

UNA METODOLOGIA PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE TRAMITE IMMAGINI TELERILEVATE IPERSPETTRALI E TERMICHE

Antonio CENEDESE (*), Massimo GABELLIERI (***), Alessandra PAOLILLO (***), Rosanna SCIORTINO (**)

(*) Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade (DITS), Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi “La Sapienza”,
Via Eudossiana, 18 - 00184 Roma, Italy, (antonio.cenedese@uniroma1.it)

(**) Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Ambientale e Condizionamento Ambientale (DETEC), Facoltà
di Ingegneria, Università degli Studi "Federico II", Piazzale Tecchio, 80 - 80125 Napoli, Italia,
(rosanna.sciortino@unipa.it)

(***) Infobyte spa, Via della Camilluccia 67 - 00135 Roma, Italy - Via Cervantes 64, 80133 Napoli, Italy
(m.gabellieri@infobyte.it, a.paolillo@infobyte.it)

Riassunto

In questo lavoro è presentata una metodologia per il monitoraggio di parametri di qualità ambientale attraverso l'analisi di immagini iperspettrali e termiche telerilevate con un sistema di acquisizione a basso costo. La metodologia è basata su una specifica analisi delle immagini telerilevate: il processamento delle immagini è fatto mosaicando tutte le immagini di una assegnata banda spettrale al fine di produrre un'unica grande immagine per ciascuna banda. Successivamente è prodotto il cubo iperspettrale al quale è applicata una tecnica di *fuzzy clustering*. Con questo approccio non è richiesto l'uso di alcun punto di controllo a terra per mosaicare o calibrare le immagini. Specifici algoritmi sono stati sviluppati per l'analisi dei dati.

Abstract

In this paper is presented a methodology for the monitoring of environmental quality parameters through the analysis of hyperspectral and thermal images remotely sensed from a “low budget” acquisition system. The methodology is founded on a specific data analysis: the data processing is done mosaicing all the images of a band to produce one large image for each spectral band. Subsequently the hyperspectral cube is done and a fuzzy clustering technique is applied. With this approach it is not required the use of any on ground control point to mosaic or calibrate the images. Proprietary algorithms for data analysis has been developed. **Keywords:** remote sensing, hyperspectral and thermal data analysis, automatic mosaicing and fuzzy clustering algorithms.

Introduzione

In questo lavoro vengono presentati alcuni dei risultati ottenuti nel progetto MILO⁽¹⁾ <http://milo.infobyte.it>. Il principale obiettivo del progetto è stata la definizione e lo sviluppo di una metodologia per il monitoraggio dei parametri di qualità ambientale attraverso l'analisi di immagini iperspettrali e termiche telerilevate da un sistema di acquisizione a basso costo da piattaforma terrestre o aerea. L'uso di immagini iperspettrali consente la ricostruzione dello spettro di riflettanza degli oggetti analizzati. Il sistema di acquisizione usa filtri sintonizzabili per acquisire immagini a differenti lunghezze d'onda e ciascuna immagine riceve luce da una stretta banda dello spettro elettromagnetico (nel visibile o nell'infrarosso vicino). Poiché il medesimo pixel di ciascuna immagine fa riferimento alla stessa porzione di superficie terrestre, è possibile ricavare lo spettro di riflettanza del materiale a terra. Dal confronto di tale spettro con altri noti si possono identificare i materiali a terra.

La temperatura superficiale del terreno o dell'acqua è un parametro di qualità ambientale perchè influisce sulla biologia degli organismi viventi. L'analisi termica può scoprire fenomeni esotermici legati all'inquinamento come lo scarico nei

⁽¹⁾ Il progetto MILO è stato finanziato dal Ministero Italiano per l'Università e la Ricerca (MIUR), <http://www.miur.it>. I partners del progetto erano:

- Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Ambientale e Condizionamento Ambientale (DETEC), Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi "Federico II", Piazzale Tecchio, 80 - 80125 Napoli, Italia, (<http://www.detec.unina.it>)
- Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade (DITS), Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi “La Sapienza”, Via Eudossiana, 18 - 00184 Roma, Italia, (<http://w3.uniroma1.it/dits>)
- Infobyte spa, Via della Camilluccia 67 - 00135 Roma, Italy; Via Cervantes 64, 80133 Napoli, Italia (<http://www.infobyte.it>)

fiumi, nei laghi o a mare di acque industriali o scariche abusive. Il requisito del basso costo è una importante caratteristica per favorire la diffusione dell'analisi iperspettrale e termica dai centri specializzati verso un uso più generale come ad esempio in settori della pubblica amministrazione che si occupano di ambiente e controllo urbano [Cenedese et al., 2006]. I principali problemi di ricerca e di sviluppo affrontati nel progetto sono stati:

- lo studio di una metodologia per monitorare i parametri di qualità ambientale tramite analisi iperspettrale e termica
- lo sviluppo di un sistema di acquisizione iperspettrale e termico aviotrasportato di peso e dimensioni contenute
- lo sviluppo di algoritmi proprietari per processare le immagini iperspettrali e termiche
- l'applicazione di questa metodologia ad alcuni casi di studio su acque costiere, laghi, fiumi o lagune.

Le principali innovazioni del progetto sono:

- l'uso di una metodologia per analizzare immagini iperspettrali e termiche telerilevate senza la necessità di punti di controllo a terra per mosaicare e correggere le immagini e per produrre il cubo iperspettrale
- lo sviluppo di algoritmi proprietari per gestire i dati sperimentali in modo maggiormente automatizzato rispetto a quello consentito dai prodotti commerciali. In particolare sono stati sviluppati algoritmi per:
 - mosaicare e correggere automaticamente le immagini telerilevate; alcune applicazioni commerciali richiedono l'intervento dell'operatore o permettono il mosaico automatico solo di immagini già georiferite
 - produrre il cubo iperspettrale con immagini di dimensioni differenti, come quelle ottenute dalla mosaicatura; alcune applicazioni, oltre al consueto intervento dell'operatore che deve ricercare i punti corrispondenti tra le immagini di bande contigue, richiedono un preventivo ritaglio dei bordi delle immagini che rallenta il lavoro
 - fare il clustering del cubo iperspettrale usando approcci *fuzzy*; è stato sviluppato un algoritmo *c-mean* per analizzare i dati senza usare il classico metodo *k-mean*; in genere i prodotti commerciali non offrono metodi di classificazione *fuzzy*. Di seguito sono presentate alcune comparazioni tra il *c-mean* e il *k-mean* di ENVI™.

Metodo di analisi dei dati

La metodologia adottata permette di convalidare ed organizzare le informazioni acquisite, al fine di ottenere rappresentazioni tematiche del sito in analisi. L'analisi dei dati è fatta mosaicando tutte le immagini di ogni banda spettrale per produrre un'unica grande immagine di ogni banda. Successivamente è creato il cubo iperspettrale mappando e ricampionando i mosaici su una banda base. Gli algoritmi di sviluppati non richiedono l'uso di alcun punto di controllo a terra per mosaicare o calibrare le immagini telerilevate. Le fasi dell'analisi sono:

- 1) eliminazione della vignettatura presente nelle immagini; tale effetto causa la riduzione della luminosità ai bordi dell'immagine rispetto alla parte centrale. Questo difetto è dovuto agli obiettivi delle camere ed ai filtri sintonizzabili posizionati davanti alle ottiche della camera
- 2) filtraggio del rumore; al rumore contribuisce la dispersione atmosferica ed il rumore termico dei CCD dei sensori
- 3) correzione geometrica delle immagini; questo passo è necessario a causa dell'aberrazione ottica degli obiettivi, alla posizione non nadirale della camera e all'irregolarità della superficie terrestre sotto analisi
- 4) mosaicatura delle immagini; in questo modo viene prodotta una unica grande immagine del sito in analisi unendo tutte le immagini di una banda spettrale. Il mosaico è utile anche all'analisi termica per confrontare la temperatura di pixel distanti semplificando l'analisi di correlazione
- 5) produzione del cubo iperspettrale; il cubo iperspettrale è un oggetto tridimensionale simile ad una "colonna" di immagini con uguali dimensioni e bande diverse in cui lo stesso pixel di ogni immagine corrisponde alla stessa posizione a terra
- 6) calibrazione radiometrica; si convertono i valori di radianza di ciascun pixel del cubo in valori di riflettanza. Vengono usati due metodi: l'Internal Average Relative Reflectance (IARR) ed il metodo Flat Field. Il metodo IARR deriva i parametri di correzione direttamente dall'immagine mentre il metodo Flat Field richiede la presenza *in situ* di targets di riferimento con spettro di riflettanza piatto, che per vari motivi, non sempre è possibile avere.
- 7) clustering ed estrazione di firme spettrali; questo passo è eseguito sul cubo iperspettrale per produrre una mappa tematica del luogo in studio. La mappa tematica è un'immagine in cui i pixels con firma spettrale simile hanno lo stesso colore (cluster). Questa mappa permette una facile identificazione dei materiali simili sulla superficie terrestre e l'identificazione dei loro spettri

Il passo 2) non è stato sviluppato per il basso rumore termico del CCD e la bassa quota di volo. Il passo 3) non è stato sviluppato poiché si è assunta trascurabile l'aberrazione ottica e si è usata una piattaforma geo-stabilizzata per garantire immagini nadirali e si è stati agevolati dalla planarità dei luoghi in analisi.

La curva di calibrazione della camera termica è stata calcolata per un intervallo di temperatura più grande di quello necessario con lo scopo di avere una maggiore accuratezza [Carlomagno et al., 2002]. La piattaforma iperspettrale ⁽²⁾ è uno spettrometro ad immagine capace di funzionare sia da aereo che da terra. Lo strumento acquisisce immagini nello spettro visibile (VIS), nell'infrarosso vicino (NIR), nell'infrarosso medio (MIR) per un intervallo complessivo da 410 a 1800 nm e nell'infrarosso termico da 8 a 12 μm.

⁽²⁾ Il sistema di acquisizione è stato sviluppato da:

Superelectric, Via del Castagneto, 3 – 07029 Tempio Pausania (SS), Italia; Via Tiburtina, 603 – 00159 Roma, Italia
<http://www.superelectric.it>

Algoritmi di analisi di immagine

Le ragioni dello sviluppo di algoritmi proprietari per l'analisi delle immagini è dovuta ai requisiti della metodologia adottata che i prodotti commerciali conosciuti non soddisfano. I principali requisiti per il processamento delle immagini iperspettrali e termiche sono nell'area della mosaicatura, della produzione del cubo iperspettrale e nel clustering.

- Mosaicatura. Le immagini telerilevate coprono di solito grandi estensioni e si ha la necessità di unirle tutte in una sola grande immagine senza ricorrere a punti di controllo. Questa operazione va fatta in maniera automatizzata minimizzando gli errori di mosaicatura e vignettatura e minimizzando le congiunzioni delle immagini (*blending*).
- Produzione del cubo iperspettrale. In genere i mosaici di immagini di bande diverse hanno dimensioni differenti. Per ottimizzare il lavoro l'applicazione per produrre il cubo iperspettrale deve gestire immagini di dimensioni diverse senza richiedere un preventivo ritaglio cosa che invece alcune applicazioni commerciali richiedono.
- Clustering. Per questa analisi è richiesto un algoritmo sensibile e capace di evidenziare i dettagli delle immagini.

Il problema principale nel mosaicare le immagini è determinare la trasformazione tra le immagini (*image registration*). Se le immagini ritraggono una zona piana queste relazioni sono delle omografie. Per automatizzare la mosaicatura è stato adottato il metodo della correlazione di fase [Kuglin et al., 1975] che sfrutta il "parallelismo" delle immagini dovuto alla piattaforma geo-stabilizzata che elimina le rotazioni della camera. In seguito l'omografia è raffinata col metodo dei minimi quadrati non-lineare di Levenberg-Marquandt [Capel, 2004], [Szeliski, 1996], [Press et al., 1996]. In tale programma sono state sviluppate tecniche automatiche di correzione della vignettatura e di *blending* [Capel, 2004]. Per il clustering è stato sviluppato l'algoritmo *fuzzy c-mean* [Bezdek, 1981] che non è facilmente reperibile in applicazioni commerciali. Il *c-mean* permette di dividere N punti di un spazio a P-dimensioni in C cluster di punti "simili". Nel clustering *fuzzy* un punto \bar{x}_k appartiene con probabilità $p_i(k)$ al cluster \bar{r}_i . Quindi un punto \bar{x}_k appartiene ad ogni cluster e per tale ragione il *c-mean* è un metodo *soft* a differenza del *k-mean* che è un metodo *hard* poiché ciascun punto appartiene solo ad un cluster. Il *c-mean* sceglie i valori delle $p_i(k)$ e dei centri \bar{r}_i in modo da minimizzare la quantità:

$$E = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^C p_i(k)^m d^2_i(k) \text{ soggetta alle condizioni } \sum_{i=1}^C p_i(k) = 1 \text{ dove } d_i(k) = |\bar{r}_i - \bar{x}_k| \quad [1]$$

Il livello *fuzzy* del *c-mean* dipende dal parametro m: per $m \rightarrow 1$ il *c-mean* diventa un classificatore hard, invece per $m \rightarrow \infty$ ogni punto appartiene a tutti i clusters con la stessa probabilità (massima indeterminazione). Il metodo *c-mean* si è dimostrato più sensibile nell'evidenziare i dettagli nascosti delle immagini rispetto all'algoritmo *k-mean*.

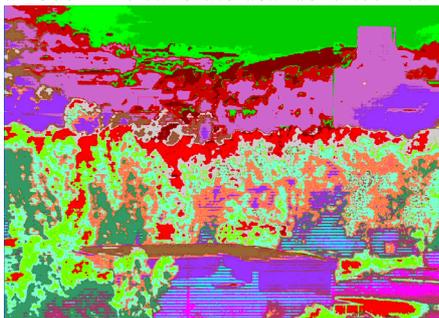
Esame degli Algoritmi

Il test sull'algoritmo di mosaicatura è stato effettuato su dati reali. La figura 1 mostra il mosaico ottenuto da alcune decine di immagini con differenti percentuali di sovrapposizione. Il programma lavora abbastanza bene con immagini parallele ma può fallire in presenza di rotazioni significative tra immagini successive.

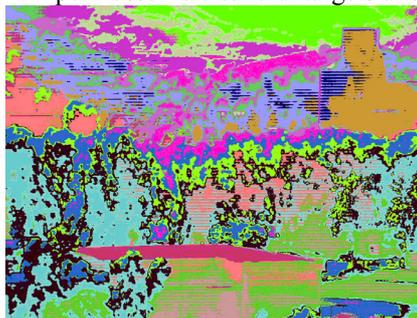


Figura 1: Mosaico di 91 immagini (1048x4879)

Le prove dell'algoritmo *c-mean* sono state condotte analizzando un cubo iperspettrale di 140 bande acquisito a Colferro (a 50 km da Roma) con piattaforma a terra. E' stata fatta una verifica della capacità dell'algoritmo di evidenziare i dettagli nascosti delle immagini. Il cubo iperspettrale era formato con immagini di 1280x960 pixels da 410 a 1800 nm e calibrato usando la tecnica IARR per l'assenza a terra di targets di calibrazione.

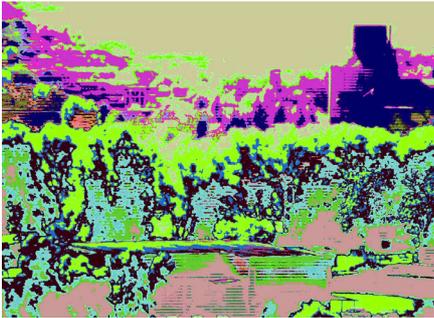


Test: 1 (*k-mean*)

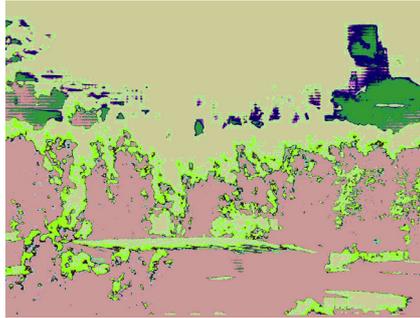


Test: 2 (*c-mean* $m=1.05$)

La figura 2 contiene quattro mappe tematiche e compara un risultato *k-mean* (Test 1) con tre mappe tematiche *c-mean* con valori diversi del parametro m. Le immagini dimostrano come il parametro m consenta di modulare la sensibilità dell'algoritmo *c-mean*. Infatti diminuendo il parametro m, il *c-mean* diventa più sensibile evidenziando un numero maggiore di



Test: 3 (c-mean m=2.)



Test: 4 (c-mean m=8.)

Figura 2: Confronto di una k-mean con alcuni c-mean con differenti m

dettagli. L'immagine del Test 2 mostra un numero maggiore di dettagli rispetto al *k-mean* che sembra paragonabile al Test 3 (m=2). La possibilità di modulare la sensibilità del *c-mean* può essere usata per unire clusters con spettri simili e ottenere una mappa di sintesi variando progressivamente il livello di dettaglio. Va osservato che il *c-mean* è più veloce del *k-mean* che usa la libreria interpretata IDLTM che come tale non offre alte prestazioni.

Casi di studio

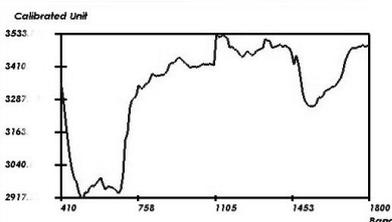
La metodologia di analisi è stata applicata ad alcuni casi di prova. Le immagini sono state acquisite da una piattaforma a terra o da un elicottero in volo. Per i voli sono state adottate due strategie di acquisizione.

- Sequenze di strisciate: in questo caso l'elicottero vola in linea retta sui luoghi in studio, un numero di volte pari al numero di bande spettrali che si vuole acquisire. Quindi per ogni banda spettrale è raccolta una sequenza di immagini e successivamente il programma di mosaicatura è applicato ad ogni sequenza per ottenere una grande immagine per ogni banda spettrale. Le immagini mosaicate sono mappate e ricampionate su una immagine base per produrre il cubo iperspettrale. Questa tecnica permette di analizzare estensioni relativamente grandi.
- Hovering: in questo caso l'elicottero si pone perpendicolarmente sul luogo in studio in volo stazionario. In questo modo le immagini delle diverse bande spettrali vengono raccolte una dopo l'altra. Questa tecnica è meno sensibile alla oscillazione dell'elicottero ma copre aree più piccole.

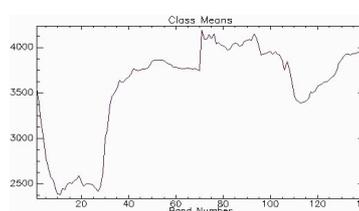
Il primo metodo è stato applicato alle immagini raccolte lungo il fiume di Sarno, mentre il secondo è stato applicato alle immagini acquisite sul lago di Cabras. Comunque prima di acquisire le immagini da elicottero il sistema (hardware e software) è stato testato su delle immagini acquisite a Colferro con piattaforma a terra.

Caso di studio di Colferro

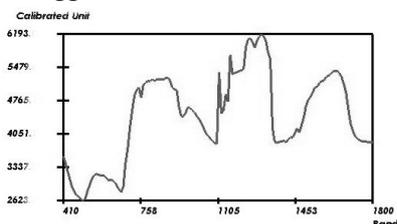
Sulle immagini usate in questa prova è stato attivato il *c-mean* con m=1.05 in maniera da raggiungere una maggiore sensibilità. In figura 3 sono comparati per uno stesso pixel gli spettri di vegetazione di alberi ricavati dal *c-mean* e dal *k-mean*. L'accordo tra il *c-mean* e il *k-mean* è molto buono a conferma della bontà della sua realizzazione.



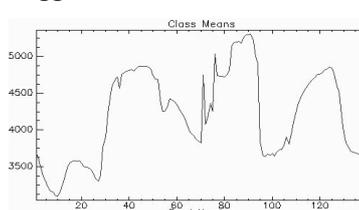
Spettro 1: fronde superiori sotto i raggi diretti del sole dal c-mean



Spettro 2: fronde superiori sotto i raggi diretti del sole dal k-mean



Spettro 3: Fronde di alberi in ombra dal c-mean



Spettro 4: Fronde di alberi in ombra dal k-mean

Figura 3: Confronto di spettri dal k-mean e c-mean

Lo spettro delle fronde superiori degli alberi sotto la luce diretta del sole è molto simile al caso di letteratura. Questo è dovuto alle condizioni di illuminazione, ma anche al fatto che le fronde sono la parte più giovane degli alberi e corrispondono alla vegetazione più sana. Si nota che la "valle" dopo 1400 nm corrisponde ad un intervallo di assorbimento di acqua. Gli spettri 3 e 4 sono di vegetazione sotto le fronde superiori e mostrano un comportamento diverso nell'intervallo di lunghezza d'onda dopo gli 850 nm. Essi sembrano corrispondere ad una riduzione di riflettanza nel plateau del NIR (notare la presenza di intervalli di assorbimento attorno a 1100 nm).

Questi intervalli di assorbimento sono anomali e la riduzione del plateau del NIR può corrispondere ad un contenuto variabile di acqua; essi mostrano anche una riflettanza superiore nella regione verde del visibile. Non è stato osservato nessuno spostamento della posizione del piede di salita dello spettro (*red edge position*). Per concludere la prova di Colferro ha dimostrato la correttezza degli spettri ottenuti dal *c-mean*, che risultano praticamente identici a quelli del *k-mean* e ha evidenziato le potenzialità di analisi del sistema nel monitoraggio della vegetazione.

Caso di studio iperspettrale del fiume Sarno

Nel caso di studio del Sarno le immagini sono state acquisite da un elicottero che volava lungo un percorso rettilineo sul fiume. Le bande delle immagini sono nell'intervallo da 410 a 1200 nm. L'oscillazione della rotta dell'elicottero ha

determinato una riduzione dell'intersezione tra le bande acquisite. Dopo la creazione del cubo iperspettrale le immagini si riducono all'intervallo da 460 a 1110 nm per un totale di 24 bande. La calibrazione del cubo è stata fatta usando il metodo IARR per la mancanza a terra di punti di controllo. I principali problemi incontrati sono stati i seguenti:

- aggiungendo bande, l'effettiva area comune delle immagini tende a ridursi a causa delle oscillazioni nella rotta dell'elicottero. Questo riduce anche il numero di bande e produce dei "buchi" nelle sequenze delle bande
- l'effettiva risoluzione a terra è minore di quella teorica che è di 10-30 cm. Si è osservato che la sovrapposizione di immagini di bande diverse non è perfetta a causa di disallineamenti di una decina di pixels.

Nella figura 4 è mostrato il risultato di un *c-mean* (40 cluster e $m = 2$). In questa immagine è visibile il fiume Sarno lungo la dimensione orizzontale. I bordi dell'immagine mostrano i tipici effetti di intersezione successive tra immagini di bande diverse. L'analisi mostra che il *c-mean* è capace di rivelare un maggior numero di dettagli rispetto al *k-mean*. Per esempio l'acqua del fiume di Sarno è classificata in tre cluster mentre il *k-mean* trova solamente un cluster. In figura 5 è mostrato un spettro di vegetazione ottenuto dal *c-mean*. Questo spettro è in accordo con lo spettro standard della vegetazione. In figura 6 è mostrato uno spettro dell'acqua del Sarno che mostra un riflettanza decrescente verso l'infrarosso in accordo con la proprietà dell'acqua di assorbire radiazione elettromagnetica nell'infrarosso. In figura 7 è riportato lo spettro di riflettanza dell'asfalto.

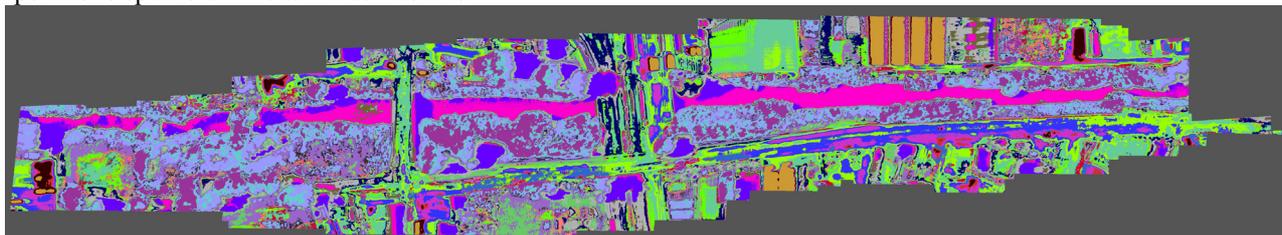


Figura 4: mappa tematica *c-mean*

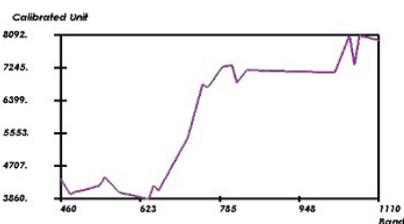


Figura 5: spettro di vegetazione

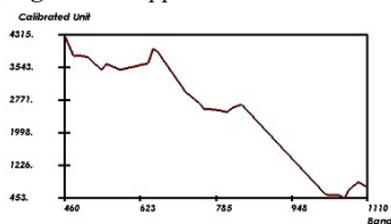


Figura 6: spettro d'acqua

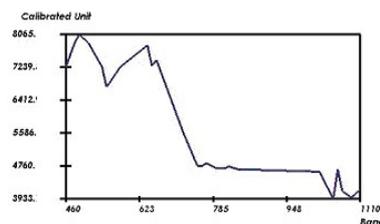


Figura 7: spettro d'asfalto

Caso di studio iperspettrale del lago di Cabras

Nel caso di studio di Cabras le immagini sono state acquisite da un elicottero in hovering. L'altitudine operativa era di circa 2000 m e le bande delle immagini vanno da 400 a 1200 nm. Dopo la creazione del cubo iperspettrale le bande si riducono all'intervallo da 520 a 1040 nm. La calibrazione del cubo iperspettrale è stata fatta col metodo IARR e l'operazione di clustering è stata eseguita con l'algoritmo *k-mean* su 8 clusters. La mappa tematica è mostrata in figura 8 dove è visibile un muro che divide l'acqua di mare (al centro) dall'acqua di lago (le altre parti). La superficie dell'acqua di lago mostra una struttura particolareggiata che rivela la presenza di materiali galleggianti. La mappa mostra spettri diversi per l'acqua di mare rispetto a quella di lago e la presenza nel lago di materiale galleggiante. Nella figura 9 viene mostrato lo spettro di riflettanza di un cluster di materiale galleggiante evidenziato dall'analisi *k-mean*.

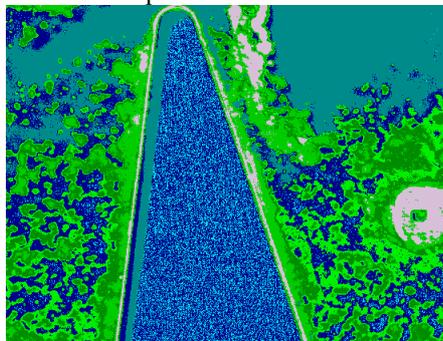


Figura 8: Mappa tematica di una parte del lago di Cabras

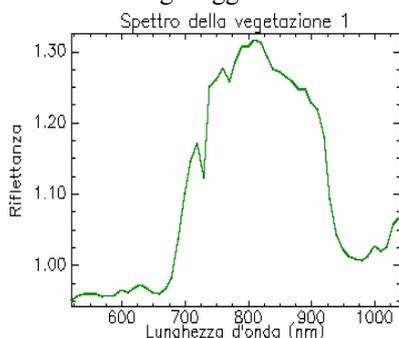


Figura 9: Spettro di un cluster di vegetazione

Lo spettro è coerente se comparato con quello tipico della vegetazione dimostrando che il materiale galleggiante può essere composto da alghe. I risultati dell'analisi termica sono riportati nella mappa termica di Figura 10. Essa mostra che l'acqua di lago è più calda di quella di mare. I dettagli galleggianti visibili nel lago sono più caldi dell'acqua circostante e questo può essere interpretato come un effetto del riscaldamento da parte dei raggi solari del materiale

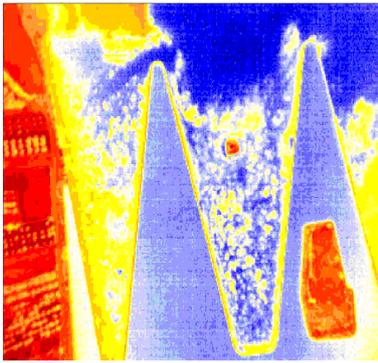


Figura10: Mappa termica

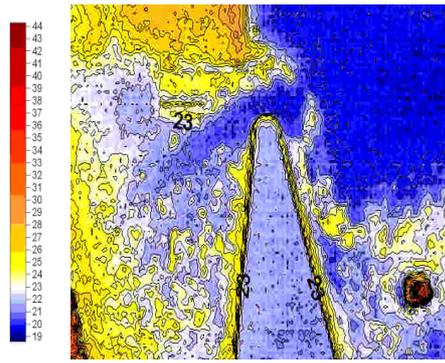


Figura11: Mappa delle isoterme

galleggiante. Nella Figura11 è riportata la mappa delle linee isoterme. Essa ha una struttura più fine che è composta dalle linee di *isocontouring*. Poiché l'acqua rallentando si riscalda, dalle linee isoterme sulla punta della diga si può notare la decelerazione della corrente e la direzione del flusso dell'acqua che si incurva verso la diga divisoria e che perde progressivamente di velocità entrando nella zona con materiale in sospensione.

Conclusioni

Il grande interesse per l'analisi iperspettrale e termica è dovuto alla possibilità di analizzare la composizione dell'ambiente ed il suo stato di salute attraverso il telerilevamento senza l'intervento sul luogo. I risultati dei casi di studio di analisi iperspettrale dimostrano che per l'elicottero non è facile passare molte volte sulla stessa zona a causa delle oscillazioni nella sua rotta. Per questa ragione a volte l'elicottero non ripassa sulla stessa zona in analisi e ciò causa la perdita di bande utili; inoltre un piccolo numero di bande sono perse per il fallimento della mosaicatura, dovuto a rotazioni della piattaforma geostabilizzata e una ulteriore riduzione dell'area di analisi è prodotta dall'intersezione delle immagini di bande diverse quando si crea il cubo iperspettrale. La risoluzione a terra è ridotta per un disallineamento di una decina di pixels tra i mosaici di bande diverse.

Nonostante questi problemi, i risultati ottenuti dimostrano la possibilità di questo sistema a basso costo di distinguere, con elevata affidabilità, una larga classe di spettri come quelli di vegetazione, acqua e suolo. Il sistema è stato in grado di individuare fenomeni di inquinamento: nel caso di Cabras è stata scoperta la presenza di alghe (eutrofizzazione) sulla superficie del lago. Nel caso del Sarno le rive del fiume sono state investigate per scoprire scarichi o anomalie nella vegetazione.

Il software sviluppato ha funzionato in maniera soddisfacente. L'applicazione di mosaicatura è stata capace di operare automaticamente sulle immagini ma soffre del problema di non riuscire a gestire rotazioni della piattaforma. L'algoritmo di produzione del cubo iperspettrale consente all'operatore di generare cubi da immagini di dimensioni arbitrarie ma non ha la necessità di ridurre tutte le immagini alla stessa dimensione e questo consente di guadagnare tempo nella fase di analisi. La clusterizzazione *fuzzy* del metodo *c-mean* è molto più veloce ed ha una maggiore sensibilità rispetto all'algoritmo *k-mean*. La sensibilità di questo algoritmo può essere regolata dal valore del parametro di attivazione *m* dal quale dipende il livello di *fuzzyness* dell'algoritmo.

I risultati dell'analisi termica hanno dimostrato la possibilità di scoprire anomalie di temperatura generate dalla presenza di inquinamento. Nel caso di prova di Cabras, sono state evidenziate alghe galleggianti dalla differenza di temperatura tra i materiali più caldi sulla superficie dell'acqua rispetto ad una zona circostante di acqua stagnante. L'analisi della mappa termica ha permesso di identificare la zone di acqua stagnante perché l'acqua che si muove a velocità inferiore è più calda di quella che si muove più velocemente. L'operazione di mosaicatura è stata utile per riassumere in una sola immagine le informazioni termiche di vaste zone permettendo una comprensione più rapida e sintetica delle informazioni disponibili. I risultati dell'analisi termica dimostrano l'utilità di correlare le immagini iperspettrali con quelle termiche perché i risultati di questo tipo di analisi possono rafforzare i risultati ottenuti con le analisi iperspettrali.

Bibliografia

- Bezdek J. C.(1981), "Pattern Recognition with fuzzy Objective Function Algorithms", New York, Plenum Press
- Capel D.(2004), "Image Mosaicing and Super-Resolution", Springer
- Carlomagno G.M., Astarita T. and, Cardone G.(2002), "Convective Heat Transfer and Infrared Thermography. Annals of the New York Academy of Sciences: Visualization and Imaging in Transport Phenomena", 972, 177-186,
- Cenedese A., Miozzi M., Benetazzo A., Paglialunga A., Daquino C., Mussapi R. (2006), "Vegetation cover analysis using a low budget hyperspectral proximal sensing system", Annals of Geophysics, Vol. 49 N. 1, February
- Kuglin, C. D., and Hines, D. C. (1975), "The phase correlation image alignment method", Proceedings of IEEE 1975 International Conference on Cybernetics and Society, New York, USA, 163-165
- Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery.B, "Numerical Recipes in FORTRAN. The art of scientific computing". Second edition. Cambridge University Press.
- RSI ENVI™ User's Guide (Research System Inc.)
- Szeliski R. (1996), "Virtual Mosaics for Virtual Environment", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 16, Issue 2, pag 22-30, March 1996