- [8] Wisniewski, M.E., Bassett, C.L., Renaut, J., Farrell, R., Jr., Tworowski, T. and Artlip, T.S. 2006. Differential regulation of two dehydrin genes from peach (*Prunus persica*) by photoperiod, low temperature and water . *Tree Physiol.*, 26(5):575-584.
- [9] Pellegrineschi, A., Reynolds, M., Pacheco, M., Brito, R.M., Almeraya, R., Yamaguchi-Shinozaki, K. and Hoisington, D., 2004. Stress-induced expression in wheat of the *Arabidopsis thaliana* DREB1A gene delays water stress symptoms under greenhouse conditions. *Genome*, 47:493-500.
- [10] Kasuga, M., Liu, Q., Miura, S., Yamaguchi-Shinozaki, K. and Shinozaki, K., 1999. Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. *Nat. Biotechnol.*, 17, 287-291.

Edito dall'ENEA
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu
Copertina: Bruno Giovannetti
Stampa: Primaprint (Viterbo)
Finito di stampare nel mese di ottobre 2006