

Analisi iperspettrale: confronto tra filtri interferenziali e spettrometri

Antonio Cenedese (*), Carlo Dacquino (**), Emanuela Marra (*), Monica Moroni (*)

(*) Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade, Facoltà di Ingegneria, Sapienza Università di Roma,
via Eudossiana 18 – 00184 Roma, Italy (monica.moroni@uniroma1.it; antonio.cenedese@uniroma1.it)

(**) APAT (carlo.dacquino@apat.it)

Riassunto

L'acquisizione e l'elaborazione di immagini iperspettrali rappresentano una nuova frontiera nell'ambito delle tecniche di analisi e monitoraggio ambientale. I filtri interferenziali e gli spettrometri, opportunamente accoppiati a sensori, vengono alternativamente utilizzati per acquisire le informazioni spettrali. La ricerca qui presentata è volta alla verifica delle potenzialità di tali strumenti nel telerilevamento dei parametri ambientali di sistemi naturali e artificiali presenti nel territorio. Un'immagine iperspettrale permette di acquisire informazioni, in modo indiretto, su oggetti ripresi a distanza, in base alla interazione tra gli oggetti e la radiazione solare incidente. La successiva analisi di immagini iperspettrali permette di classificare il territorio in modo accurato a partire dal dato spettrale acquisito, individuando la distribuzione spaziale di grandezze fisiche ed ecologiche di interesse. Le mappe vengono ottenute confrontando la frazione di radiazione solare incidente riflessa dalla superficie di ciascun oggetto ripreso, funzione della lunghezza d'onda, con "firme spettrali" note che rappresentano in modo univoco ogni singolo oggetto. In questo contesto, la metodologia proposta consente di osservare le strutture morfologiche ed ecologiche di interesse in un intervallo di scale geometriche compreso tra le decine di centimetri ed alcuni chilometri e di fornire la necessaria descrizione quantitativa, accurata e spazialmente distribuita, del sistema.

Abstract

Nowadays, acquisition and analysis of hyperspectral images can be considered as a new frontier both for methods of analysis and for environmental monitoring techniques. Interferential filters and spectrometers, coupled to appropriate sensors, can be used to acquire the spectral information. The aim of this research is to test the applicability and potentiality of these instruments to applications in natural and artificial system. Due to the interaction existing between an object and the incident radiation coming from the Sun, an hyperspectral image permits to take information about objects monitored at large distance from the point of observation in indirect way. The analysis of a hyperspectral image allows a certain terrain to be monitored with great accuracy, and gives the spatial distribution (maps) of physical and ecological characteristics of the terrain. The maps are carried out by comparing the characteristics describing the fraction of the incident solar radiation reflected by each object located on the terrain as a function of the wavelength. This feature is known as to "spectral signature". The nodal point is that each object has his own spectral signature; therefore, each object can be recognized univocally. In this context, the methodology allows the territory to be observed in a large interval of scales between centimeters to some kilometers.

Introduzione

L'acquisizione e l'analisi di immagini iperspettrali rappresenta una nuova frontiera nell'ambito del monitoraggio ambientale. L'obiettivo che ci si propone è di verificare le potenzialità dell'analisi iperspettrale come supporto per la classificazione del territorio in base alle caratteristiche di riflettenza dei materiali che ne compongono la superficie e di evidenziare i legami esistenti tra i parametri di qualità ambientale (in particolare lo stato di salute della vegetazione) e le caratteristiche spettrali rilevate. Un'immagine iperspettrale permette di acquisire informazioni su oggetti ripresi a distanza di qualche centinaio di metri in base all'interazione di tali oggetti con la radiazione solare incidente. La successiva analisi permette di classificare il territorio in modo accurato a partire dal dato spettrale acquisito, determinando la distribuzione spaziale di grandezze fisiche ed ecologiche di interesse. Tali mappe vengono ottenute utilizzando le 'firme spettrali': funzioni caratteristiche che descrivono la frazione di radiazione solare incidente riflessa dalla superficie di ciascun 'oggetto' in funzione della lunghezza d'onda.

Il telerilevamento del territorio effettuato nell'ambito di questa attività di ricerca ha previsto l'utilizzo di due differenti sistemi per l'acquisizione di immagini iperspettrali: filtri tunabili e spettrometri. I filtri tunabili hanno la caratteristica di trasmettere al sensore con cui sono accoppiati solo la radiazione nell'intervallo su cui sono sintonizzati. Questi utilizzano i cristalli liquidi come polarizzatori a ritardo variabile, e capaci di variare la banda 'monocromatica' passante. Ciascun filtro è costituito da sei celle uguali disposte in serie e ciascuna di esse è dotata di un polarizzatore lineare, un elemento birifrangente di ritardo fisso, un elemento a ritardo variabile a cristalli liquidi e un analizzatore orientato con i suoi assi in modo parallelo al polarizzatore iniziale. Per variare la lunghezza d'onda passante attraverso il filtro si varia la tensione tra gli elettrodi che induce un campo elettrico parallelo alla direzione della luce incidente.

Gli spettrometri scandiscono la superficie da rilevare per linee e registrano su una telecamera a matrice le componenti di radiazione luminosa scomposte mediante un sistema di prismi e reticolo rifrattivo (PGP). In particolare, una lama di luce passa attraverso una fenditura posta nella parte anteriore dello strumento e viene indirizzata nella parte selettiva posizionata al centro dell'apparato. L'interazione della radiazione luminosa con una serie di prismi e lenti consente la divisione delle radiazioni per lunghezze d'onda sfruttando il principio dell'ottica secondo cui un raggio incidente sulla superficie di separazione tra due mezzi con indice di rifrazione diverso sarà rifratto e/o riflesso con un angolo proporzionale alla lunghezza d'onda. Una telecamera collegata solidalmente al sistema di spettrometri permette di referenziare la linea acquisita tramite operazioni di autocorrelazione tra immagini.

La scelta del sensore accoppiato a ciascun filtro o spettrometro è stata basata sulla sensibilità del sensore nell'intervallo delle lunghezze d'onda di riferimento per lo strumento utilizzato.

Entrambe le piattaforme sono equipaggiate con una termocamera che consente di valutare la temperatura degli oggetti analizzati e quindi di completare e integrare le informazioni iperspettrali. Ciò è particolarmente rilevante in presenza di processi con produzione di calore.

Con i due sistemi iperspettrali è possibile ricostruire, dopo un adeguato post-processamento (ortorettificazione, mosaicatura), il cubo iperspettrale. Poiché il medesimo pixel di ciascuna immagine fa riferimento alla stessa porzione di superficie terrestre, è possibile ricavare lo spettro di riflettenza dei materiali a terra che confrontato con spettri noti consente la loro classificazione.

La piattaforma iperspettrale con filtri tunabili è stata utilizzata per verificare lo stato biologico degli agrumeti della Piana di Lentini mostrando l'efficacia della metodologia nel caratterizzare spettralmente la superficie interessata dal rilievo (Canino *et al.*, 2005). La ricerca della correlazione tra 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 (Harding *et al.*, 1995; Blackburn, 1998; Roberts *et al.*, 2004; Schmidt and Bakker, 2002).

L'attività di ricerca qui presentata è stata finalizzata alla messa a punto del set-up sperimentale relativo ad entrambe le piattaforme descritte, consistita nell'ingegnerizzazione del sistema di accoppiamento tra telecamera e sensore iperspettrale, nello sviluppo di procedure per l'acquisizione in simultanea di immagini da più viste e loro salvataggio; nella messa a punto della metodologia per la costruzione del cubo iperspettrale e per l'analisi dei dati ottenuti sia nel caso di riprese da sensore fisso che con sensore in movimento (tramite operazione di mosaicatura delle immagini).

Le campagne di misura qui presentate sono state suddivise in:

- campagna a piccola-media scala da postazione fissa condotta con filtri interferenziali su paesaggio innevato
- campagna a media-grande scala da postazione mobile condotta con spettrometri su territorio caratterizzato da case, vegetazione arbustiva mista a zone di prato.

Le piattaforme per l'acquisizione dei dati iperspettrali

La piattaforma per l'acquisizione di immagini iperspettrali con filtri interferenziali è costituita da:

- tre filtri a cristalli liquidi passa banda CRI VARISPEC tunabili su tre differenti campi di frequenza (nel visibile tra 400 e 720 nm, nel vicino infrarosso tra 650 e 1100 nm, nel medio infrarosso tra 850 e 1800 nm) controllati da calcolatore;
- due telecamere 4M60 che forniscono immagini di 2352×1728 pixels con frequenza di acquisizione pari a 30 Hz accoppiate ai filtri che acquisiscono immagini nel visibile e nel vicino infrarosso e una telecamera XENICS XEVA USB-FPA-1,7 (900-1700) nm, tecnologia InGaAs, che fornisce immagini di 640×512 pixels con frequenza di acquisizione pari a 25 Hz accoppiata al filtro che opera nel medio infrarosso;
- sistema di registrazione DVR Express Blade e array di dischi esterno per l'acquisizione in simultanea delle immagini dalle tre telecamere ed il loro immagazzinamento in formato non compresso.

La piattaforma con spettrometri risulta così costituita:

- Sensore iperspettrale SPECIM IMSPECTOR VIS V10 OEM (400-1000) nm e sensore iperspettrale SPECIM IMSPECTOR NIR N17 OEM (900-1700) nm;
- due telecamere 4M60 che forniscono immagini di risoluzione spaziale pari a 2352×1728 pixels con frequenza di acquisizione pari a 30 Hz, una accoppiata allo spettrometro VIS e una atta all'acquisizione delle immagini utilizzate per la georeferenziazione delle finestre acquisite dagli spettrometri, e una telecamera digitale XENICS XEVA USB-FPA-1,7 (900-1700) nm, tecnologia InGaAs che fornisce immagini di risoluzione spaziale pari a 640×512 pixels con frequenza di acquisizione pari a 25 Hz accoppiata allo spettrometro che opera nel medio infrarosso;
- sistema di registrazione DVR Express Blade e array di dischi esterno per l'acquisizione in simultanea delle immagini dalle tre telecamere ed il loro immagazzinamento in formato non compresso

Entrambe le piattaforme possono essere equipaggiate con una termocamera Jade UC della CEDIP Infrared Systems. La termocamera Jade UC è equipaggiata con un sensore microbolometrico non raffreddato di 384x288 pixels (con area sensibile pari a 320x240 pixels), la risposta spettrale copre l'intervallo 8-12 micron. Il segnale video è memorizzato in digitale a 14 bit attraverso connessione USB 2.0 e il range termico in assenza di filtri va da -20°C a +100°C.

Analisi iperspettrale: metodologia

A seguito dell'acquisizione da supporto in movimento (aeromobile) del set di dati da analizzare, la prima operazione da effettuare è la mosaicatura di immagini adiacenti, per poi poter eseguire la costruzione del cubo iperspettrale e la ricerca delle firme spettrali. L'operazione di mosaicatura ha lo scopo di produrre un'unica immagine a partire dall'assemblaggio di n fotogrammi rappresentanti

ciascuno una singola parte di una stessa scena. Tale operazione risulta altresì necessaria per assegnare la linea acquisita dallo spettrometro alla sua corretta posizione nel dominio inquadrato.

Di particolare interesse pratico è lo studio di superfici piane o ipotizzate piane riprese da una telecamera in movimento. Per valutare la corrispondenza tra più riprese consecutive si usano diversi metodi che possono essere classificati in due grandi classi:

- metodi basati sulla correlazione che calcolano la corrispondenza massimizzando la consistenza fotometrica nell'intera immagine
- metodi basati sullo studio della fisionomia dell'immagine calcolando la corrispondenza partendo dalle corrispondenze puntuali distribuite in modo casuale su tutta l'immagine

La seconda metodologia risulta di complessa applicazione nei casi qui presentati richiedendo l'individuazione di punti comuni tra ciascuna coppia di immagini appartenenti ad un set di dati composto in genere da oltre migliaia di riprese.

È stato quindi sviluppato un software in grado di eseguire in maniera automatica la mosaicatura di più immagini che ritraggono la scena di interesse seguendo la prima metodologia. Le immagini, pur presentando una porzione in comune, risultano fra loro rototraslate con dimensione degli oggetti ripresi non necessariamente conservata. La posizione reciproca delle immagini è determinata con un algoritmo basato sulla ricerca della massima correlazione spaziale attraverso l'ausilio della FFT2D. La mappa di correlazione consente di valutare le traslazioni, le rotazioni e i cambiamenti di scala tra le immagini e attraverso una trasformazione omografica riposizionarle su un reticolo unico di riferimento. L'algoritmo sviluppato tiene conto di rotazioni tra coppie di immagini consecutive comprese nell'intervallo $-5^{\circ} \div 5^{\circ}$ e variazioni di scala di $-5\% \div 5\%$.

Mosaicare le immagini si procede nel seguente modo (Cenedese et al., 2007):

A) costruzione del cubo iperspettrale: il cubo iperspettrale è un oggetto tridimensionale che si costruisce sovrapponendo le immagini corrispondenti ad ogni singola banda; l'informazione geometrica della scena si ha lungo le due dimensioni spaziali (x,y) e l'informazione spettrale lungo la terza dimensione (z);

B) calibrazione radiometrica: la costruzione di una libreria spettrale che rappresenti con coerenza le caratteristiche di riflettanza dei materiali richiede l'eliminazione delle influenze che il sensore ed i filtri inducono sugli spettri; l'operazione di base della calibrazione consiste nel dividere tutti gli spettri per quello di riferimento;

C) identificazione della libreria spettrale: consiste nella definizione di una libreria spettrale o insieme di spettri di riferimento con operazioni che possono essere supervisionate, (es. metodo degli Endmembers), o non supervisionate, (es. metodo delle K-medie); il metodo supervisionato richiede un tempo di elaborazione maggiore rispetto al secondo ma permette di spingere l'analisi in modo mirato alla ricerca delle firme spettrali obiettivo e caratterizzanti il fenomeno di interesse;

D) etichettatura: prevede l'etichettatura dei pixels dell'intera immagine, confrontandone la risposta spettrale con gli spettri appartenenti alla libreria spettrale.

E) mappe tematiche: riguarda la gestione dell'informazione estratta. Le mappe tematiche che si ottengono da un algoritmo di classificazione possono essere spinte nel dettaglio delle infinite sfumature spettrali presenti all'interno di una scena, oppure possono evidenziare soltanto alcune aree o specie di interesse (introducendo una libreria di spettri medi). Questa fase di gestione dei dati è quindi supervisionata da un operatore in modo da ottimizzarne il risultato. L'algoritmo delle k-means rappresenta lo strumento di classificazione maggiormente utilizzato in quanto molto spesso fornisce i dati di input per algoritmi di classificazione più complessi (post-classificazione).

Risultati

Vengono innanzitutto presentati i risultati della mappatura del territorio effettuata a piccola-media scala tramite l'utilizzo del sistema con filtri tunabili da postazione fissa avendo inquadrato un suolo innevato.

La campagna di acquisizione è avvenuta sull'altopiano di Campo Felice (Aq) (1650 m slm), compreso tra i monti Orsello, Rotondo e Puzillo, in un piccolo spiazzale lungo la strada provinciale per Campo Felice (Aq) (uscita Tornimparte dell'autostrada A24 Roma-L'Aquila).

Sono state acquisite:

- 33 bande nell'intervallo spettrale da 400 a 720 nm con passo 10 nm per il canale Vis
- 46 bande nell'intervallo spettrale da 650 a 1100 nm con passo 10 nm per il canale Nir
- 96 bande nell'intervallo spettrale da 850 a 1800 nm con passo 10 nm per il canale Mir

A titolo di esempio, Figura 1 riporta il cubo VIS relativo alla scena inquadrata.



Figura 1. Cubo VIS relativo all'acquisizione su paesaggio innevato



Figura 2. Aree rappresentative di porzioni di manto nevoso differenti per condizioni di illuminazione e distanza rispetto al sistema di acquisizione

Le immagini relative a ciascuna lunghezza d'onda sono state organizzate in un solo cubo iperspettrale che comprende il VIS, il NIR ed il MIR. Per ottenere tale risultato è necessario effettuare le operazioni di preprocessing per aumentare la significatività del dato. Il preprocessing effettuato comprende una trasformazione geometrica delle immagini (warping) che definisce la relazione tra punti in due immagini (e i relativi sistemi di coordinate) e non ha effetti sui valori di luminosità degli oggetti e, infine, un'operazione puntuale di interpolazione delle immagini che modifica il valore di luminosità dei pixels in relazione alla posizione e al suo valore di livello di grigio.

Il cubo viene sottoposto ai due processi di normalizzazione spettrale: Flat Field e IAR.

L'andamento del profilo spettrale ottenuto relativamente al manto nevoso presente nella scena, avendo considerate le tre porzioni di manto riportate in Figura 2 che si differenziano per condizione di illuminazione e distanza rispetto al sistema di acquisizione, viene riportato nelle Figura 3 e 4.

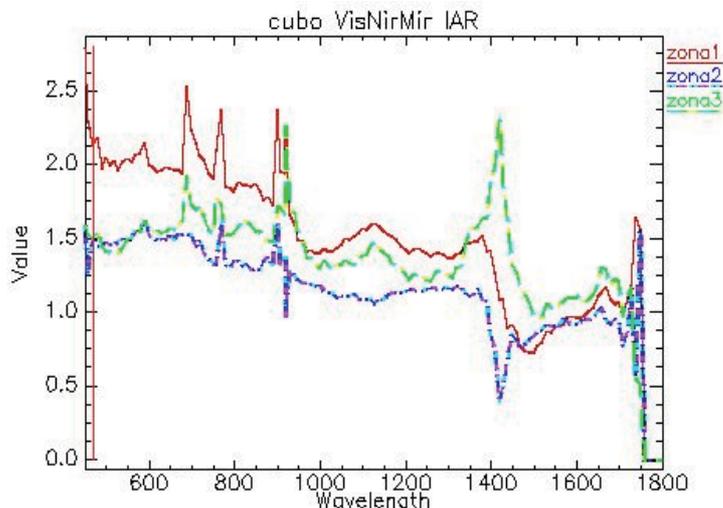


Figura 3 Cubo VisNirMir calibrato con la tecnica IAR

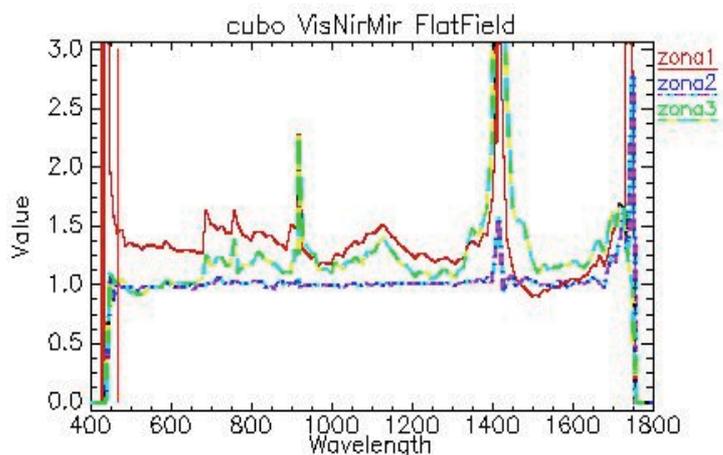


Figura 4 Cubo VisNirMir calibrato con la tecnica Flat Field

La principale differenza che salta subito agli occhi nell'andamento delle curve spettrali dei due cubi calibrati è l'appiattimento dello spettro nel cubo calibrato con la tecnica Flat Field. Per giustificare ciò si tenga presente che l'area considerata per la normalizzazione è stata una porzione di manto nevoso della zona 2 (Fig. 2). L'appiattimento è dovuto al fatto che il valore di ciascun pixel dell'immagine è stato diviso per la media di un gruppo di pixel del manto nevoso, cioè non si è fatto altro, se ci limitiamo a considerare il manto nevoso, che dividere un certo valore per un valore molto vicino allo stesso. Infatti a conferma di ciò si vede che lo spettro della zona 2, ove ricade l'area Flat Field, ha valore 1 per tutta la banda indagata (escludendo le bande finali dove la misurazione risente della cecità della strumentazione, a tal proposito vedere le curve di risposta della strumentazione riportate in precedenza specie per le più basse e le più alte lunghezze d'onda). Sarebbe da verificare, l'anomalia alla lunghezza d'onda 1400 nm la risposta del filtro MIR che fin'ora è stata impossibile ottenere.

La calibrazione ottenuta con la tecnica di normalizzazione IAR ha condotto a un risultato più fedele alle aspettative, se consideriamo la curva di riferimento riportata in Figura 5, dove sono evidenti

anche le anomalie della risposta spettrale indagate da Salzano *et al.* (2008) intorno alle lunghezze d'onda 1400 nm e a 1800 nm:

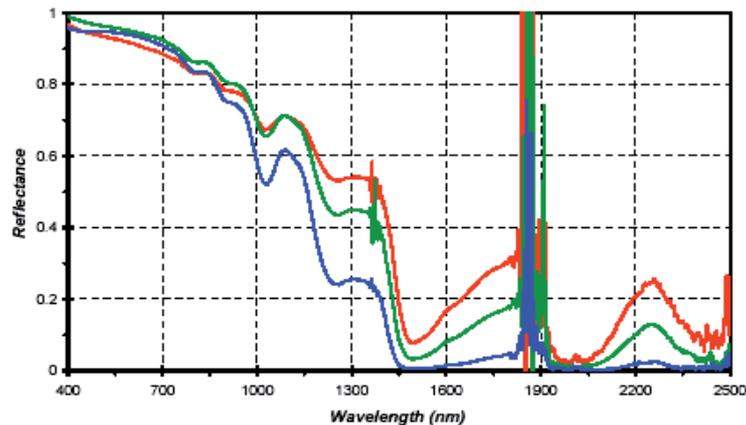


Figura 5. Riflettanza Spettrale di tre campioni di neve (Salzano *et al.*, 2008)

Presentiamo ora i risultati della campagna di misura a media-grande effettuata tramite l'utilizzo del sistema con spettrometri montati su aeromobile con ripresa effettuata in località San Teodoro (Tempio-Olbia – Sardegna).

Il risultato dell'applicazione del codice di mosaicatura ad una sequenza di 150 immagini che fanno riferimento ad una delle riprese aeree effettuate durante la campagna di monitoraggio in località San Teodoro viene presentato in Figura 6. L'elevata qualità del sensore di acquisizione e l'altezza di volo (sempre inferiore ai 500 m) consente di ottenere una risoluzione a terra inferiore a 10 cm. L'area inquadrata rappresenta un territorio recentemente interessato dalla realizzazione di un centro residenziale su suolo caratterizzato da vegetazione arbustiva mista ad ampie zone di prato.

Il cubo iperspettrale viene visualizzato in RGB utilizzando le immagini relative alle bande 700 nm R, 600 (G) e 500 (B) (Figura 7).

Vengono inoltre riportate le librerie spettrali relative alle classi individuate con la procedura di classificazione. Le firme sono state raggruppate in modo da avere nello stesso grafico le classi con risposta spettrale analoga: manufatti, vegetazione e suolo. A titolo di esempio si considerino le librerie relative ai manufatti ed indicate con etichetta Orange e Green2. Tali firme sono relative al tetto degli edifici e descrivono la differente riflessione della luce solare da parte dello stesso oggetto determinata dalla geometria di ripresa e dalla posizione del Sole. Dalle librerie spettrali della vegetazione si evince come con la classificazione si riescono a distinguere i prati dagli arbusti. L'analisi delle firme spettrali della classe a cui appartiene il prato e della classe a cui appartengono gli arbusti consente di estrarre gli indici caratterizzanti lo stato della vegetazione (il contenuto d'acqua e altri parametri ad esso relativi, Baret and Fourty, 1998; Sims and Gamon, 2002a 2002b). A cui fa seguito l'analisi nello specifico di ciascuna specie o della specie di interesse. È interessante evidenziare come il suolo presente nella parte in basso dell'immagine e la strada sterrata (tratturo) presentino le stesse firme spettrali della copertura dei manufatti. Ciò potrebbe essere imputato ad una loro simile composizione mineralogica.

Concludendo la classificazione è un ottimo mezzo per individuare la distribuzione a terra delle diverse tipologie di superfici inquadrate.

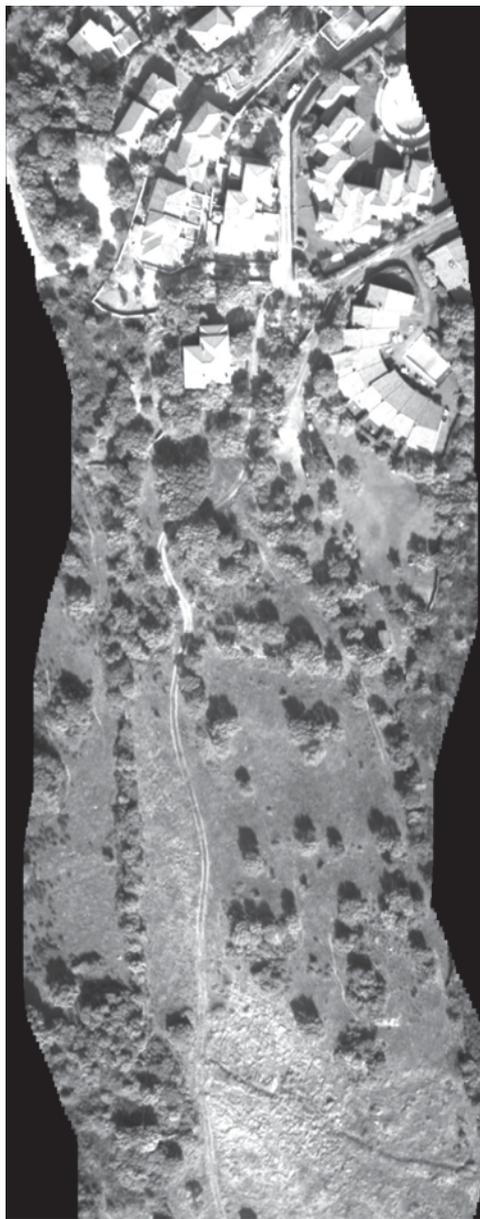


Figura 6. Mosaicatura ad una sequenza di 150 immagini



Figura 7. Cubo iperspettrale visualizzato in RGB utilizzando le immagini relative alle bande 700 nm R, 600 (G) e 500 (B)

Per la mappatura della Sardegna è stato utilizzato l' algoritmo di calibrazione IAR data l'eterogeneità della scena inquadrata e l'algoritmo K-Means a 10 classi. Il risultato viene presentato in Figura 8.



Figura 8. Mappatura dell'area inquadrata

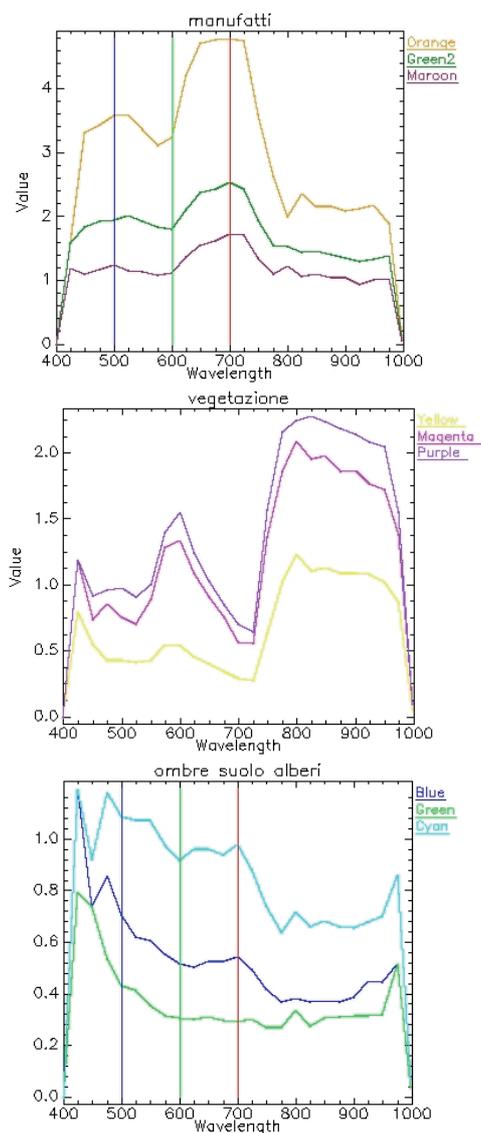


Figura 9. Firme spettrali relative alla mappatura riportata in Fig. 8

Conclusioni

I risultati delle due campagne di acquisizione qui descritte hanno permesso di mettere in opera il sistema di telerilevamento di immagini iperspettrali sviluppato nel laboratorio di Meccanica dei fluidi del DITS mettendo in luce la versatilità del sistema che ben si adatta a riprese a scale differenti. Le due piattaforme iperspettrali permettono un'alta risoluzione spettrale grazie alla possibilità di definire l'intervallo della banda di rilevamento (10 nm) e una buona risoluzione spaziale fino all'ordine del centimetro che consente maggior dettaglio dell'informazione estratta. Per quanto detto sopra, il sistema si presta con ottimi risultati anche per misure in laboratorio. La scelta della piattaforma iperspettrale da utilizzare è vincolata alla modalità di ripresa nonché dagli ordini di grandezza degli oggetti della scena inquadrata.

Bibliografia

- Baret F., Fourty T. (1998). "Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements". *Agronomie* **17**, 455-464.
- Blackburn G.A. (1998). "Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves". *International Journal of Remote Sensing* **19**(4), 657-675.
- Canino G., Cenedese A., Montagna F., Panzone D., Scialpi L., Witaszak D. (2005). "Analisi iperspettrale per il monitoraggio della vegetazione". Atti 9^a Conferenza Nazionale ASITA, Catania 15-18 Novembre 2005.
- Cenedese A., Gabellieri M., Paolillo A., Sciortino R. (2007). "Una metodologia per il monitoraggio ambientale tramite immagini telerilevate iperspettrali e termiche". Atti 11^a Conferenza Nazionale ASITA, Torino 6-9 Novembre 2007.
- Harding L.W., Itsweire E.C., Esalas W.E. (1995). "Algorithm development for recovering chlorophyll concentrations in the Cheapeake Bay using aircraft remote sensing, 1989-91". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **61**(2), 177-185.
- Roberts Dar A., Herold M., Gardner M.E., Dennison P.E. (2004). "Spectrometry for urban area remote sensing. Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm". *Remote Sensing of Environment* **91**, 304-319.
- Salzano R., Salvatori R., Dominé F. "Investigation on the relation between physical and radiometrical properties of snow covers". EARSel eProceedings 7, 1/2008.
- Schmidt K.S., Bakker W.H. (2002). "Hyperspectral edge filtering for measuring homogeneity of surface cover types". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **56**, 246-256.
- Sims A.D., Gamon J.A. (2002a). "Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages". *Remote Sensing of Environment* **81**, 337-354.
- Sims A.D., Gamon J.A. (2002b). "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**, 526-537.