

# INTEGRAZIONE DI DATI LASERSCANNING ED IPERSPETTRALI PER APPLICAZIONI ARCHEOLOGICHE

Franco COREN (\*), Domenico VISINTINI (\*\*), Frederick Mario FALES (\*\*\*), Paolo STERZAI (\*),  
Guido PREARO (\*\*), Marina RUBINICH (\*\*\*)

(\*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, CARS Research Group, Borgo Grotta Gigante 42/c - 34010 TRIESTE, tel. 040 2140255, *email* fcoren@ogs.trieste.it, psterzai@ogs.trieste.it

(\*\*) Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Georisorse e Territorio, via Cottonificio 114 - 33100 UDINE  
tel. 0432 558719, *email* domenico.visintini@uniud.it, gprearo@libero.it

(\*\*\*) Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Storia e Tutela dei Beni Culturali, via Tarcisio Petracco 8, 33100 UDINE, tel. 0432 556643, *email* frederickmario.fales@univr.it, marina.rubinich4@tin.it

## Riassunto

L'impiego del telerilevamento per la definizione di strutture archeologiche costituisce una pratica ben consolidata che oramai presenta oltre un secolo di applicazione. Diversa è invece l'impiego di tale metodologia di rilievo per l'individuazione di strutture ancora sepolte. Allo scopo di validare questo approccio, pervenire ad obiettivi concreti e fornire indicazioni utili per gli addetti ai lavori, è stato effettuato uno studio nell'area del sito archeologico di Aquileia (UD). Il potenziale applicativo del telerilevamento in questo campo risiede nella possibilità data dall'integrazione con nuove tecnologie, in primo luogo dall'introduzione del laser a scansione, e dalla possibilità di giungere ad un impiego di tecnologie integrate. Il tutto associato ad una maggiore accuratezza nella geo-codifica dei *dataset* provenienti dai diversi sensori. Le meta-informazioni provenienti dai sensori iperspettrali agevolano le procedure di segmentazione dei dati laser, consentendo l'identificazione di numerose significative discontinuità dei DTM derivabili dagli stessi. Dall'integrazione dei due metodi sull'area di Aquileia è stato possibile ricostruire la posizione di importati manufatti sepolti quali mura ed elementi associabili a sistemi viari. È stato possibile ricostruire la posizione di un paleo-alveo probabilmente attivo in età romana mediante impiego del dato iperspettrale. I risultati ottenuti sono di notevole interesse avendo evidenziato elementi sino ad ora sconosciuti da sottoporre ad ulteriori studi ed indagini archeologiche.

## Abstract

*This paper deals with the integration of laser and hyperspectral data to improve the discovery of new archeological sites. We investigate the possibility of integrating such dataset in order to evaluate irregular behavior of some major ground indexes. While hyperspectral data allow the identification of specific humidity, vegetation and thermal conditions in the target area, accurate geometric information are provided by laser data.*

*Optech laser and MIVIS and AISA hyperspectral data were acquired over the city of Aquileia (UD, North-East of Italy), an area of great historical interest due to many roman ruins. Significant results were obtained both in already discovered archaeological sites, and in interesting new areas on the northern side of the old city. When integrated, the resulting datasets showed, with sensible accuracy, the probable presence of surface/below surface archaeological elements.*

---

La ricerca rientra nell'ambito delle attività previste dal progetto INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia "Ricomposizione della cartografia catastale e integrazione della cartografia tecnica regionale numerica per i sistemi informativi territoriali degli enti locali mediante sperimentazione di nuove tecnologie di rilevamento" svolto dall'Università di Udine in collaborazione con il Geodetski Inštitut Slovenije di Lubiana.

## 1. I dati laserscanning

Le informazioni spaziali derivanti dal laser a scansione aereo rappresentano un elemento essenziale per la comprensione del territorio dal momento che, a fronte di tempistiche assolutamente contenute, è possibile giungere a risultati cartografici di notevole precisione. Il laser a scansione aerea permette di rilevare una quantità di punti al suolo elevatissima e comunque tale da generare dei modelli digitali della superficie (DSM, *Digital Surface Model*) e del terreno (DTM, *Digital Terrain Model*) e di altissima risoluzione. Ovviamente la densità di acquisizione dei punti è un parametro chiave per la risoluzione planimetrica del modello numerico. Generalmente la densità di punti per metro quadrato nelle acquisizioni laser a scansione aerea variano tra 1 e 10 p.ti/m<sup>2</sup> con una precisione media in quota pari a 0,1 metri circa; questi valori assicurano in genere la realizzazione di una superficie interpolata molto dettagliata ed affidabile. A partire da un DSM di tali caratteristiche è possibile procedere, attraverso *tools* di frequente implementazione in numerosi *software* commerciali, all'investigazione puntuale della geometria del terreno attraverso sezioni, viste prospettiche, assonometrie ecc. Tuttavia, data la rumorosità dei laser e al fine di evidenziare micro/macro discontinuità del terreno che, nell'analisi archeologica del territorio, possono risultare rappresentative di cedimenti e/o elementi sepolti, è spesso opportuno procedere all'utilizzo di opportuni filtri numerici in grado di accentuare le stesse all'occhio esperto dell'archeologo. È inoltre spesso utile applicare tali filtri in maniera separata ai differenti dati (*first/last pulse*) memorizzati come segnali di risposta nei sensori LIDaR.

L'intensità della riflessione del raggio laser permette di generare "immagini" radiometriche del suolo: tali valori di riflettanza sono tuttavia di tipo relativo e non assoluto poiché l'assorbimento dovuto all'aria nel percorso laser-punto-laser varia da sensore a sensore. In generale, essa è comunque sufficiente a descrivere radiometricamente gli oggetti al suolo. L'ampiezza del dato radiometrico viene registrata, dalle più comuni strumentazioni in commercio, come un *digital number* (DN) di formato proprietario, generalmente attraverso un campionamento ad 8 *bit*, il cui valore risulta proporzionale al numero di fotoni di ritorno che vanno ad impressionare il sensore. Tale quantità, oltre a variare evidentemente da strumento a strumento, risulta essere funzione di numerosi fattori di natura ambientale oltre che dalla quota di acquisizione di ciascun *dataset*. Attraverso opportuni modelli di calibrazione (Coren e Sterzai, 2005), in grado di tenere conto dell'attenuazione del segnale in funzione del percorso, partendo dall'ipotesi di risposta della superficie secondo un modello lambertiano, è possibile giungere a valori di tale quantità confrontabili tra i differenti *dataset*, cioè ad un valore nuovo assoluto detto "pseudo-riflettanza".

## 2. I dati iperspettrali

Il principio fondamentale del *remote sensing* (telerilevamento) afferma che, dato un qualsiasi materiale, la somma di radiazione solare che riflette, assorbe o trasmette varia con le sue lunghezze d'onda caratteristiche. Questa importante caratteristica della materia rende possibile identificare differenti sostanze o classi di sostanze e separarle per mezzo della loro "firma spettrale" (o curve spettrali). Oggigiorno, la tecnologia dei sensori iperspettrali ha compiuto grandi progressi, fornendo eccellenti risoluzioni e dati migliori idonei a dettagliate classificazioni. L'elevatissimo numero di bande spettrali disponibili, ognuna caratterizzata da una minima larghezza di banda, permette all'utente di separare accuratamente un'ampia varietà di caratteristiche. Tuttavia, bande contigue tendono ad essere assai correlate fra loro e non forniscono più informazioni di un'unica banda più ampia che le contiene tutte. Quindi, poiché i tempi di trasmissione, di elaborazione, di analisi e di archiviazione aumentano in proporzione al numero di bande, la selezione di quelle bande spettrali che effettivamente forniscono informazione risulta fondamentale. Si possono così ottenere classificazioni di qualità con tempi computazionali ridotti.

### 2.1 Alcune quantità indice ricavabili da dati iperspettrali

Combinando opportunamente i valori acquisiti dai sensori iperspettrali nelle varie bande, si può ottenere un elevato numero di "quantità indice", cioè di parametri descrittivi di qualche caratteristica chimico-fisica dell'ambiente naturale. Tra tutti questi, la cui utilità dipende dallo

specifico campo di applicazione, i seguenti quattro indici hanno un ruolo fondamentale nel rivelare le “anomalie radiometriche” conseguenti al dovuto alla correlazione tra strutture archeologiche sepolte e condizioni del terreno (Ardissone, Boccoardo e Rinaudo, 2003; Emmolo *et al.*, 2004):

- $NDVI = (\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}) / (\lambda_{NIR} + \lambda_{RED})$  (*Normalized Difference Vegetation Index*) differenza normalizzata dell'indice di vegetazione;
- TI (*Thermal Inertia*) inerzia termica;
- umidità del suolo;
- ossidi di ferro presenti nel terreno.

Data l'elevata rumorosità dei dati iperspettrali, si procede a visualizzarli mediante filtri di *smoothing/sharpening* per una più agevole interpretazione sia dei risultati che delle quantità indice. Infine, un'altra importante possibilità ottenibile nelle elaborazioni di dati iperspettrali è la ricerca automatica di uno o più materiali specifici. Nota la risposta della riflettanza spettrale di un materiale, si effettua la cosiddetta classificazione *supervised* (“supervisionata”) sfruttando opportuni criteri di ottimizzazione geometrica in un iperspazio a n bande, quali la minimizzazione dell'angolo n-dimensionale nello spazio spettrale, detta “*Spectral Angle Mapper*” (SAM).

## 2.2 I dati iperspettrali MIVIS

Il sistema iperspettrale MIVIS (*Multispectral Infrared & Visible Imaging Spectrometer*) è uno strumento modulare composto da quattro spettrometri che misurano simultaneamente la radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie terrestre in 102 differenti bande spettrali:

- 1° spettrometro: 20 bande nella regione spettrale del visibile (0,433-0,833  $\mu\text{m}$ );
- 2° spettrometro: 8 bande nella regione spettrale dell'infrarosso vicino (1,150-1,550  $\mu\text{m}$ );
- 3° spettrometro: 64 bande nella regione spettrale dell'infrarosso medio (2,000-2,500  $\mu\text{m}$ );
- 4° spettrometro: 10 bande nella regione spettrale dell'infrarosso termico (8,200-12,700  $\mu\text{m}$ ).

Ad esempio, l'indice NDVI può essere calcolato considerando le bande dalla  $b_{24}$  alla  $b_{28}$  (1,30-1,55  $\mu\text{m}$ ) e  $b_{97}$  (9,80-10,20  $\mu\text{m}$ ): è così possibile stimare l'umidità del terreno scegliendo le bande che minimizzano la correlazione tra le stesse.

Inoltre ci sono due aspetti da analizzare al fine di un efficiente utilizzo delle immagini MIVIS. Poiché esso è un sensore a scansione (*whiskbroom scanner*), le immagini ottenute presentano una forte deformazione geometrica in direzione trasversale alla direzione di acquisizione. Inoltre, il dato MIVIS non è originariamente georeferenziato. I due problemi possono essere risolti utilizzando dei punti di controllo a terra (*Ground Control Points*, GCP) ed utilizzando un DEM per l'ortorettifica: in questo modo, si ottiene la georeferenziazione e il ricampionamento dei dati MIVIS.

Il secondo problema è dato dal fatto che le immagini MIVIS distribuite non sono corrette per l'atmosfera. Negli anni passati sono state testate diverse metodologie di correzione atmosferica, (Giradino, Brivio e Sgavetti, 2001).

## 2.3 I dati iperspettrali AISA

Il sistema iperspettrale AISA è un sensore spettrometrico che permette di acquisire immagini del terreno caratterizzate da un'eccellente definizione. Dal punto di vista dell'acquisizione dei dati, l'AISA è un sistema completo composto da un sistema “*pushbroom*”, comprendente, oltre che il sensore iperspettrale, un sensore di posizionamento GPS/INS e da un'unità di acquisizione collegata a un PC. Lo spettrografo usato ha una notevole efficienza, pressoché immune da fenomeni di “*smiling*” e di polarizzazione; inoltre la radiometria dei dati AISA è opportunamente calibrata.

## 3. L'integrazione di dati e la proposta di un modello di analisi

Da un punto di vista meramente metrologico, lo stesso rilievo laser è un esempio di integrazione di dati, in quanto nella produzione del risultato finale si considerano le misure di diversi sensori: GPS, inerziale, specchio e telemetro laser. Ovviamente, per “integrazione” qui si intende allora la fusione

fra dati acquisiti con sistemi realmente distinti, poi elaborati e georiferiti in un unico datum di riferimento geodetico. Il dato laser viene considerato quale base geometrico di partenza, in quanto rappresenta la fonte di dati più accurata e più ricca di informazioni e di contenuti spaziali. Nell'ambito delle analisi archeologiche, tutte le rappresentazioni cartacee disponibili quali le mappe archeologiche, planimetrie antiche e le carte catastali, sono molto utili vista la loro generale grande scala, pur richiedendo la loro scansione (mediante scanner da tavolo!) e la georeferenziazione (comunque oggi giorno agevole mediante procedure in ambiente GIS).

Per l'identificazione di strutture sepolte è stata considerata l'evoluzione nel tempo delle rovine archeologiche secondo lo schema seguente. In un primo stadio, il materiale costituente una struttura sopraelevata rispetto al terreno subisce una dispersione alla sua base dovuta al proprio cedimento o al cedimento dei suoi elementi costituenti (vedi Figura 1.a). Successivamente avviene un fenomeno di dispersione ed inglobamento da parte del terreno del materiale sparso al piede (vedi Figura 1.b); in una ultima fase, il detrito mescolato al terreno rimane parzialmente in superficie (vedi Figura 1.c) alterando la risposta radiometrica del terreno circostante ed il basamento, rimanendo inglobato nel terreno stesso rappresenta un punto di resistenza del terreno stesso ai fenomeni di compattazione. Ne deriva che la struttura sepolta è visibile dall'alto, non solo per la risposta radiometrica derivante dai detriti sparsi presenti nel suolo, ma anche dal fatto che sussiste una seppur minima variazione di quota verso l'alto, indice della presenza della struttura sottostante (vedi Figura 1.d).

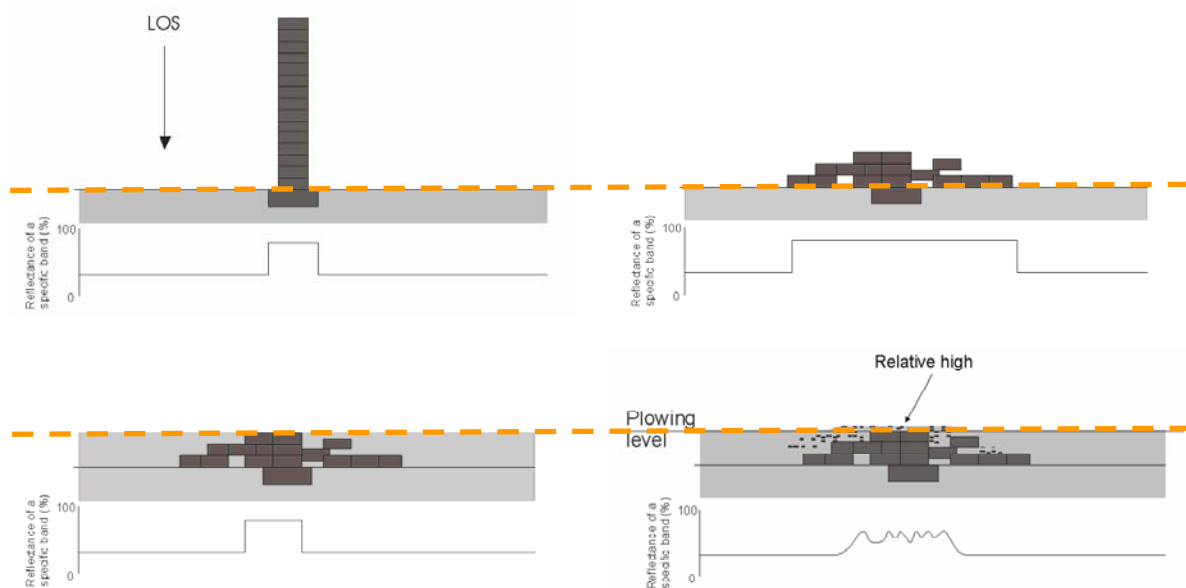


Figura 1 - Le 4 fasi del modello proposto per l'evoluzione di una rovina archeologica.

#### 4. L'applicazione alla città romana di Aquileia (UD)

L'area in esame è posta ad Aquileia (Nord-Est Italia) che è stata una delle città romane più importanti dal II secolo A.C. al V secolo D.C.. L'insediamento di Aquileia avvenne come colonia romana, nel 181 A.C., che poi si sviluppò come un importante centro militare e commerciale all'intersezione di importanti arterie stradali (Via Annia, Via Postumia, Via Iulia Augusta); aveva un porto sul fiume, connesso al mare Adriatico attraverso la laguna di Grado, dove arrivavano merci di ogni genere da tutto il Mediterraneo. È stata la capitale della X Regio (Venezia e Istria) e dal IV secolo D.C. ha visto la nascita della prima fiorente comunità cristiana, denominata inizialmente "Basilica", e poi nel Medio Evo nota come "Aquileia Patriarchate". Durante periodi più recenti, Aquileia si ridusse a piccolo centro, ma la Chiesa Patriarcale non perse la sua importanza.

Molte costruzioni romane, disabitate e sistematicamente depredate, non sono più visibili. La struttura in pianta della città conserva il tipico assetto di origine romano, con strade ortogonali

all'incirca nella direzione Nord-Sud ed Est-Ovest, con i maggiori edifici pubblici costruiti lungo gli assi centrali "cardo maximum" e "decumanum maximum". Grazie a decenni di studio e scavi, molti elementi storici sono stati portati alla luce e a volte restaurati in situ (foro, porto fluviale, ville, anfiteatro, circo, cimitero, negozi, terme). Vi è comunque una gran parte dell'antica città romana che è ancora seppellita ed oggetto di scavi da parte degli archeologi. Nella seguente Tabella 2, vengono riportati le caratteristiche dei diversi *dataset* acquisiti ed utilizzati per l'area di Aquileia. Esiste inoltre una carta archeologica che descrive dettagliatamente sia la situazione attuale (scavi, rovine assieme ad edifici e viabilità attuali) sia quelle antiche sulla base delle informazioni storiche.

<b>laser OPTECH</b>	Altezza di volo	Approx. 1.000 m s.l.m.	<b>iperspettrale MIVIS</b>	Altezza di volo	Approx. 1.500 m s.l.m.	<b>iperspettrale AISA</b>	Altezza di volo	Approx. 1.000 m s.l.m.
	Densità di punti	1 pt/m <sup>2</sup>		Dimensione immagine	750 x 4.000 pixel		Dimensione immagine	1.000 pixel in FoV
	Punti totali	21.235.986		Dimensione del pixel	Appross. 3,00 m		Dimensione del pixel	Approx. 0,7 m - 1 m
	Numero di strisciate	5		Larghezza di banda	5 nm		Larghezza di banda	5 nm
	Superficie (2D)	13.375.034 m <sup>2</sup>		Intervallo spettrale	400 +- 1000 nm		Intervallo spettrale	400 +- 1.000 nm

Tabella 2 - Caratteristiche principali dei dati laser e iperspettrali utilizzati ad Aquileia.

#### 4.1 Le elaborazioni dei dati laser

I dati laser sono stati acquisiti nel mese di Aprile 2005 con un sistema Optech ALTM 3033 montato su un elicottero (Helica-OGS) operante contemporaneamente al sensore AISA. Considerando il modello evolutivo descritto al paragrafo 3., è stato esaminato il DTM derivato da tali dati (vedi Figure 3): la struttura della città che emerge collima in buona parte con quanto riportato nella mappa archeologica. Si noti come in corrispondenza dell'area dove era supposto esistere il Teatro vi sia una depressione (coordinate Gauss-Boaga 2393000E 5069600N), mentre in corrispondenza del Circo Massimo vi sia una zona di elevazione (coordinate 2392600E 5070400N).

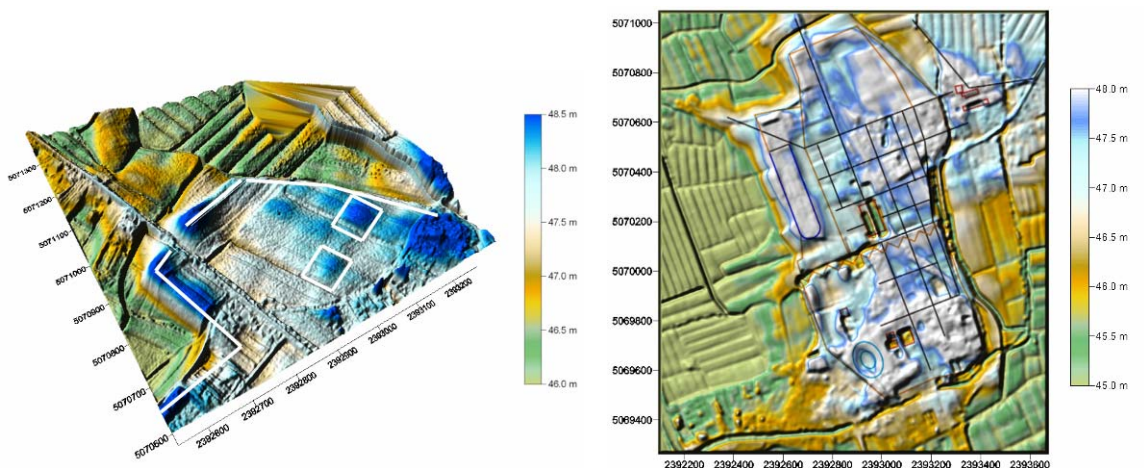


Figura 3 - L'area di Aquileia: a) DTM da dati laser; b) sovrapposizione DTM + carta archeologica.

#### 4.2 Le elaborazioni dei dati MIVIS

I dati MIVIS sull'area di Aquileia sono stati acquisiti da parte della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia nel settembre 2000. Relativamente a tale *dataset*, una delle difficoltà maggiori, oltre alla rimozione dell'elevata componente di rumore presente, ha riguardato l'individuazione delle bande di maggior utilità ai fini dell'indagine archeologica. A tale scopo, è stata in primo luogo condotta un'analisi delle componenti principali, al fine di evidenziare e rimuovere le bande affette da valori elevati di rumore e non particolarmente significative. A seguito dello studio del livello di correlazione tra bande differenti si è poi proceduto all'analisi di interpretazione visiva del contenuto

delle stesse attraverso l'utilizzo del software ENVI<sup>®</sup> (RSI). Tuttavia, tra tutte le bande disponibili, è stato tuttavia selezionato un insieme di sole 10 bande tra le 102 disponibili. In particolare:

- 4 nel campo del visibile:  $b_{11}=0,640\mu\text{m}$  [R],  $b_{13}=0,680\mu\text{m}$  [R],  $b_6=0,540\mu\text{m}$  [G],  $b_2=0,460\mu\text{m}$ , [B];
- 4 nel campo dell'infrarosso vicino:  $b_{18}=0,780\mu\text{m}$ ,  $b_{22}=1,225\mu\text{m}$ ,  $b_{26}=1,425\mu\text{m}$ ,  $b_{28}=1,525\mu\text{m}$ ;
- 2 nel campo dell'infrarosso medio:  $b_{36}=2,0485\mu\text{m}$ ,  $b_{52}=2,1795\mu\text{m}$ .

#### 4.3 Le elaborazioni dei dati AISA

Le analisi su questi dati, che nondimeno sono ancora in corso, hanno consentito chiaramente di estrarre numerose meta-informazioni corrispondenti ad anomalie radiometriche presenti al suolo. Dall'analisi delle prime elaborazioni eseguite, è stato possibile evidenziare, con ottima attendibilità geometrica, la presenza di alcune strutture sepolte finora non note all'interno dell'area oggetto di sperimentazione. In particolare, già dall'analisi dall'immagine rappresentata a pseudo-colori (vedi Figura 4.a), sono presenti forti discontinuità di colore in coincidenza della presenza di dette strutture. Ciò è stato pienamente confermato da operazioni fra bande differenti, che hanno permesso una classificazione SAM sia di tipo *supervised* che *unsupervised* dell'intera area (vedi Figura 4.b).

Si nota chiaramente la presenza di una cinta muraria e delle fondazioni di almeno due edifici.

Inoltre, dall'analisi delle componenti principali di un'ulteriore area a nord della precedente (vedi Figura 4.c), è possibile chiaramente riconoscere altri elementi di discontinuità radiometrica che fanno supporre la presenza di strutture quali un paleo-alveo, dei sistemi viari e numerosi edifici antichi ancora sepolti. Tale area sembra meritevole di ulteriori analisi e valutazioni archeologiche.

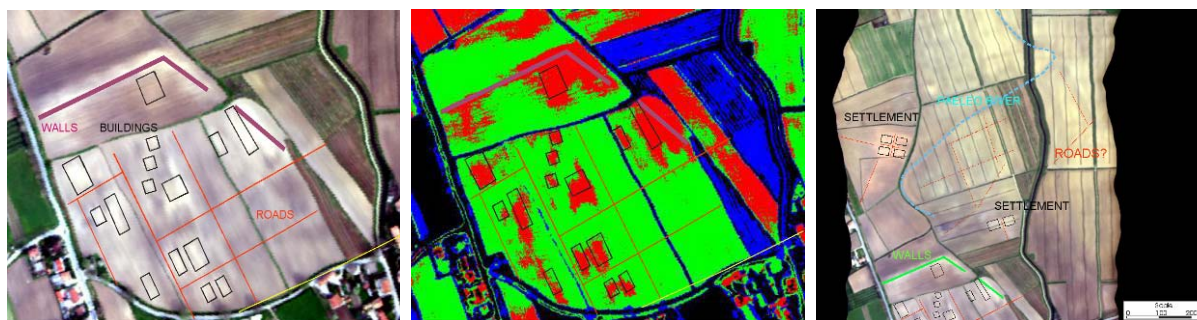


Figura 4 - Carta archeologica insieme ai dati AISA: a) c) pseudo-colori; b) classificazione SAM.

## 5. Conclusioni

In questo lavoro è stato messo in evidenza come, mediante integrazione fra dati laser e iperspettrali, può essere condotto uno studio archeologico di un'area considerando insieme caratteristiche radiometriche e geometriche. In particolare, i sistemi laser permettono la realizzazione di DSM/DTM ad altissima risoluzione, permettendo di riconoscere micro-ondulazioni dovute a strutture sepolte nel sottosuolo. I dati radiometrici forniti dai sensori iperspettrali permettono inoltre di ridurre l'ambiguità interpretativa derivante dal solo utilizzo del dato geometrico. In definitiva, l'integrazione di dati così diversi permette delle interpretazioni più oggettive, come confermato dall'applicazione all'area di Aquileia che ha evidenziato possibili strutture sepolte finora inedite.

## Bibliografia

- Ardissone P., Boccardo P., Rinaudo F. (2003), "Il rilevamento iperspettrale MIVIS nell'analisi archeologica della valle del Po", *Atti dell'VIII Conferenza Nazionale ASITA*, Verona, 1, 97-102.
- Coren F., Sterzai P. (2005), "Radiometric correction in laser scanning", *International Journal of Remote Sensing*, in stampa.
- Emmolo D., Franco V., Lo Brutto M., Orlando P., Villa B. (2004), "Hyperspectral techniques and GIS for archaeological investigation", *IAPRS&SIS*, Istanbul, XXXV, B7, 492-497.
- Giradino C., Brivio P.A., Sgavetti M. (2001), "Correzione atmosferica dei dati MIVIS", *Rivista Italiana di Telerilevamento* – Settembre 2000/Gennaio 2001, 20/21.