

ANALISI IPERSPETTRALE PER IL MONITORAGGIO DELLA VEGETAZIONE

Giuseppe CANINO(*), Antonio CENEDESE(*), Francesca MONTAGNA(*),
Daniela PANZONE(*), Luca SCIALPI (*), Danuta WITASZAK(*)

(*)Università degli Studi di Roma "La Sapienza" Facoltà di Ingegneria D.I.T.S., Via Eudossiana 18 00184 Roma, tel.0644585095, fax 0644585094, antonio.cenedese@uniroma1.it

Riassunto

E' presentato un sistema per l'acquisizione e l'analisi di immagini iperspettrali, a basso costo, utilizzabile per il monitoraggio di parametri di qualità ambientale. I dati elaborati sono acquisiti attraverso un sensore iperspettrale progettato e realizzato nel Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade (D.I.T.S. della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza").

Il modello di processamento dei dati ricerca le "firme spettrali" e la successiva analisi fornisce, a partire da indici spettrali e studio di bande di assorbimento, stime sullo stato di salute dei comparti ambientali rilevati, con particolare riferimento alla vegetazione.

Abstract

In this paper we describe the acquisition and analysis hyperspectral images low cost methodology, used to monitor the environmental quality parameters. The elaborated data are acquired by using an hyperspectral sensor, planned and realized in the Fluid Mechanic Laboratory (D.I.T.S. - Engineering Faculty - University 'La Sapienza' - Rome).

The processing data model inquires "spectral signatures" and the following analysis gives environmental investigated area health state evaluations, using spectral indices and studying absorption bands.

Il sensore iperspettrale

Il sensore D.I.T.S. è caratterizzato da alta risoluzione spaziale, spettrale (numero e ampiezza delle bande) e temporale. La piattaforma si compone di due telecamere digitali (SONY™ XC-8500, 8 bit), due ottiche (50 mm), due filtri sintonizzabili Varispec™ a cristalli liquidi (VIS, NIR) e un PC di acquisizione. Ad ogni telecamera è associato uno dei filtri. Il campo spettrale acquisito è compreso tra 450 nm e 950 nm, discretizzato con passo di 5 nm, ottenendo così 101 bande: le informazioni a disposizione riguardano quindi il campo del visibile (400-720 nm) e dell'infrarosso vicino (650-950 nm). L'attuale configurazione del sistema consente di aggiungere un'altra camera corredata di filtro MIR (infrarosso medio), così da estendere il campo spettrale fino a 1800 nm. I filtri consentono l'acquisizione di immagini iperspettrali grazie alla presenza di cristalli liquidi movimentati da un campo elettrico e quindi resi selettivi.

Editing e analisi dei dati

Le immagini acquisite sono organizzate in una struttura di dati tridimensionale: il cubo iperspettrale. Esso è costruito sovrapponendo n immagini (le bande del cubo), ciascuna rappresentativa delle stesse coordinate spaziali ma con diversa informazione spettrale. Acquisendo i dati da due telecamere distinte si rende necessario operare una trasformazione geometrica (*warping*) in grado di ricollocare tutte le immagini su un unico sistema di riferimento.

Le campagne di misura sono state effettuate a distanze variabili da decine a centinaia di metri.

Le singole immagini contengono valori di luminosità soggetti a rumore, dovuto ai disturbi strumentali legati al trasferimento delle cariche nel CCD della videocamera e al rumore causato dalle interferenze nel percorso trasmissivo scena-videocamera, che risulta proporzionale alla distanza tra il sensore e la scena investigata. Per filtrare le immagini dal rumore si è scelto di acquisirne 25 per ogni banda e applicarvi l'analisi POD (Graham M.D., Kevrekidis I.G, 1996).

Per estrarre informazioni iperspettrali a partire dal cubo occorre operare una calibrazione radiometrica di tutto l'insieme di dati. La calibrazione radiometrica costituisce una delle operazioni più delicate in fase di *preprocessing*. Essa è necessaria al fine di garantire la costruzione di una libreria spettrale che rappresenti con coerenza le caratteristiche di riflettanza dei materiali. Tale risultato si consegue eliminando le influenze che il sensore e i filtri inducono sugli spettri. Il sistema di acquisizione infatti non registra la riflettanza propria dei materiali inquadrati bensì il valore di radianza, ovvero quella parte di radiazione che riesce a raggiungere il CCD. La riflettanza assoluta dei materiali può essere calcolata soltanto qualora sia nota la radiazione incidente sui bersagli. Nel nostro caso la sorgente di radiazione è il sole e sarebbe impossibile ricavare il valore di radiazione solare che incide su ogni punto della scena indagata, per cui si utilizza la riflettanza relativa. Questa viene calcolata per confronto con uno spettro di riferimento scelto ad hoc, differente in funzione del tipo di calibrazione utilizzata.

L'operazione di base della calibrazione consiste nel dividere tutti gli spettri per quello di riferimento. In generale un metodo di calibrazione non può essere scelto a priori, poiché ciascun algoritmo si basa su delle ipotesi che vanno verificate di volta in volta. Le immagini rilevate sono state calibrate con due distinti metodi: *IARR* e *Flat Field*.

La calibrazione *IARR* rappresenta una soluzione efficace quando non è possibile effettuare sopralluoghi sulla scena inquadrata ma non risulta applicabile a immagini omogenee. L'algoritmo utilizza come denominatore lo spettro medio calcolato su tutti i pixel dell'immagine.

L'utilizzo della calibrazione *Flat Field* prevede invece la ricerca, in ogni immagine da calibrare, di un'area isoriflettente piana, sufficientemente ampia e in modo che non risenta dell'influenza della riflessione della luce da parte degli oggetti vicini.

Dal cubo iperspettrale calibrato è possibile estrarre lo spettro di riflettanza di ciascun pixel. L'elaborazione dei dati procede con la ricerca di spettri di riferimento sufficienti a caratterizzare tutta la scena indagata, quindi nella definizione di librerie spettrali e nell'applicazione di un algoritmo di classificazione.

Ciò è stato realizzato operando attraverso un metodo supervisionato (*endmembers*) e uno non supervisionato (*k-means*) (Cenedese, 2002). Il primo richiede un tempo di elaborazione maggiore rispetto al secondo ma permette di spingere l'analisi in modo più mirato alla ricerca delle firme spettrali obiettivo e caratterizzanti il fenomeno di interesse. Per questo motivo sarà illustrato soltanto il metodo degli *endmembers*.

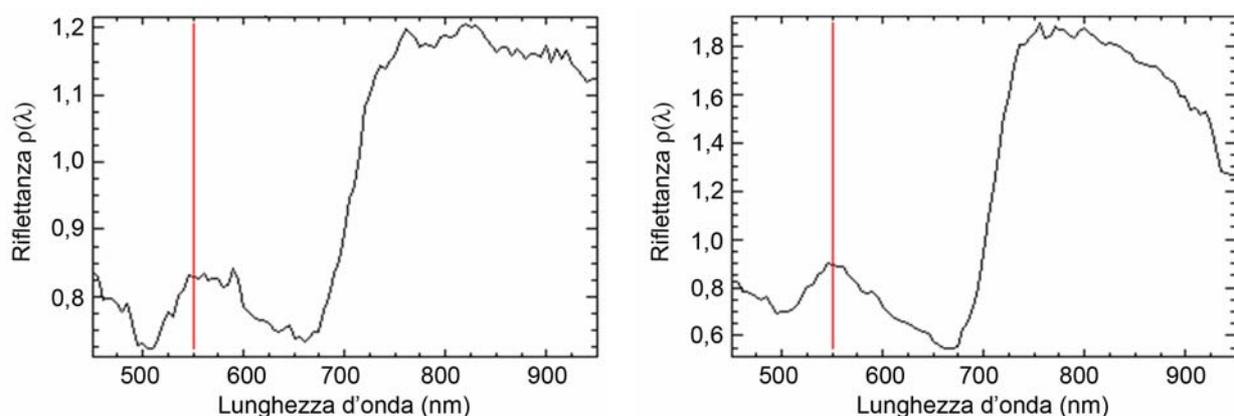


Figura 1- Calibrazione *IARR* (sinistra) e *Flat Field* (destra) per una scena disomogenea

La prima osservazione necessaria per comprendere tale metodo è che il cubo iperspettrale contiene una quantità di dati eccessiva per essere interpretati dall'utente in modo supervisionato. Quindi si è reso necessario applicare alcuni algoritmi di semplificazione e sintesi del dato, capaci di ridurre la dimensione del cubo senza perdere informazioni utili all'analisi. La distribuzione dell'informazione all'interno del cubo iperspettrale è esaminata attraverso tre modelli matematici e concettuali di rappresentazione delle caratteristiche spettrali della scena rilevata: lo spazio delle immagini, lo spazio degli spettri, lo spazio delle caratteristiche (Cenedese, 2002). Questi tre modelli sono stati rappresentati con l'ausilio del software ENVI[®] RSI. Lo spazio delle immagini corrisponde alla rappresentazione della realtà nella modalità in cui opera la vista umana. Lo spazio degli spettri rappresenta il profilo di luminosità di un singolo pixel del cubo iperspettrale in funzione della lunghezza d'onda. Lo spazio delle caratteristiche campiona i valori di riflettanza di ogni pixel dell'immagine su k lunghezze d'onda, $\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k$, e li rappresenta in un sistema di riferimento con k assi (Figura 2). Ogni punto rappresentato nello spazio delle caratteristiche contiene la descrizione completa dello spettro del pixel k -dimensionale ad esso associato. Il vantaggio di tale spazio consiste nel rappresentare contemporaneamente gli spettri di ogni pixel. Gli spettri associati ad uno stesso materiale si distribuiscono intorno a un valore centrale o medio in funzione delle proprie caratteristiche spettrali.

Operativamente il criterio di semplificazione e sintesi del dato si basa sull'applicazione delle seguenti elaborazioni:

- MNF (*Maximum Noise Fraction*): riduzione della complessità spettrale;
- PPI (*Pixel Purity Index*): riduzione della complessità spaziale;
- ROI (*Region Of Interest*): definizione di una regione d'interesse;

L'algoritmo MNF riorganizza la distribuzione dell'informazione spettrale del cubo in fattori principali indipendenti, proporzionali all'indice di correlazione definito direttamente dalla soluzione del problema agli autovalori. In genere la maggior parte dell'informazione si accumula su un piccolo numero di fattori sui quali si basa la successiva analisi.

La PPI ricerca e seleziona, all'interno dello spazio delle caratteristiche, i punti che hanno maggiore probabilità di contenere materiali puri, ovverosia quei pixel che contengono spettri relativi ad un unico materiale.

La definizione di una o più ROI permette di estrarre sottoinsiemi di pixel individuati con la PPI.

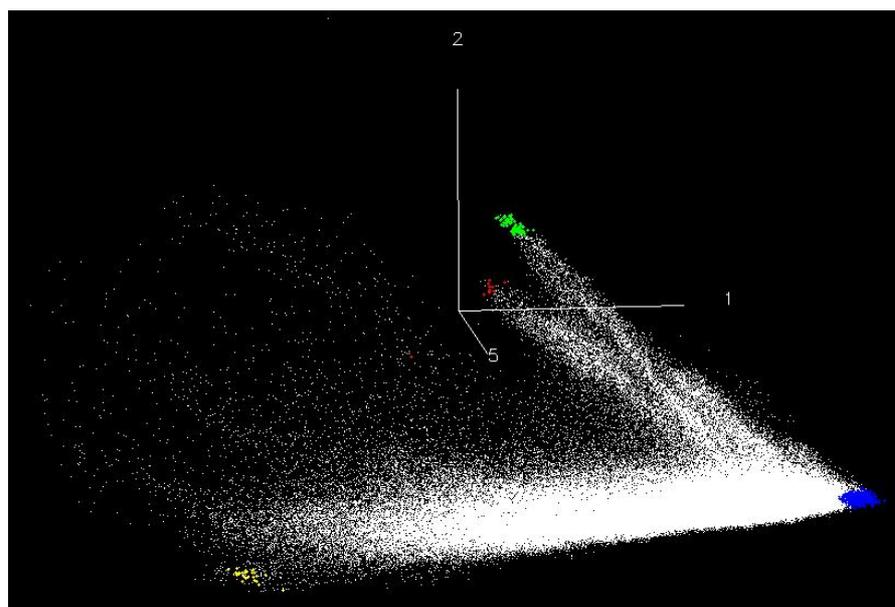


Figura 2- Spazio delle caratteristiche

La corretta applicazione di questi algoritmi fornisce un numero ridotto di pixel caratterizzati da un alto contenuto informativo. Questi pixel visualizzati nello spazio delle caratteristiche si distribuiscono a formare un poligono convesso, vedi Figura 2. L'analisi delle caratteristiche geometriche di tale poligono porta a individuare delle cuspidi costituite da pixel particolarmente addensati fra loro, gli *endmembers*, che rappresentano i materiali puri. Gli spettri degli *endmembers* sono usati per costruire delle librerie spettrali, utilizzate da algoritmi di classificazione per generare varie mappe tematiche. Gli spettri presenti nelle librerie insieme alle mappe tematiche restituite dal classificatore forniscono il supporto per analizzare le caratteristiche degli oggetti presenti nelle immagini.

Risultati

E' stata effettuata una campagna di acquisizione, svolta con la finalità di monitorare lo stato biologico degli agrumeti ripresi nella piana di Lentini nella provincia di Siracusa. La piattaforma è stata posizionata a quattrocento metri dalla scena inquadrata. L'analisi dei dati ha portato a definire gli spettri caratteristici delle seguenti specie: arancio Tarocco, arancio Biondo, arancio Washington ed Eucalipto (Scialpi, 2004), vedi Figura-3. Gli spettri degli agrumi presentano valori di riflettanza ($\rho(\lambda)$) decrescente passando dal Tarocco al Washington, inoltre quest'ultimo presenta un valore di plateau nel vicino infrarosso fra 730 e 950nm, a differenza delle altre due specie che presentano valori di riflettanza decrescenti dopo gli 850nm. Questa differenza è riconducibile al diverso contenuto d'acqua delle foglie delle piante (Daniel, 2002). In particolare si osserva che gli aranci Tarocco, poiché hanno una maturazione tardiva rispetto ai Washington, presentavano ancora i frutti, e ciò spiega il maggior contenuto d'acqua rilevato dal loro spettro.

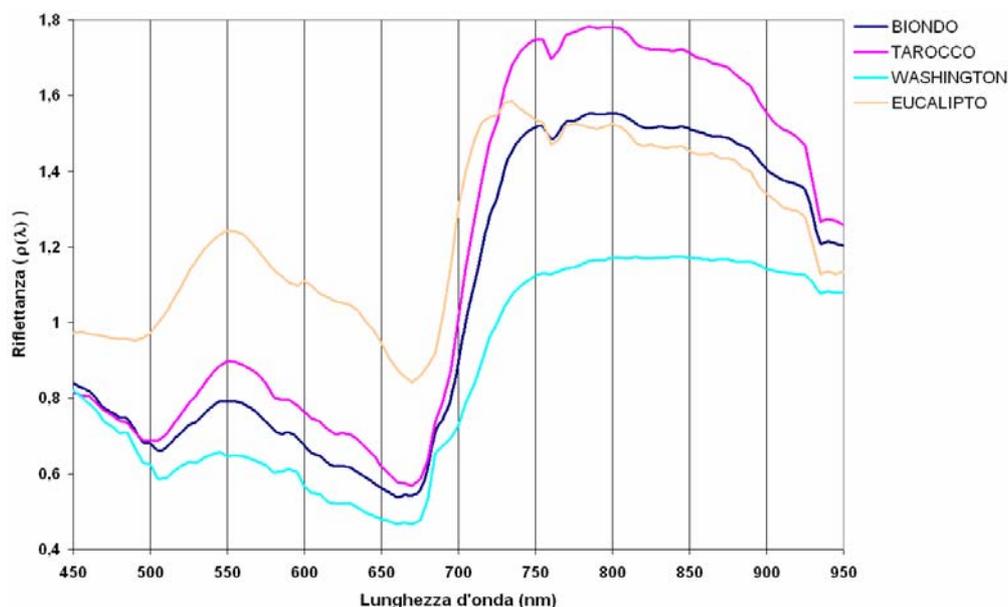


Figura 3 - Spettri di riflettanza

Gli spettri sono stati analizzati attraverso lo studio del REIP e il calcolo dell'NDVI e di alcuni rapporti fra bande rappresentativi dello stato fisiologico delle piante. Il REIP rappresenta il punto di massima pendenza dello spettro nella regione del *red edge* e viene usato per monitorare il comportamento stagionale di una pianta (Merton, 1998). Il REIP è valutato attraverso la derivata di ρ , vedi Figura-4.

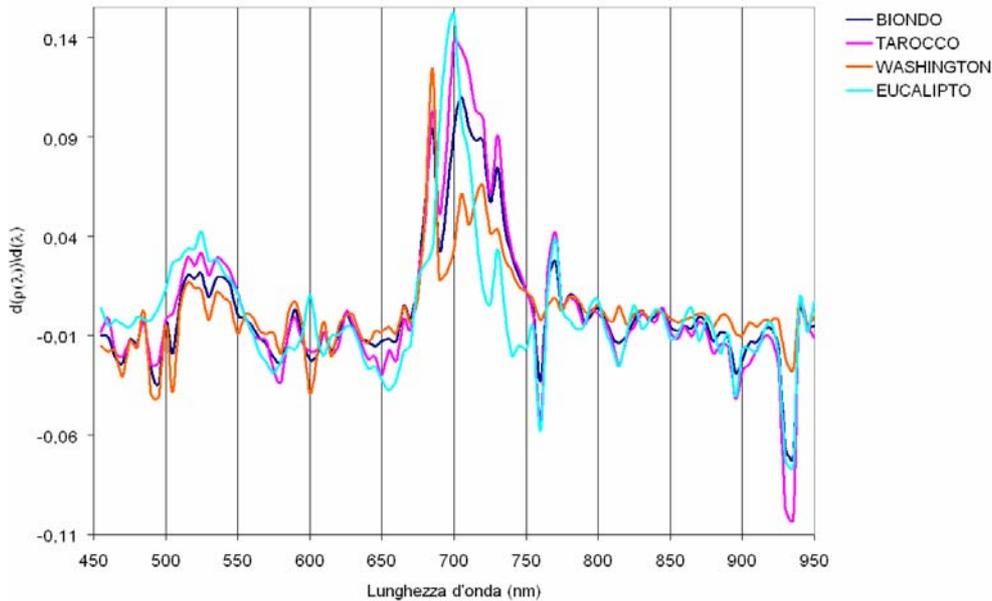


Figura 4- Derivate prime

Nell'analisi iperspettrale della vegetazione si è riscontrato che la posizione del REIP per piante che si trovano in buono stato di salute è compreso nell'intervallo fra 690 e 720nm (Kumar, L. Schmidt, etc., 2001). Lo spostamento del REIP verso lunghezze d'onda inferiori a 690nm è chiamato '*blue-shift*', lo spostamento verso lunghezze d'onda superiori a 720nm è definito invece '*red-shift*' ed entrambi sono indice di stress.

Il risultato ottenuto distingue le piante di arancio Washington dalle altre tre. Per queste ultime infatti il REIP assume valori compresi nell'intervallo fra i 695 e i 700nm, non rilevando alcuno stato di stress, per gli aranci Washington invece tale valore è posizionato a 680nm rilevando il cosiddetto *blue-shift*. Dal momento che si ha a disposizione una sola osservazione, l' 'anomalia' rilevata per lo spettro dei Washington non può essere interpretata inequivocabilmente come uno stato di stress. Tale dato deve essere integrato con ulteriori rilievi iperspettrali distribuiti nell'arco dell'intero anno al fine di verificare le variazioni nelle caratteristiche spettrali della pianta legate al proprio naturale ciclo biologico. In mancanza di tali rilievi risulta opportuno effettuare un sopralluogo in situ per verificare con tecniche agronomiche lo stato di salute delle piante, individuato con l'analisi iperspettrale.

L'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) rappresenta una misura dello stato di salute e di crescita della vegetazione. Il suo valore è collegato con le capacità fotosintetiche della foglia; in generale alti valori indicano una maggiore attività della pianta. I valori dell'indice NDVI (Figura 5) presentano un andamento coerente con le osservazioni effettuate fino a questo punto, infatti le colture di Washington presentano uno stato vegetativo meno florido (NDVI basso) rispetto alle altre due colture di agrumi. L'Eucalipto è caratterizzato dal valore NDVI più basso dovuto alla ceratura delle foglie. Pur manifestando una sensibilità al contenuto di clorofilla, l'indice NDVI non si presenta efficace nel rappresentare una riduzione dell'attività fotosintetica per i contenuti più elevati di pigmenti fotosensibili. Per questo esistono dei rapporti tra bande sensibili ai bassi, medi e alti contenuti di clorofilla. Questi si calcolano fra bande reattive alle variazioni di clorofilla (550 nm e 700 nm) e bande non reattive (750 nm). A tal proposito i rapporti spettrali ρ_{605} / ρ_{760} , ρ_{710} / ρ_{760} sono significativamente più elevati per foglie a minor contenuto di clorofilla. La risposta della vegetazione in queste bande può dare utili indicazioni riguardo al loro stato di stress, indotto da interventi antropici o cause naturali (erbicidi, deidratazione, ozono, competizione, senescenza). È stato evidenziato che lo stato di stress aumenta complessivamente la risposta nel visibile, per cui un attendibile indice dello stato di vegetazione può essere la riflettanza media nel range 400-720nm

(ρ_{VIS}), normalizzata con ρ_{760nm} .

Rapporti fra bande	Biondo	Washington	Eucalipto	Tarocco
VIS/ ρ_{760}	0.4551	0.5153	0.7191	0.4361
ρ_{750}/ρ_{700}	1.6937	1.5423	1.1775	1,7262
ρ_{750}/ρ_{550}	1.9125	1.7329	1.2348	1.9476
ρ_{605}/ρ_{760}	0.4412	0.4868	0.7456	0,4407
ρ_{710}/ρ_{760}	0.7399	0.7400	1.0077	0,7488
NDVI	0,3438	0,2924	0.1534	0,3637

Figura 5- Rapporti fra bande di assorbimento per lo studio della vegetazione

I dati riportati per l'indice di stress (VIS/ρ_{760}) rivelano un valore di stress maggiore per la coltura di Washington, invece i rapporti proporzionali al contenuto di clorofilla (buono stato di salute) sono maggiori per il Tarocco e il Biondo e inferiore per il Washington.

Le riprese effettuate da vicino rilevano le variazioni spettrali causate dall'ingiallimento delle foglie (Montagna, 2005). Nelle Figure 6-7 sono riportati gli spettri e le derivate di una foglia sana e una affetta da clorosi, patologia già rilevata da studi di tipo iperspettrale (Barton, 2000). Lo spettro delle foglie gialle è caratterizzato da un notevole incremento di riflettanza nel visibile, imputabile alla scomparsa della clorofilla che permette di 'rivelare' la presenza della xantofilla. In particolare essa assorbe nel blu e riflette nel rosso e nel verde, conferendo il tipico colore giallo delle foglie caduche.

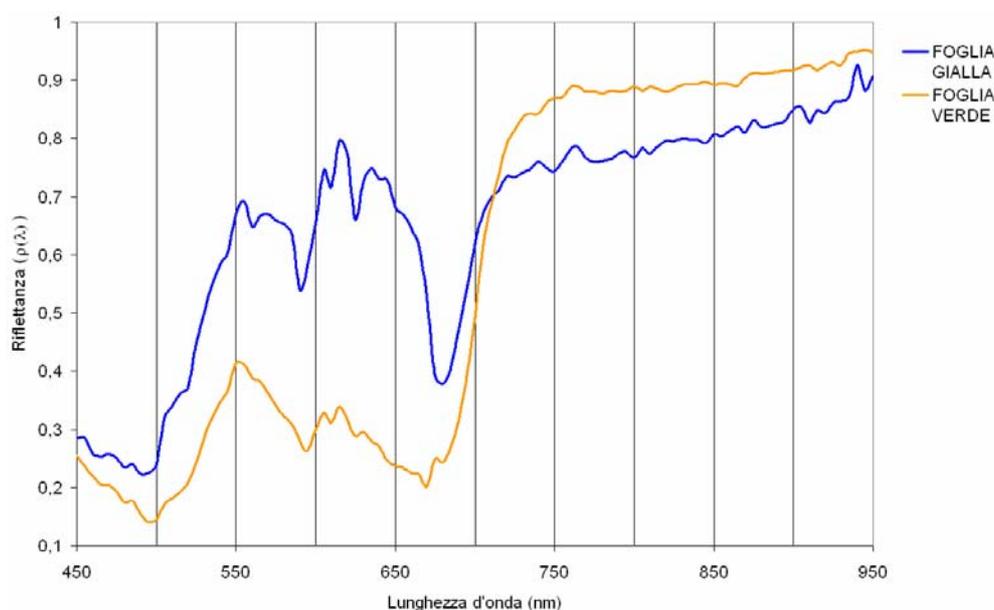


Figura 6- Spettri di riflettanza

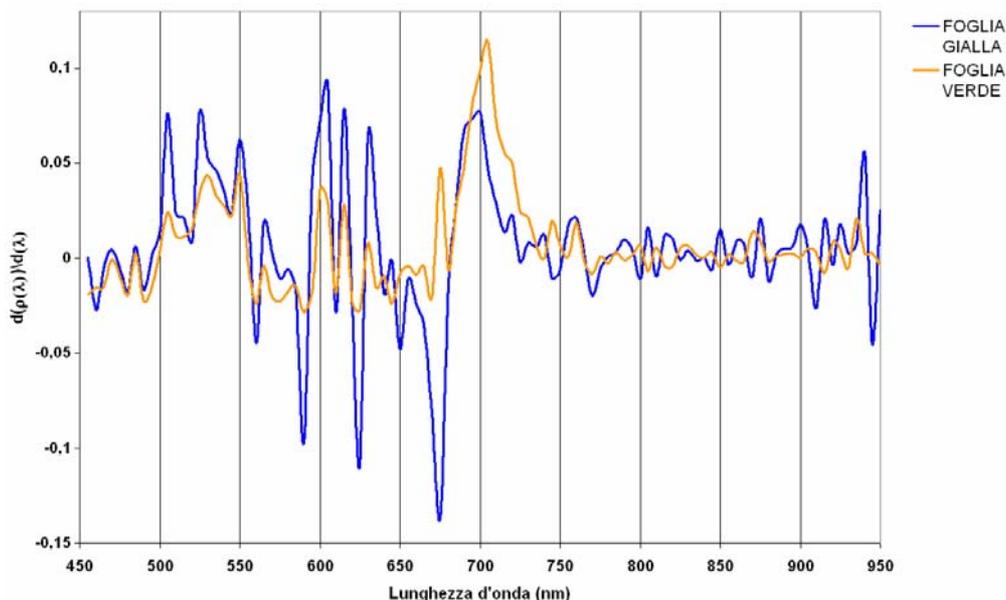


Figura 7-Derivate prime

Dall'analisi derivativa si è calcolato che il REIP per la foglia verde corrisponde a 700 nm e quello per la foglia gialla a 600 nm. Il REIP per la pianta malata subisce dunque un *blu shift* rilevando lo stato di stress.

Conclusioni

La piattaforma iperspettrale è dotata di alta risoluzione spaziale (dell'ordine del centimetro) e spettrale (di 5 nm), in modo da conferire alta affidabilità all'informazione iperspettrale. La sua risoluzione temporale (alta versatilità della piattaforma) risulta ottimale per studi di qualità ambientale su piccola e media scala.

Il processo di acquisizione configurato permette di acquisire una quantità di dati sufficiente a fornire una rappresentazione robusta del cubo iperspettrale.

L'utilizzo della decomposizione POD risulta ottimale per filtrare le immagini dal rumore dell'acquisizione.

Il metodo degli *endmembers* risulta adatto a rilevare le diversità spettrali che caratterizzano la scena investigata, per cui offre la possibilità di ricercare le relazioni fra i parametri iperspettrali e i parametri caratteristici dello stato di qualità dei vari comparti ambientali.

Il metodo di classificazione delle *k-means* è ottimale invece per individuare, in tempi brevi, le principali caratteristiche di riflettanza dei materiali presenti nell'area rilevata. Una ricerca più dettagliata delle diversità fra i materiali richiede un utilizzo 'spinto' dell'algoritmo, impostando un numero di classi inizialmente eccessivo rispetto alla complessità della scena da classificare e specificando opportuni parametri di input. I tempi di elaborazione, in quest'ultimo caso, non risultano però contenuti; per cui si ritiene opportuno ricorrere a tale metodologia soltanto quando non si riesce a raggiungere un risultato soddisfacente attraverso altri metodi.

I risultati dell'analisi iperspettrale, applicata alle colture di agrumi, trovano un'ampia corrispondenza con i fenomeni documentati in bibliografia. Le bande di assorbimento che si sono rivelate più sensibili alle diversità fra le specie rilevate sono anche quelle correlate (in laboratorio) ai parametri biologici caratteristici delle colture. Questo risultato implica che i processi di acquisizione e analisi dei dati sono ben posti. L'analisi degli spettri delle colture di agrumi ha permesso di distinguere la presenza di tre specie diverse coltivate (risultato confermato in situ).

Il calcolo degli indici e dei rapporti sensibili alla variazione dello stato di salute delle piante ha suggerito (in fase di gestione dell'informazione) delle considerazioni sul contenuto d'acqua, sul ciclo biologico delle diverse specie e più in generale sulle modalità per pianificare un'adeguata

campagna di monitoraggio protesa nel tempo. L'applicazione presentata evidenzia, in particolare, come la metodologia sviluppata per l'acquisizione e analisi di immagini iperspettrali sia efficace nel caratterizzare spettralmente la superficie interessata dal rilievo. La ricerca della correlazione fra le caratteristiche spettrali e i fenomeni ecologici ha fornito risultati ufficialmente riconosciuti nel campo della ricerca scientifica, individuando indici proporzionali ad alcuni parametri ambientali, portando ad esempio alla stima della concentrazione di clorofilla, solidi sospesi e stato trofico dei corpi idrici superficiali, oppure allo stato biologico delle coperture vegetali. I risultati ottenuti sono incoraggianti per proseguire nella ricerca della correlazione fra le firme spettrali e le caratteristiche ambientali, ciò porterà a dover gestire una grande quantità di dati che deve essere organizzata in modo efficace, ad esempio in GIS o basi dati relazionali.

Ringraziamenti

Il presente lavoro si è avvalso anche dei risultati delle attività sviluppate nell'ambito del contratto di ricerca "Applicazione delle tecniche di analisi iperspettrale per classificazioni "proximal sensing" per la mappatura di parametri ambientali" che il D.I.T.S. ha stipulato con la "Coste del Faena s.r.l." su commessa del Consorzio di Bonifica n.10 Siracusa.

Bibliografia

- Barton C.CEH (2000), "A Theoretical Analysis of the Influence of Heterogeneity of Chlorophyll Distribution on Leaf Reflectance Environmental diagnostic", *Edinburgh, Bush Estate, Penicuik*.
- Cenedese A., Miozzi M. Benetazzo A., Paglialunga A. (2002), "Acquisizione ed analisi di immagini iperspettrali per il monitoraggio del territorio: una applicazione al riconoscimento delle discariche abusive", *Rapporto interno APAT*.
- Daniel A. Sims, John A. Gamon, (2002), "Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features", *Remote Sensing of Environment*, 84 (2003): 526–537..
- Graham M.D., Kevrekidis I.G (1996), "Alternative Approaches to the Karhunen-Loève Decomposition for Model Reduction and Data Analysis", *Computers Chem. Engng*, 20: 5.
- Kumar, L., Schmidt, K. S., Dury, S. and Skidmore, A. K., (2001), "Review of Hyperspectral Remote Sensing and Vegetation Science".
- Merton R. Department of Geography University of Auckland Private Bag, Auckland New Zealand, (1998), "Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index", *Proceedings of the Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. NASA, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA. 12 - 16 January 1998*.
- Montagna Francesca (2004), "Studio della vegetazione attraverso l'analisi iperspettrale", *Tesi di primo livello D.I.T.S. Facoltà di Ingegneria "La Sapienza"*.
- Scialpi Luca (2004), "Monitoraggio ambientale mediante analisi di immagine iperspettrale", *Tesi di secondo livello D.I.T.S. Facoltà di Ingegneria "La Sapienza"*.