

ARIANNA TRAVIGLIA\*

# Identificazione di tracce archeologiche sul territorio tramite immagini da sensore aviotrasportato MIVIS: l'esempio di Aquileia

## Introduzione

Il riconosciuto alto potenziale di informazione contenuto nelle immagini telerilevate multi- e iper-spetttrali<sup>1</sup> ha promosso a livello globale lo sviluppo di un crescente interesse relativo al loro utilizzo quale supporto della ricerca archeologica tradizionale. Accanto ai dati spetttrali registrati tramite sensori montati su satellite, che hanno trovato ampia applicazione in numerosi progetti internazionali<sup>2</sup>, una diffusione pur di nicchia, ma consistente, hanno avuto le immagini spetttrali ottenute tramite sensori aviotrasportati. Questa tendenza ha incontrato terreno particolarmente favorevole in Italia dove nell'ultimo decennio il sensore iperspettrale aviotrasportato AA5000 Daedalus MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*)<sup>3</sup> ha trovato ampia e pressoché preminente applicazione<sup>4</sup> all'interno di varie ricerche topografiche.

MIVIS è un sistema di ripresa iperspettrale simultanea che opera nelle regioni dello spettro elettromagnetico dal Visibile all'Infrarosso Termico, con alta risoluzione spetttrale ed un elevato numero di bande (102)<sup>5</sup>. L'ampia copertura spetttrale e i molteplici, ristretti canali di MIVIS (fig. 1), registrati da un sensore modulare dotato di 4 spettrometri, forniscono una accurata registrazione dell'informazione che permette una precisa definizione delle caratteristiche di assorbimento di una varietà di materiali presenti sulla superficie terrestre e l'estrazione di informazioni chimico-fisiche dell'ambiente, consentendo di conseguenza l'individuazione automatica della composizione degli elementi presenti sulla superficie terrestre.

La particolare attenzione a questo sensore iperspettrale e alle sue applicazioni in ambito archeologico si è verificata in Italia a seguito del suo acquisto da parte del CNR nell'ambito delle attività del LARA (Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali)<sup>6</sup>. Le ricerche si sono inizialmente concentrate soprattutto nell'Italia del Sud, in particolare in Sicilia, dove l'area archeologica di Selinunte è stata per prima oggetto di sperimentazione delle potenzialità di MIVIS in ambito di ricerca archeologica fin dal 1997<sup>7</sup>, poi proseguita negli anni successivi, consentendo grazie a differenti elaborazioni delle immagini l'identificazione di lineazioni rapportabili alla struttura viaria della città antica<sup>8</sup>.

Dal 1999 l'applicazione dei dati MIVIS è stata estesa ad altre zone della Sicilia, includendo Mozia<sup>9</sup>, Alesa<sup>10</sup>, Piazza Armerina<sup>11</sup>, Soriana<sup>12</sup>, Marsala<sup>13</sup>, tutte aree dove MIVIS ha permesso sovente di confermare o smentire precedenti ipotesi basate su ricerche topografiche di tipo tradizionale e sulla fotointerpretazione di immagini aeree.

Altre ricerche che sfruttano le potenzialità delle immagini MIVIS sono state avviate nel 2005 in Puglia, nell'area archeologica di Arpi<sup>14</sup>, dove i dati iperspettrali hanno consentito l'individuazione di tracce mai rilevate in precedenza tramite l'aerofotointerpretazione classica, e in quella di Siponto<sup>15</sup>, dove la teoria della forma trapezoidale della città è stata corretta in seguito alla lettura delle immagini MIVIS e modificata parimenti l'attestazione della linea N della cinta muraria.

Nel Nord Italia, la stagione di utilizzo del dato MIVIS in funzione archeologica ha avuto inizio a partire dal 2002: la sua applicazione si è concentrata in due zone geografiche diametralmente opposte, in Piemonte e in Friuli Venezia Giulia, con gli studi realizzati lungo la vallata del Po<sup>16</sup>, nella zona urbana di Aquileia<sup>17</sup> e nella sua area sub-

\* Università di Venezia Ca'Foscari, Dipartimento di Scienze dell'Antichità e del Vicino Oriente.

<sup>1</sup> Si adotta qui la distinzione terminologica che deriva dalla classificazione dei sensori in base al loro campionamento spetttrale, intendendo come radiometri multispettrali quelli che misurano in 2-10 bande spetttrali e come radiometri iperspettrali quelli che misurano in 10-200 bande spetttrali contigue.

<sup>2</sup> Per un riassunto relativo alla storia delle applicazioni delle immagini satellitari all'indagine archeologica si veda CAMPANA 2004, pp. 279-283.

<sup>3</sup> Il sensore, gestito operativamente dalla CGR - *Compagnia Generale Riprese Aeree* di Parma, è installato su un bimotore turboelica CASA 212/C.

<sup>4</sup> Si tratta praticamente dell'unico tipo di sensore iperspettrale aviotrasportato usato in ricerche italiane; l'unico altro esempio italiano è quello del sensore AISA Eagle ([www.specim.fi](http://www.specim.fi)) utilizzato in concomitanza con MIVIS nell'ambito di una recente ricerca (COREN *et Al.* 2005).

<sup>5</sup> Per quanto attiene le specifiche tecniche del sensore si rimanda al sito internet della CGR <http://www.cgr.it/tecnologie/mivis.html>, al sito del LARA <http://www.lara.rm.cnr.it/italiano/mivis/> ed al numero speciale (2000) della *Rivista Italiana di Telerilevamento*.

<sup>6</sup> BIANCHI *et Al.* 1998, pp. 323-324; <http://www.lara.rm.cnr.it/italiano/lara/index.html>.

<sup>7</sup> BIANCHI *et Al.* 1997.

<sup>8</sup> CAVALLI *et Al.* 1998, pp. 343-346; da ultimo CAVALLI, MARINO, PIGNATTI 2003, p. 31.

<sup>9</sup> BIANCHI *et Al.* 1999.

<sup>10</sup> BELVEDERE *et Al.* 2001; BELVEDERE *et Al.* 2004.

<sup>11</sup> EMMOLO *et Al.* 2003.

<sup>12</sup> EMMOLO *et Al.* 2004.

<sup>13</sup> MEROLA 2004.

<sup>14</sup> CAVALLI *et Al.* 2005; MEROLA *et Al.* 2006, p. 304, 306-308.

<sup>15</sup> MEROLA *et Al.* 2006, pp. 304-305, 308.

<sup>16</sup> BOCCARDO, TOMOLO, SPANÒ 2002, p. 310; ARDISSONE, BOCCARDO, RINAUDO 2003.

<sup>17</sup> SUGAN *et Al.* 2003 e COREN *et Al.* 2005.

Porta Ottica	Regione Spettrale	Intervallo Bande	Intervallo Valori Spettrali ( $\mu\text{m}$ )
I	Blu	1-4	0,431-0,512
	Verde	5-9	0,512-0,611
	Rosso	10-17	0,611-0,773
	Infrarosso Vicino	18-20	0,772-0,833
II	Infrarosso Vicino	21-28	1,15-1,55
III	Infrarosso Medio	29-92	1,985-2,479
IV	Infrarosso Termico	93-102	8,21-12,7

1

Fig. 1 - Tavola della copertura spettrale del sensore MIVIS.

Fig. 2 - L'area oggetto di indagini tramite immagini MIVIS: il comune di Aquileia e i limitrofi comuni di Terzo e Fiumicello.



2

ed extra-urbana<sup>18</sup>. Per il centro Italia si segnala al momento solo la ricerca condotta nell'area archeologica di Villa Adriana, dove le immagini MIVIS hanno permesso di identificare tracce probabilmente pertinenti ad edifici complessi e strutture in prossimità del Teatro Greco e del Teatro Marittimo<sup>19</sup>.

I differenti progetti che hanno usufruito dei dati di questo sensore e che si sono concentrati ciascuno su specifici aspetti della elaborazione delle immagini iperspettrali (dall'uso di bande termiche alle analisi spettrali di tipo statistico) hanno mirato a valutarne il potenziale come fonte complementare di informazione per scopi archeologici, mettendo in risalto gli indubbi aspetti positivi dello strumento. Vanno tuttavia segnalate maggiormente, accanto agli evidenti risultati colti attraverso lo sfruttamento del dato spettrale, le molte difficoltà insite nella gestione, elaborazione ed interpretazione di queste immagini, onde non creare eccessive e immotivate aspettative sulle potenzialità dello strumento e sui risultati che esso consente di conseguire. Per questo motivo si è ritenuto opportuno in questa sede presentare i risultati conseguiti nell'ambito della ricerca eseguita nel territorio della città romana di Aquileia dando conto anche dei limiti tecnologici del prodotto e dei possibili equivoci che possono verificarsi col suo uso, specialmente quando il processo elaborativo sia disgiunto da quello valutativo e interpretativo.

### Area d'indagine: motivazioni metodologiche della scelta

L'area oggetto della ricerca include la superficie urbana, sub- ed extra-urbana di Aquileia<sup>20</sup> e i limitrofi comuni di Terzo di Aquileia e Fiumicello (UD), estendendosi per circa un centinaio di km<sup>2</sup>, distribuiti in poligono di forma allungata, di circa 7 km in larghezza e 13 km in lunghezza (fig. 2).

L'ambito territoriale, che include anche un tratto di costa, consiste di terreno pianeggiante la cui attuale morfologia dipende fortemente da modificazioni in cui le variazioni del livello marino hanno giocato un ruolo fondamentale. La presenza in antico di fiumi di media e piccola portata, noti attraverso le fonti antiche o facilmente identificabili a livello di tracce di paleovalvi tramite telerilevamento, ha fortemente trasformato il territorio nel passato e condizionato il suo sfruttamento.

La ricerca archeologica locale ha favorito nel corso degli anni problematiche connesse con l'area strettamente urbana inclusa all'interno dei differenti circuiti murari<sup>21</sup>, focalizzandosi principalmente sulle caratteristiche planimetriche della città antica e sul suo impianto monumentale. Per quanto attiene il territorio circostante, solo più recentemente sono state eseguite ricerche topografiche miranti alla ricostruzione del sistema insediativo suburbano o all'indagine relativa allo sfruttamento delle risorse e della distribuzione funzionale degli spazi suburbani<sup>22</sup>. Ciò rappresenta indubbiamente un settore meritevole di approfondimento in quanto lo spazio suburbano costituisce una fondamentale area di investigazione per una totale comprensione delle forme dell'organizzazione strutturale della città stessa e della dipendente periferia<sup>23</sup>.

<sup>18</sup> TRAVIGLIA 2005a.

<sup>19</sup> MEROLA 2004, p. 204.

<sup>20</sup> Si ritiene superflua in questa sede un'introduzione del quadro storico della città di Aquileia e si rimanda alla raccolta bibliografica presente in BERTACCHI 2003.

<sup>21</sup> Relativamente all'organizzazione urbanistica della città si veda la ricostruzione a cura di STRAZZULLA 1989; chiarimenti su determinati complessi monumentali pubblici compaiono in BERTACCHI 2003; MASELLI SCOTTI, ZACCARIA 1998; *Scavi ad Aquileia* 1994.

<sup>22</sup> CARRE, MASELLI SCOTTI 2001, pp. 236-237; MAGGI, ORIOLO 1999; BOTTAZZI, BUORA 1999; ORIOLO 1998; MASELLI SCOTTI 1998, pp. 466-467; BUORA 1992.

<sup>23</sup> MAGGI, ORIOLO 1999, p. 99.

Da questo punto di vista, un consistente numero di problematiche relative all'area rimaste ancora aperte o non dibattute sufficientemente fino al raggiungimento di una condivisa opinione, quali localizzate incertezze relative alla rete di comunicazione che connetteva Aquileia con le altri maggiori città romane<sup>24</sup>, l'espansione o contrazione delle aree marine<sup>25</sup>, la migrazione degli alvei fluviali<sup>26</sup> e la topografia suburbana di Aquileia<sup>27</sup> possono beneficiare fortemente dell'integrazione dei dati iperspettrali con altri dati telerilevati e con la consistente massa di informazioni storico-archeologiche e ambientali edite.

Accanto a queste motivazioni, e per tentare di dare nuovi spunti ed elementi a ricerche già in essere, la scelta dell'area è stata determinata anche da motivi d'ordine tecnico-pratico e metodologico. Innanzitutto esiste una lunga tradizione di studi e ricerche dell'area indagata derivate da scavi archeologici estensivi, ricognizione sistematica a terra, aerofotointerpretazione, documentazione epigrafica, studio delle fonti antiche, che forniscono una enorme quantità di informazioni essenziali e imprescindibili per la corretta interpretazione e comprensione delle tracce telerilevate.

Secondariamente e connesso con la motivazione appena addotta, il forte potenziale archeologico della zona e la conseguente elevata probabilità di individuare tramite telerilevamento siti archeologici, stante una serie di altri fattori in questo senso favorevoli, sono estremamente utili nella fase iniziale di una ricerca di telerilevamento spettrale per la definizione di una metodologia di studio e di analisi valida per l'area e nella calibrazione del sistema in determinate condizioni morfologico-ambientali, senza contare il fatto che la stessa densità archeologica dell'area richiederebbe l'uso standardizzato di strumenti e tecnologie efficaci a supporto alla ricerca tradizionale<sup>28</sup>.

Da un punto di vista più strettamente tecnico e di opportunità, ha contribuito alla definizione di quest'area come campione per la ricerca il fatto che si disponga per la porzione di territorio in esame di due gruppi relativamente recenti di strisciate MIVIS riprese in stretta contiguità temporale (diurna e notturna) e pressoché in sovrapposizione spaziale, che permettono quindi un approccio multitemporale all'investigazione e la possibilità di applicare determinati tipi di elaborazione d'immagine che sfruttano, ad esempio, le caratteristiche del riscaldamento termico del terreno. Il terreno stesso di questa zona, leggero e dalle buone caratteristiche di drenaggio, presenta poi di per sé determinate qualità fisico-chimiche che si prestano particolarmente all'applicazione di tecniche di rilevamento, favorite ulteriormente dai stabili e favorevoli fattori climatici locali. Infine sono apparse ideali le condizioni ambientali del luogo in cui il territorio di Aquileia si colloca, una piana alluvionale in gran parte devota ad uso agricolo, con rotazione e alternanza di colture e terreni a riposo, fattori questi, come noto, che creano le condizioni ideali affinché le superfici fungano da mediatori efficaci della presenza di eventuali disomogeneità sotterranee (fig. 3).

## Obiettivi, approccio e metodologia della ricerca

Lo studio è stato finalizzato all'identificazione su immagini iperspettrali di tracce superficiali e anomalie presenti sull'area campione che potessero essere messe in relazione alla presenza di giacimenti archeologici sepolti. I metodi per la individuazione di tali depositi si basano sulla misurazione di alcune specifiche proprietà fisiche che differenziano i suoli che ricoprono discontinuità sepolte dai terreni e dalla vegetazione circostanti e che li rendono quindi passibili di individuazione autoptica o, sfruttando le potenzialità d'elaborazione dell'immagine digitale, automatica.

Si sono tentati di definire sin dall'inizio i limiti tecnici e metodologici della ricerca e di individuare, anche sulla base di pregresse esperienze, le problematiche d'ordine pratico e teorico (e la loro soluzione) che derivano dalla produzione di elevate quantità di nuove immagini, frutto dell'elaborazione delle originali, situazione inevitabile quando si vadano ad utilizzare dati spettrali che dispongano di un così elevato numero di bande. Lo studio si è avvalso per questo di un GIS quale sistema di gestione ed integrazione dei differenti dati telerilevati e delle informazioni da essi estratte, nonché di ogni altro dato utile alla loro corretta interpretazione.

<sup>24</sup> In relazione ai tracciati delle vie romane nel suburbio aquileiese e ad eventuali discussioni ancora aperte si vedano MAGGI, ORIOLO 2004; MAGGI, ORIOLO 1999, pp. 108-110, in particolare fig. 6; ROSADA 1998, p. 243 sgg.; *Aquileia Romana* 1991, p. 71; BOSIO 1991; MIRABELLA ROBERTI 1990; GRILLI 1979.

<sup>25</sup> BOTTAZZI, BUORA 1999, pp. 61-66; GADDI 2001, pp. 261-271.

<sup>26</sup> ARNAUD-FASSETTA *et Al.* 2003, pp. 238-240; CARRE, MAROCCO, MASELLI SCOTTI, PUGLIESE 2003, p. 307, fig. 4; CARRE, MASELLI SCOTTI 2001, p. 239, fig. 13; MAGGI, ORIOLO 1999, pp. 112-114; TORTORICI 1997, pp. 315-318; BERTACCHI 1990, pp. 227-253.

<sup>27</sup> MAGGI, ORIOLO 1999, pp. 99-123.

<sup>28</sup> Interessanti esempi sono a questo riguardo il progetto SARA della locale Soprintendenza per i Beni Archeologici (1995-1996), in MASELLI SCOTTI, PARONUZZI, PUGLIESE 1999, e le citate analisi di COREN *et Al.* 2005 e SUGAN *et Al.* 2003.

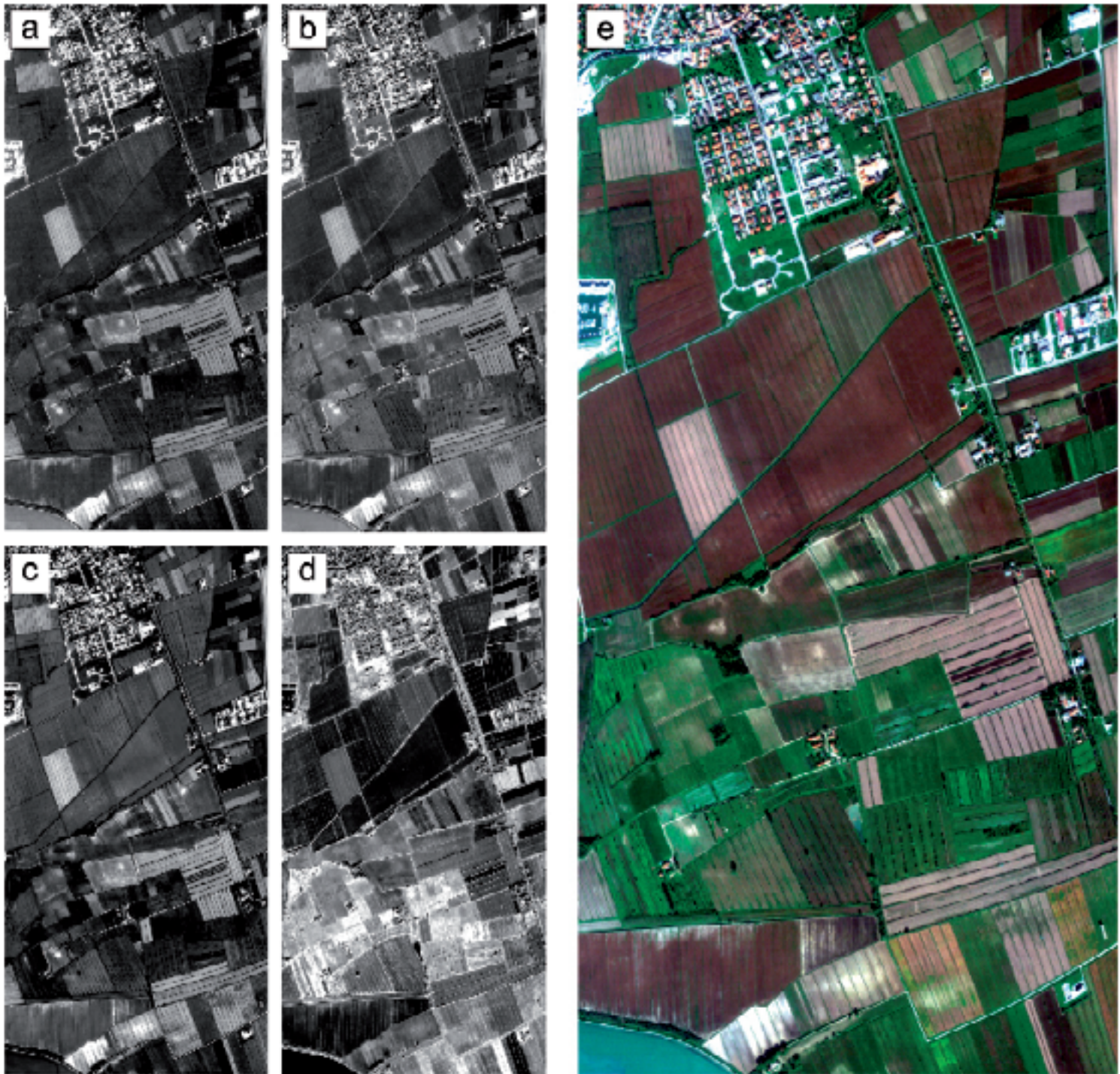


Fig. 3- L'area urbana di Aquileia ed il suo territorio sub-urbano in direzione della costa in una strisciata MIVIS, in *composite* Vero Colore (RGB delle bande 13-7-3). (Autorizzazione immagini MIVIS: Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, P.M.T./1295/2100, 25 Gennaio 2005).

L'ambito operativo dell'indagine è stato definito dalla stessa risoluzione spaziale dello strumento, che nel caso presentato è pari a  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ <sup>29</sup>: tale livello di dettaglio si rivela adatto ad applicazioni archeologiche solo in ambito di ricerche estese in macro-aree dal momento che le tracce che il sensore per le sue caratteristiche intrinseche e le sue capacità può teoricamente individuare devono avere, nella migliore delle ipotesi, una superficie superiore mediamente a  $50 \text{ m}^2$  o una lunghezza di almeno  $9 \text{ m}$ ; più realisticamente, e sempre nell'ambito di una situazione favorevole, queste cifre vanno elevate ad un'area compresa tra  $80$  e  $100 \text{ m}^2$  e una lunghezza di  $20 \text{ m}$ . Come immediata conseguenza, l'applicazione di queste immagini in ristrette aree urbane prive di edificazione o limitate porzioni di territorio si devono considerare potenzialmente inadeguate: se il sensore MIVIS può essere efficacemente utilizzato nell'identificazione di strutture sufficientemente ampie e di insediamenti rurali, canali e reti viarie, una grande quantità di oggetti archeologici di limitata estensione rimangono inevitabilmente non identificabili. Per tale motivo ci si è qui limitati ad utilizzare il dato iperspettrale principalmente nelle zone che tenessero conto di questa precipua caratteristica, focalizzando l'indagine in ambito extraurbano, privo di eccessivi elementi di disturbo a questo tipo d'indagine, e limitando il numero dei test in area urbana a pochi interventi mirati, all'interno di spazi non edificati, necessari comunque per determinare l'utilità dell'applicazione in contesti circoscritti e fortemente alterati. Gli ambiti spaziali di investigazione vengono ulteriormente ridotti quando si tengano presenti le caratteristiche di un territorio come Aquileia, che è stato fortemente modificato nella macroscala dagli interventi di bonifica e dall'intenso sfruttamento agricolo, nonché, nella microscala, da localizzati interventi di saggi archeologici realizzati attorno alla metà del secolo scorso, la cui documentazione non è sempre rinvenibile o comunque edita.

Per quanto attiene i prodotti dell'elaborazione delle immagini, particolare risalto in fase progettuale è stato dato alla accennata problematica che si genera automaticamente con l'uso di immagini costituite da molteplici canali, ovvero quella della sovrapproduzione di nuove immagini frutto dei differenti processi applicati, ciascuna da interpretare singolarmente. Si ha qui infatti a che fare con immagini dotate di 102 bande e anche utilizzandone solo una parte per successive elaborazioni, selezionandole sulla base della loro qualità intrinseche, il numero finale delle immagini da analizzare -e di conseguenza delle tracce su esse individuabili- diviene esponenziale. Questo comporta anche come conseguenza la necessità di dover fronteggiare un'elevata ridondanza dei dati che rallenta il processo interpretativo delle tracce e delle anomalie, in quanto molte elaborazioni applicate alle immagini producono risultati simili o assimilabili che permettono di individuare le stesse tracce, senza aumento dell'informazione. È stato quindi imprescindibile individuare metodologie che permettessero di snellire la procedura di gestione delle immagini elaborate e delle tracce individuate in processi dall'esito analogo. Per fare questo si è testata singolarmente la rilevanza di ciascuna delle elaborazioni eseguite sul dato grezzo, identificando statisticamente quante anomalie ciascun processo permette di individuare, e a quale livello di verificabilità, ed estrapolando contemporaneamente il tipo di ambiente e le condizioni in cui tali processi forniscono migliori risultati. Si sono anche definiti metodi alternativi di riscontro di attendibilità e di validazione delle tracce identificate a prescindere dalla verifica tramite ricognizione diretta, non effettuabile in questa fase della ricerca. Infine si è tentato, pur nei limiti imposti dalla non omogeneità del materiale telerilevato utilizzato, di confrontare i risultati ottenibili dall'informazione spettrale con quelli conseguibili tramite l'aerofotografia tradizionale: il dato non è secondario considerati gli ancor alti costi economici e in termini di risorse umane dell'utilizzo di immagini spettrali.

A partire da queste premesse e per una corretta valutazione ed interpretazione delle tracce estratte dall'analisi dei dati MIVIS, è stato seguito un flusso di operazioni che ha incluso l'elaborazione delle immagini, la selezione di quelle più significative, l'analisi visiva a schermo del loro contenuto e il confronto costante con altre informazioni utili alla loro interpretazione.

Una serie di procedure d'analisi, di cui si renderà conto in specifico a seguire, sono state applicate alle immagini MIVIS con lo scopo di visualizzare, al termine dei processi, i dati digitali in modo più efficace, enfatizzando specifiche alterazioni della tes-

<sup>29</sup> La risoluzione a terra delle immagini MIVIS varia fortemente a seconda dell'altitudine di volo al momento della ripresa, che è generalmente compresa tra  $1500$  e  $2500 \text{ m}$ , con conseguente risoluzione tra  $3 \times 3$  e  $5 \times 5 \text{ m}$ ; nel caso presentato la quota di volo segnalata nei registri di volo è di  $1500 \text{ m}$ .



Fig. 4- Mosaico delle strisciate MIVIS 1, 2, 3, 4, 5 (15 Ottobre 1998) non rettificata relative ad Aquileia e comuni limitrofi (autorizzazione immagini MIVIS: Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, P.M.T./ 1295/2100, 25 Gennaio 2005).

situra superficiale. Lo scopo delle tecniche di miglioramento dell'immagine è di aumentare e ottimizzare la distinzione ottica tra tracce registrate nella scena e le circostanti aree, generando una nuova immagine dove l'informazione utile è più facilmente identificabile. Differenti tecniche di miglioramento e trasformazione dell'immagine sono state adottate e successivamente comparate nei risultati: va sottolineato come alcune si siano dimostrate inefficaci allo scopo archeologico o infruttuose come processi elaborativi stessi e come non abbiano prodotto i risultati attesi in termini di risultanza visiva. È chiaro infatti che non esiste uno specifico processo che possa produrre un'immagine che assolve alle necessità della ricerca archeologica e che il processo di identificazione delle elaborazioni utili a specifici scopi deve procedere per tentativi e confronti. Come nel caso della foto aerea tradizionale, il risultato dell'elaborazione dell'immagine iperspettrale deve essere decodificato attraverso gli usuali fattori della fotointerpretazione classica e per una corretta lettura interpretativa delle tracce è indispensabile mettere in relazione queste ultime con altri dati di natura differente. L'integrazione delle informazioni per l'interpretazione dei dati MIVIS è qui raggiunta attraverso un'architettura GIS che combina questi ultimi con informazioni archeologiche, topografiche, idrologiche, altimetriche e amministrative, raccolte in forma di *dataset* georiferiti. Una raccolta sistematica di dati editi è stata dunque realizzata preliminarmente alla ricerca e organizzata all'interno della piattaforma GIS allo scopo di acquisire quante più informazioni possibili, mappabili o mappate, a supporto del processo di decodifica delle tracce estratte dalle immagini telerilevate. Tracce e anomalie identificate sulle scene MIVIS sono state registrate disegnandole in appositi livelli grafici del sistema informativo geografico per essere più agevolmente comparate con le altre fonti di informazione ed è stato attribuito a ciascuna d'esse un valore di affidabilità archeologica, dedotto dall'integrazione dei dati a disposizione. Questa procedura permette anche la comparazione in modo quantitativo e statistico del numero delle tracce disegnate per valutare il potenziale di ciascuna delle elaborazioni eseguite in termini di capacità di enfattizzazione delle tracce stesse: un metodo efficace per identificare il processo più utile ai fini di un determinato risultato. In questo modo il GIS non costituisce solo il "gestore" di un palinsesto di informazioni grafiche, ma diviene parte integrante del processo interpretativo e di pianificazione di successive, più mirate e consapevoli analisi spettrali.

Dal punto di vista cartografico sono state utilizzate all'interno del sistema informativo tre tipologie di materiali: di base, tematici e storici. Accanto alla cartografia di base rappresentata dalla C.T.R. in formato digitale in scala di dettaglio 1:5000<sup>30</sup> è stata acquisita altra cartografia tematica realizzata a cura della Regione Friuli Venezia Giulia, quale ad esempio il Piano regolatore dell'area<sup>31</sup> ed una Carta relativa alle zone sottoposte a vincolo archeologico secondo la L. 89/1939<sup>32</sup> ed alcuni stralci della Carta Archeologica del Friuli promossa dall'ufficio della Pianificazione Regionale e realizzata dal Dipartimento di Scienze dell'Antichità dell'Università di Trieste<sup>33</sup>. È stato inoltre possibile reperire in copia ad alta risoluzione un discreto numero di carte storiche provenienti da archivi austriaci<sup>34</sup> che hanno fornito interessanti informazioni legate alle trasformazioni dell'uso del territorio nel corso dei secoli. Si tratta principalmente di carte realizzate durante il periodo di dominio asburgico relative a progetti o opere di bonifica sul territorio che in alcuni casi, per la loro accuratezza e precisione di realizzazione, sono facilmente georiferibili e mettono a disposizione un patrimonio di informazioni non più riscontrabili sul territorio.

Con riferimento ai dati telerilevati, oltre ai dati MIVIS si è reso necessario avere a disposizione altre immagini. La risoluzione spaziale dei dati MIVIS infatti, per certi versi insufficiente al riconoscimento visivo e all'identificazione di determinati oggetti, ha reso imprescindibile per la fase interpretativa il supporto di altri dati rilevati a distanza che sono stati individuati nelle Ortofoto digitali<sup>35</sup> dell'area campione, di risoluzione spaziale pari ad 1 metro, e in alcune foto storiche dell'area<sup>36</sup>. Le immagini MIVIS grezze (*raw*) utilizzate in questa ricerca, fornite ad un limitato livello di pre-elaborazione (cosiddetto "livello 1") come compromesso costi/benefici, sono state riprese a distanza di 2 giorni durante l'ottobre 1998 in due differenti orari<sup>37</sup>. L'area indagata è stata coperta da un totale di 10 strisciate (fig. 4), 5 per ciascun giorno di ripresa, con copertura spaziale doppia per ciascuna strisciata.

<sup>30</sup> Oltre alla versione più aggiornata della C.T.R. numerica si sono acquisiti tramite scansione anche elementi della Carta Tecnica precedente, che hanno fornito talvolta utili indicazioni sul cambio di orientamento di canali irrigui.

<sup>31</sup> "Piano regolatore di Aquileia. Vincoli, 2000"

<sup>32</sup> "Carta Tecnica della Regione 109013. Vincoli legge 1089/39": la carta è stata realizzata avendo come base la precedente edizione della C.T.R.

<sup>33</sup> MORSELLI 1999; la presente cartografia esclude in realtà le aree sottoposte a vincolo evidenziate nella cartografia di cui alla nota precedente, ovvero le zone del centro urbano antico di Aquileia ed un vasto settore del suburbio più prossimo alla cinta muraria.

<sup>34</sup> Di particolare interesse si sono rivelate (in ordine cronologico): "Indice alfabetico e numerico che spiega i lavori fatti e da farsi in Aquileia e sue vicinanze" (metà XVIII sec.); "Theil des Gorzer Districts" (1784); "Carta della Lombardia, del Veneto e dell'Italia Centrale. Foglio H.4" (1877); "Plan der Aquilejer Situation" (1885?).

<sup>35</sup> Data di ripresa: 12 maggio 1998; mosaico digitale della strisciata 48E -Fotogrammi 5177, 5178, 5179 e della strisciata 49F -Fotogrammi 6016, 6017, 6018. Autorizzazione all'utilizzo ricevuta dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, P.M.T./1295/2100, 25 Gennaio 2005.

<sup>36</sup> Si tratta di immagini realizzate nel 1938, che riprendono tratti del territorio in oggetto.

<sup>37</sup> Gli orari di ripresa sono stati: 9 del mattino (cosiddetto "notturno") e 12 (cosiddetto "diurno"). Gli scatti di prima mattina, realizzati prima del riscaldamento della superficie terrestre dovuto al sole, possono essere considerati come portatori di valori di temperature vicine ai minimi notturni.

## Elaborazione digitale delle immagini MIVIS

Lo scopo primario della ricerca è stato quello di testare le immagini MIVIS nell'identificazione di tracce archeologiche nel particolare contesto aquileiese: per fare questo, vari processi digitali comportanti manipolazione dell'immagine sono stati applicati allo scopo di trattare l'immagine per le successive fasi dell'interpretazione<sup>38</sup>. In questa sede verranno presentate solo alcune delle molteplici elaborazioni effettuate, scegliendole tra quelle ritenute più interessanti per i risultati conseguiti a seguito di una valutazione statistica del numero di tracce individuate.

## Pre-elaborazione

Una difficoltà primaria che ci si trova ad affrontare quando si utilizzano dati MIVIS, e più in generale dati da sensori spettrali aviotrasportati, è la loro rettifica e geo-referenziazione<sup>39</sup>. Le immagini, infatti, sono fortemente affette da distorsioni panoramiche dovute alla geometria dello scanner e dagli effetti introdotti dalle perturbazioni nella posizione e nell'assetto della piattaforma aerea. È prassi invalsa operare una correzione geometrica che ripristini una corretta geometria reale e rettifichi l'immagine come prima fase di uno studio sul dato spettrale, operazione che si rende necessaria non solo per rendere più comprensibili e identificabili le forme delle tracce sul terreno, ma anche per importare i dati telerilevati all'interno di un sistema informativo territoriale dove esplicitare la loro integrazione con informazioni d'altra natura. Va tuttavia tenuto in considerazione che tutte le più comuni procedure adottate per la rettifica di immagini spettrali (RST, Polinomiale, Triangolazione di Delaunay ecc.) rischiano di compromettere le informazioni radiometriche del *dataset*. Questo si rivela particolarmente rilevante se, come nel presente caso, analisi radiometriche vengono applicate ai dati trasformati. Su questa base, nell'ambito dell'esperienza qui presentata, si è scelto di utilizzare solamente dati grezzi nella fase di analisi e di rinviare ad un momento successivo la rettifica e la geo-referenziazione del dato MIVIS per la sua integrazione all'interno del GIS.

Un altro aspetto da tenere in considerazione durante la fase di pre-elaborazione è la distorsione atmosferica e la conseguente necessità di una correzione per le alterazioni del segnale da essa cagionate. Le componenti atmosferiche possono infatti comportare due principali tipi di effetti sulla radianza registrata dal sensore MIVIS. Uno è collegato al fatto che, a specifiche lunghezze d'onda, l'atmosfera assorbe luce, diminuendo in questo modo la quantità di radianza che può essere osservata. Il secondo effetto risiede nella luce diffusa dall'atmosfera nel campo di ripresa del sensore che inserisce una indesiderata fonte di radianza che non ha reale connessione con le tracce riscontrabili sulla superficie terrestre. Allo stato attuale della ricerca, non sono ancora stati definiti appropriati algoritmi da applicare ai dati MIVIS per cui non è stato possibile applicare una specifica correzione atmosferica per i dati utilizzati e, in aggiunta, nessun dato ripreso a terra al momento degli scatti da poter utilizzare per implementare le correzioni era stata fornito con le immagini.

Per ovviare invece ai limiti dei dati dovuti ad un'altra delle imperfezioni del dato spettrale, il rumore di sistema, e per migliorare l'accuratezza dei risultati ottenibili si è scelto di applicare un processo di pre-elaborazione automatico, ottenendo una drastica riduzione del disturbo dovuto alle limitazioni del segnale e al processo di registrazione dei dati, operazione ineludibile in quanto in alcuni casi il rumore non solo degradava il reale contenuto informativo dell'immagine, ma lo mascherava pure, al punto che diverse bande delle immagini si rivelavano completamente inutili. Il processo di rimozione del rumore utilizzato si compone di 2 fasi: la prima, M.N.F. (*Minimum Noise Fraction*), estrae il rumore di sistema dalle bande originali e lo segrega<sup>40</sup>, la seconda consiste nella trasformazione inversa della precedente fase (*Inverse M.N.F.*) che permette l'eliminazione del rumore dall'immagine attraverso il computo di un calcolo che escluda le componenti di rumore. I risultati ottenuti hanno mostrato un chiaro miglioramento delle informazioni in termini di rapporto segnale/rumore e sono stati usati in luogo dei dati originali per la maggior parte delle analisi successivamente descritte (fig. 5).

<sup>38</sup> Il software utilizzato per il processing delle immagini MIVIS è R.S.I. Envi 4.0. Si ringrazia la Dott.ssa P. Filippi della R.S.I. Italia per la concessione di una licenza temporanea a fini di ricerca.

<sup>39</sup> Si veda sull'argomento DE PAULIS, CAVAZZINI 2000, pp. 19-25.

<sup>40</sup> BOARDMAN, KRUSE 1994.



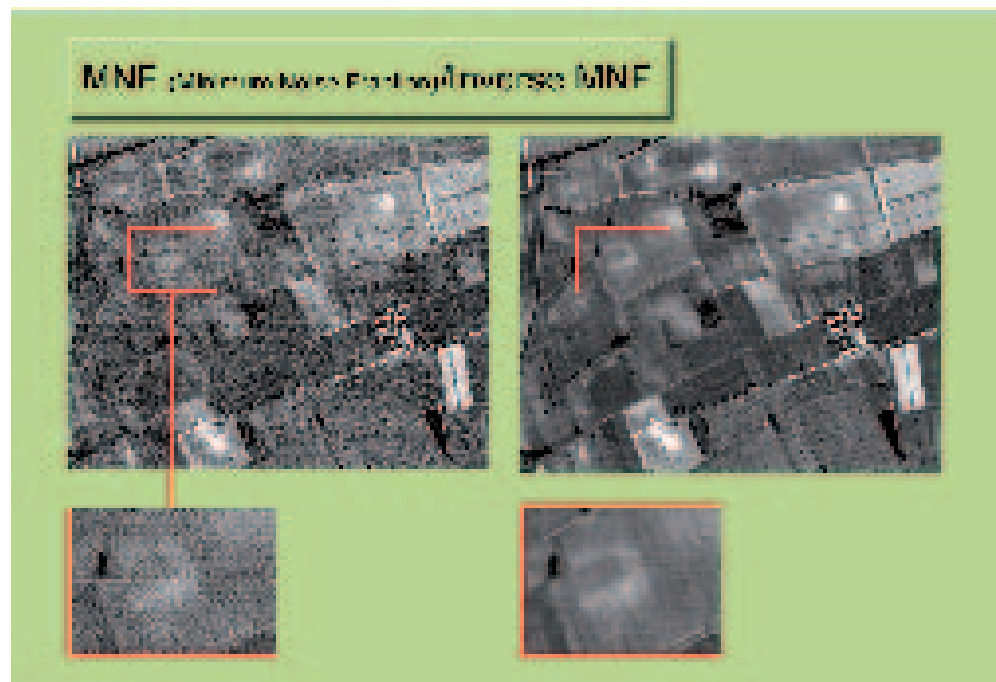


Fig. 5-Confronto di banda originale della regione spettrale dell'Infrarosso Medio (b. 57) di una strisciata MIVIS con la relativa immagine migliorata con procedura *Inverse M.N.F.*: è evidente il miglioramento dell'informazione in termini di rumore del segnale.

## Indici di Vegetazione

Per anni la ricerca archeologica si è servita del rilevamento fotografico delle cosiddette tracce da vegetazione per l'individuazione di depositi archeologici sepolti. Come noto, l'eterogeneità della tessitura del sottosuolo può avere, in determinate condizioni, un immediato e forte riflesso nella crescita della vegetazione determinando l'apparire di quelli che vengono denominati in termine anglosassone, a seconda dei contesti vegetazionali, *grass-*, *weed-*, o *crop marks*. Il meccanismo di formazione di questo tipo di traccia risiede nel fatto che, in presenza di strutture sepolte, la vegetazione soprastante ha una crescita più lenta rispetto alla circostante, così come uno sviluppo inferiore e un prematuro ingiallimento. Per contro, quando nel sottosuolo siano presenti fosse e cavità riempite e livellate, la crescita della vegetazione sarà più veloce rispetto alla circostante, il vigore della pianta più accentuato e la maturazione finale ritardata<sup>41</sup>. Gli Indici di Vegetazione (I.V.), ovvero gli studi relativi alla qualità della vegetazione ottenuti a partire da immagini spettrali, hanno trovato di conseguenza ampia applicazione nell'ambito della ricerca archeologica<sup>42</sup> in quanto, monitorandone le variazioni nel vigore, possono permettere l'identificazione dei depositi archeologici che favoriscono o al contrario limitano la crescita della vegetazione.

Operazioni di aritmetica spettrale (ovvero processi di addizione, sottrazione, moltiplicazione e divisione dei valori dei pixel di un canale per i corrispondenti di un altro canale) sulle bande del Rosso e Infrarosso Vicino trovano nell'ambito degli studi ambientali largo utilizzo nel monitoraggio della vegetazione, con particolare riguardo ai rapporti di banda, in quanto questi canali hanno dimostrato di essere sensibili indicatori della presenza e delle condizioni della vegetazione. Come risultato tali operazioni forniscono immagini che possono mostrare lo stato di salute della vegetazione delle piante, dove aree vegetate in salute appaiono generalmente in colori chiari e brillanti (più elevato il valore, più sana la vegetazione) e quelle con meno vigore presentano colore più scuro. Un numero considerevole di rapporti applicabili agli studi sulla vegetazione sono stati creati nel corso degli ultimi 30 anni<sup>43</sup>, ma la maggior parte sono tra loro equivalenti<sup>44</sup>: si basano tutti sul fatto la vegetazione rigogliosa riflette fortemente nell'Infrarosso Vicino e assorbe radiazione nella banda spettrale del Rosso.

Una consistente parte degli studi a finalità archeologica che hanno utilizzato indici di vegetazione in passato hanno applicato un particolare indice, denominato NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), un indice che, come il nome stesso indica,

<sup>41</sup> PICCARRETA, CERAUDO 2000, pp. 104-106; WILSON 2000, pp. 67- 80; AIVISI 1989, pp. 51-52.

<sup>42</sup> I primi studi eseguiti, a livello internazionale, risalgono al 1990 ad opera di T. Sever, pubblicati successivamente in SEVER 1998. In Italia, un primo accenno in PARMEGIANI, POSCOLIERI 1996, seguito a distanza d'anni da CAMPANA, PRANZINI 2001 (teoria) e CAMPANA 2002 (applicazioni al caso toscano).

<sup>43</sup> Per una disamina sui principali tipi di I.V. si vedano JACKSON 1983, e LOGAN, STRAHLER 1983.

<sup>44</sup> PERRY, LAUTENSCHLAGER 1984, pp. 169-182.

apporta una modifica (normalizzazione) al rapporto di bande ove questa si renda necessaria, ovvero, ad esempio, nei casi di differenze d'illuminazione presenti sulla scena, di ombre proiettate sull'immagine, di variazioni topografiche ecc. Per questa sua caratteristica di adattabilità a situazioni ambientali diverse, questo indice è stato utilizzato più come "standard" che come un processo appropriato scelto in base a specifiche caratteristiche ambientali e morfologiche dell'area sotto analisi, applicandolo di conseguenza indistintamente anche in zone in cui non era potenzialmente necessaria alcuna normalizzazione, come aree pianeggianti o uniformemente illuminate. Nonostante il diffuso impiego del NDVI in ogni tipo di condizione ambientale, altri I.V. possono produrre risultati migliori per gli scopi archeologici: il tipo di copertura vegetazionale e la sua densità sono fattori primari da considerare quando si selezionano il processo appropriato per valutare la biomassa di una determinata area, dato che questi due fattori possono fortemente influenzare i risultati del processo stesso. Una procedura che si è dunque ritenuta metodologicamente più corretta da seguire nell'ambito di questa ricerca è stata quella di applicare e testare differenti I.V. a seguito di un'attenta considerazione delle caratteristiche topografiche e morfologiche dell'area in oggetto. Questo significa che, nel studiare una vasta area contenente differenti coperture vegetazionali, può risultare utile applicare gli indici singolarmente a campi o aree con caratteristiche di copertura simili. Quando si siano testati più indici per una zona, i risultati raggiunti possono essere dapprima comparati tra loro tramite analisi multicriteriale per determinare il metodo migliore per valutare lo stato di salute della vegetazione nell'area "bersaglio" e secondariamente con le immagini originali MIVIS per verificare il miglioramento della visibilità delle tracce che essi offrono. Tale *iter* procedurale, sperimentato per la prima volta in ambito archeologico nel territorio aquileiese<sup>45</sup> dove, pure in una situazione per lo più di destinazione agricola del suolo, si riscontrano condizioni di crescita di vegetazione non omogenea o di densità eterogenea, ha permesso di confermare la necessità di investigare preventivamente il tipo di superficie in esame e che lo stesso tipo indice di vegetazione non può essere applicato indistintamente a tutte le situazioni ambientali.

È evidente che i risultati ottenuti sono da ascrivere unicamente alle condizioni ambientali del contesto e che test di questo tipo vadano effettuati ogniquale volta che ci si appresti ad utilizzare dati differenti ed esaminare ambiti dalle caratteristiche dissimili da quelle qui presentate. Inoltre, dai numerosi test eseguiti è apparso chiaro che non è possibile stilare una casistica assoluta della qualità dei risultati che si andranno ad ottenere applicando uno specifico indice in quanto esistono una serie di fattori, al di là del tipo di copertura vegetale, che influenzano fortemente il risultato che si può conseguire<sup>46</sup>. Ciò premesso, si presentano in questa sede i risultati relativi a tre Indici di Vegetazione calcolati e comparati per determinare il metodo migliore per la valutazione della vegetazione all'interno dell'area di studio: uno basato su semplice aritmetica spettrale (DVI) e due basati sul rapporto di bande (NDVI e MSAVI 2).

#### *DVI (Difference Vegetation Index)*

Il DVI consiste in una operazione di sottrazione dei valori dei pixel delle bande del Rosso e Vicino Infrarosso<sup>47</sup> ed è eseguita per valutare il grado di variazione tra i valori delle bande utilizzate<sup>48</sup>. Come risultato di questa operazione, i pixel delle aree vegetate più vigorose mostrano valori alti per via dell'alta riflettanza dell'Infrarosso Vicino e bassa riflettanza del Visibile, che si esplicano nell'immagine in colori chiari, mentre la vegetazione meno sana mostra valori inferiori, e rocce e suoli spogli risultano in valori prossimi allo 0, apparendo scuri o neri nella scena (fig. 6, sin.). L'applicazione del DVI nel territorio di Aquileia, se comparata ai risultati conseguiti tramite altri indici, è apparsa apprezzabile in una varietà di situazioni vegetazionali e particolarmente soddisfacente in caso di copertura vegetale rada, fornendo risultati qualitativamente migliori in termini di discriminazione dello stato della vegetazione e, conseguentemente, in visibilità delle tracce su di essa rispetto, ad esempio, al NDVI. A seguito di questa constatazione, l'indice è stato applicato in prima fase più o meno in quasi tutte le aree con copertura vegetale del comprensorio in esame, senza particolari esclusioni, preferendo in un secondo momento altri indici solo in zone con caratteristiche particolari, dove questi si siano dimostrati più adatti.

<sup>45</sup> TRAVIGLIA 2005a, pp. 148-150.

<sup>46</sup> Un esempio è la sensibilità di certi Indici di Vegetazione alle variazioni introdotte dall'atmosfera, che non ne compromette, o solo minimamente, invece certuni altri.

<sup>47</sup> La formula per ottenere l'indice è:

$$DVI = NIR - R$$

<sup>48</sup> TUCKER 1979; LILLESAND *et Al.* 2004, p. 468.

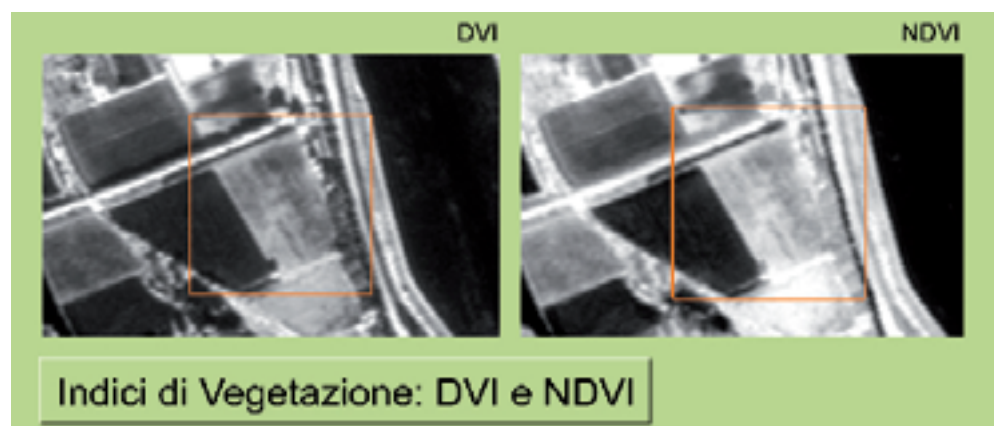


Fig. 6-Confronto tra indici di vegetazione: DVI (sinistra) e NDVI (destra) di una strisciata MIVIS: il DVI permette di ottenere migliori risultati in termini di discriminazione di qualità della vegetazione nel caso di una superficie coltivata dove vi sia presenza non omogenea delle piante.

#### NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'Indice denominato NDVI consiste nella differenza delle bande Rosso e Infrarosso Vicino divisa per la somma del Rosso e Infrarosso<sup>49</sup>. Come per il DVI, l'immagine prodotta dopo la sua applicazione presenta aree vegetate la cui luminosità varia in relazione al loro stato e maturazione. La caratteristica maggiormente positiva di questo indice sta nella sua capacità, come si è detto, di ridurre alcuni tipi di rumore (differenze di illuminazione dovute alla morfologia dei terreni o alla presenza di alberi d'alto fusto, ombre di nuvole ecc.), compensando questi fattori estranei presenti nelle bande, ed il fatto di dimostrare una ottima sensibilità nell'enfatizzare le variazioni nella copertura vegetazionale, permettendo di conseguenza una più facile identificazione di possibili elementi estranei nel sottosuolo.

I test eseguiti per Aquileia hanno potuto confermare queste caratteristiche positive (fig. 6, des.), mettendo tuttavia in evidenza anche alcuni aspetti limitanti di questa operazione. Se le immagini ottenute dalla sua applicazione hanno infatti rivelato che i risultati non sono eccessivamente compromessi dall'interferenza della riflettanza del terreno, hanno anche mostrato che questo si verifica solo in caso di copertura vegetazionale densa, mentre per le aree con copertura più rada l'indice ha mostrato di essere meno efficace nella discriminazione di anomalie nella qualità e nella crescita vegetativa del DVI, ad esempio. Per questo motivo il suo uso è stato limitato ad aree che presentassero manti vegetali uniformi e fitti, applicando altri indici nelle zone in cui la densità di copertura non garantisse risultati credibili.

#### MSAVI2 (second Modified Soil Adjusted Vegetation Index)

Per ovviare ai carenti risultati del NDVI in aree di scarsa copertura vegetazionale è stato applicato un apposito indice denominato MSAVI2 (*second Modified Soil Adjusted Vegetation Index*)<sup>50</sup> onde testarne l'efficacia nell'area campione e confrontarne i risultati con quelli degli altri indici. Questo indice è stato creato per minimizzare gli effetti di riflettanza del terreno in sottofondo riscontrabili in altri I.V., particolarmente evidenti dove la copertura del manto erboso o delle coltivazioni sia rada o sparsa, situazioni riscontrate di frequente nelle strisciate MIVIS utilizzate nel presente studio in relazione al periodo di ripresa.

Nell'ambito dell'esperienza condotta, l'uso del MSAVI2 ha mostrato generalmente un chiaro miglioramento in termini di accuratezza nella discriminazione di alterazioni vegetazionali nelle situazioni ambientali per cui è stato creato e, quale rapporto di bande, di possedere l'ulteriore aspetto positivo di annullare l'effetto delle ombre, permettendo di discriminare le tracce precedentemente nascoste da esse (fig. 7).

È importante sottolineare come pur fornendo positivi risultati nella sua applicazione alle immagini MIVIS di Aquileia, questo indice ha dimostrato di poter essere applicato profittevolmente solo in situazioni in cui il terreno in sottofondo introduce significative variazioni nella risposta spettrale della vegetazione (come nel caso di copertura molto rada, bassa e disomogenea), mentre altri indici, quali ad esempio il DVI, hanno dato riscontri più efficaci in aree dove, seppur rado, il manto vegetale era distribuito con uniformità.

<sup>49</sup> La formula per calcolare l'indice è:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

Relativamente alle caratteristiche dell'indice si vedano ROUSE *et Al.* 1973; TUCKER, TOWNSHEND, GOFF 1985; NOGI *et Al.* 1993.

<sup>50</sup> Variante dell'Indice denominato MSAVI, MSAVI2 è stato sviluppato da QI *et Al.* (1994) ed è computato attraverso la formula:

$$MSAVI2 = (1/2) * [2(NIR+1) - \sqrt{(2(NIR+1))^2 - 8(NIR-Red)}]$$

## Indice del suolo

Parimenti allo studio sulla qualità della vegetazione, lo studio delle variazioni tonali sui suoli spogli (i cosiddetti *damp marks*) ha una unga tradizione nella ricerca archeologica: il loro manifestarsi infatti può essere, in determinate condizioni, un indicatore della presenza nel sottosuolo di rimanenze di strutture o di fosse livellate che rispettivamente inibiscono o facilitano l'assorbimento dell'acqua (piovana o d'irrigazione) e della risalita dell'umidità<sup>51</sup>. Lo studio dei differenti gradi di assorbimento dell'acqua del suolo diviene di conseguenza particolarmente utile per l'identificazione di siti archeologici sepolti. La possibilità fornita dal dato spettrale di fornire, tramite opportuni trattamenti delle informazioni insite nelle immagini, dati relativi all'umidità del terreno non è mai stata sufficiente sfruttata nell'ambito della ricerca archeologica, mentre sono evidenti i vantaggi che se ne possono ottenere. Per questo motivo nell'ambito della ricerca condotta ad Aquileia si è elaborato e sperimentato un Indice della Linea del Suolo (*Soil Line Index*, SLI) creato in maniera specifica per i dati iperspettrali MIVIS<sup>52</sup> che mira a supportare l'identificazione di tracce su superfici non vegetate, permettendo di enfatizzare l'umidità e la disidratazione di una porzione di terreno. Partendo dal concetto della relazione lineare tra la riflettanza dell'Infrarosso Vicino e del Rosso<sup>53</sup>, questo indice produce una nuova immagine in bianco e nero dove le aree più secche sono rappresentate in scale di grigio più luminose e brillanti delle aree più umide. L'ipotesi di partenza è che in uno scatterogramma bidimensionale delle bande Rossa e Infrarosso Vicino è possibile identificare e distinguere i pixel che rappresentano vegetazione, suolo e acqua in quanto essi sono distribuiti raggruppati in tre distinte aree che formano un triangolo; in particolare, un'area occupata da pixel riconoscibili come suolo si presenta come un sottile e allungato ellissoide<sup>54</sup>, la cui lunghezza varia in funzione delle diverse caratteristiche di tipo ed umidità del terreno presenti nella scena. Lungo l'asse di tale ellissoide, i pixel che rappresentano i terreni sono disposti secondo una variazione scalare da suoli a bassa riflettanza ad altri ad alta riflettanza.

Verificata l'effettiva validità di tale asserzione anche per dati MIVIS (fig. 8a), il primo passaggio per la realizzazione del SLI è consistito nel identificare in modo empirico, direttamente sullo scatterogramma, una linea alla base di tale ellissoide, ovvero appunto la *Soil Line* (fig. 8b), che corrisponde al fronte d'inizio dei pixel rappresentanti il terreno nella nuvola di punti. Una volta identificata empiricamente essa è stata definita matematicamente<sup>55</sup>. La stessa operazione è stata applicata per la determinazione di una "soglia della vegetazione" (o *Vegetation Threshold*) ovvero della linea parallela a quella dal suolo da cui hanno inizio i pixel che si riferiscono nello scatterogramma alla vegetazione presente nella scena (fig. 8b). Un punto Z è stato successivamente identificato nel grafico (fig. 8c), scelto arbitrariamente in coincidenza con il pixel più prossimo all'asse delle ordinate tra quelli che giacciono tra la linea del suolo e la soglia della vegetazione, corrispondente al terreno a più elevata umidità rappresentato nello scatterogramma. La distanza dalla proiezione del punto Z lungo la *Soil Line* alla proiezione lungo il medesimo asse di ciascun pixel P inserito tra le due linee nello scatterogramma può essere considerata come una indicazione del contenuto di umidità del suolo, a prescindere dalle differenze dovute al tipo di suolo e tessitura (fig. 8c)<sup>56</sup>.

L'applicazione di questo indice ad aree prive di copertura vegetale ha permesso di discriminare in maniera più netta le differenze tonali del terreno, consentendo di evidenziare e definire linee che possono essere dovute sia alla manifestazione di una maggiore umidità che di un maggiore inaridimento e che a seconda dei casi hanno potuto essere interpretate come possibili strade, strutture sepolte o, in alcuni casi, come trincee moderne realizzate a fini di scavo archeologico. Considerato il periodo di ripresa delle immagini impiegate, l'indice ha trovato ampia applicazione per le zone utilizzate a fini agricoli, dando tuttavia positivi riscontri anche in aree prossime al centro abitato e permettendo di distinguere con sufficiente attendibilità interessanti anomalie in aree prive di costruzioni e di vegetazione. In particolare, l'indice ha permesso di definire precisamente un gruppo di interessanti tracce intersecanti, tra loro parallele e perpendicolari, disposte parallelamente all'orientamento della centuriazione aquileiese e collocate a est del Circo della città, già individuate più o meno labilmente in altri processi (fig. 9). Data la loro posizione e la portata delle massicce strutture murarie a

<sup>51</sup> PICCARRETA CERAUDO 2000, pp. 104-106; ALVISI 1989, p. 50.

<sup>52</sup> TRAVIGLIA 2005b, pp. 1970-1973.

<sup>53</sup> La definizione della procedura per l'ottenimento di questo specifico indice si è basata su precedenti lavori relativi alla Linea del Suolo o *Soil Line* (SL) e al *Soil Line Index* (SLI). I primi studi sull'argomento si devono a KAUTH, THOMAS 1976 (nell'ambito delle ricerche che portarono alla definizione della nota *Tasseled Cap Transformation*) e a RICHARDSON, WIENGAND 1977 (nell'ambito degli studi sull'Indice Perpendicolare della Vegetazione, PVI); più recentemente si vedano anche WIEGAND, RICHARDSON 1982 e BARET, JACQUEMOND, HANOCQ 1993 e la relativa bibliografia; per un riassunto delle varie, successive teorie relative alla *Soil Line* si veda MATHER 2004, pp. 145-148.

<sup>54</sup> Tale ipotesi fu testata e validata per prima da KAUTH, THOMAS 1976, utilizzando dati da sensore Landsat MSS.

<sup>55</sup> Si è determinata matematicamente l'inclinazione "m" attraverso l'applicazione della relativa equazione:

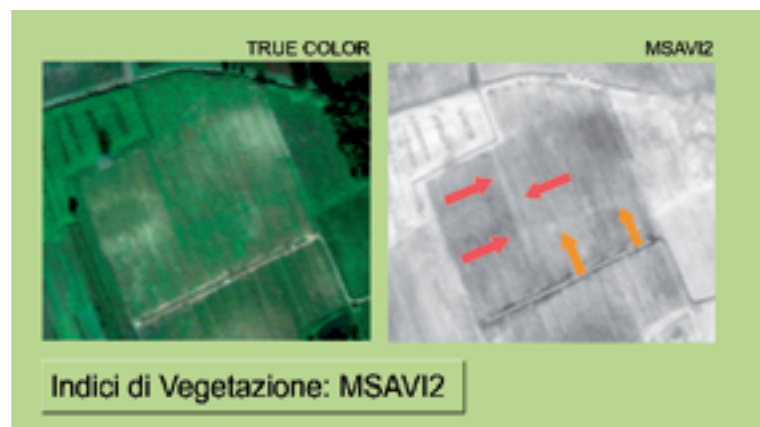
$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

e successivamente è stata applicata formula dell'equazione della linea

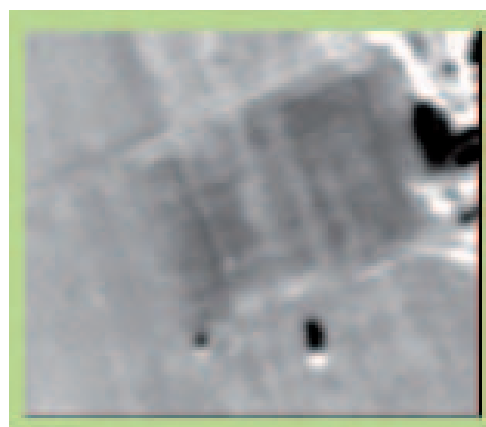
$$y = mx + b.$$

<sup>56</sup> Tale distanza viene calcolata trigonometricamente attraverso la funzione Cos dell'angolo ( $\gamma$ ) che si forma tra il segmento che connette il punto Z a ciascun punto P e la *Soil Line*, ovvero:

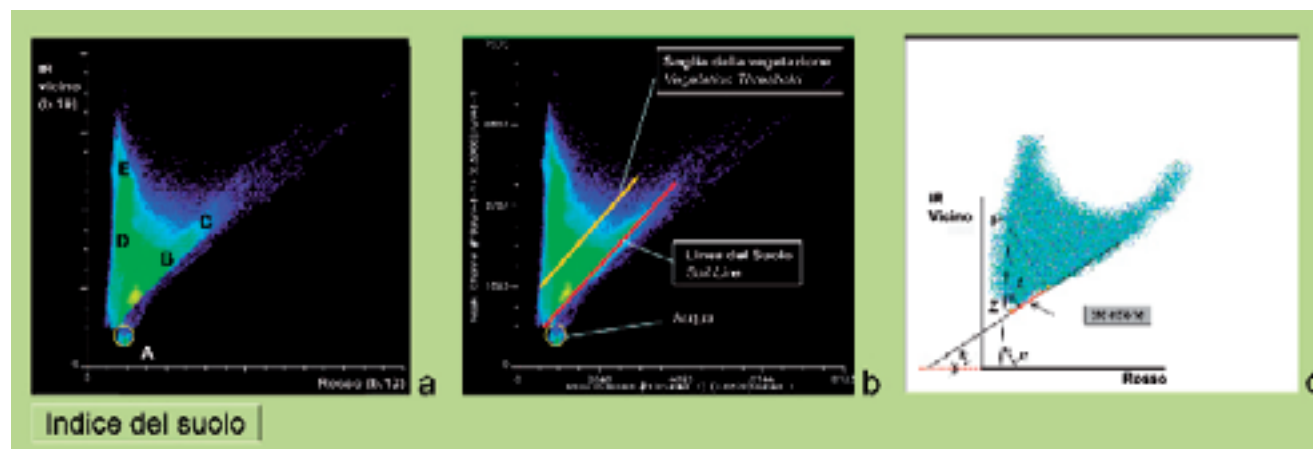
$$SLI (\text{Soil Line Index}) = DZP \cos(\gamma).$$



7



9



8

cui sembrano riferibili, tali tracce, la cui interpretazione è attualmente in corso di studio, sono forse ad attribuire al complesso edilizio proseguimento di quello che oblitera ad Est il *macellum* repubblicano e che è costituito da robustissimi muri, i quali proseguivano, come è stato riscontrato in fase di scavo<sup>57</sup>, verso Ovest. Con la prudenza del caso, si potrebbe dunque anticipare che potrebbe trattarsi del nuovo mercato alimentare del *municipum*, sorto dopo la demolizione del precedente<sup>58</sup>.

### Analisi delle Componenti Principali (PCA)

Una tecnica che consente di discriminare più efficacemente superfici diverse aumentando la distinguibilità in funzione della fase di analisi autoptica è l'analisi delle Componenti Principali o PCA (*Principal Component Analysis*)<sup>59</sup>. La sua applicazione in ambito archeologico è di conseguenza di estremo interesse in quanto permette di accedere a informazioni supplementari, se comparate alle singole bande originali, e consente, per i suoi esiti, una riduzione del tempo di analisi delle immagini condensando in poche, nuove immagini le informazioni in precedenza distribuite in un più ampio numero di canali, rilevandosi particolarmente efficace quando applicata a immagini costituite da un elevato numero di bande come i dati MIVIS. Infatti, come per molte immagini multispettrali, i dati MIVIS presentano una forte correlazione tra bande (fig. 10): bande contigue delle immagini appartenenti alla stessa regione spettrale, cioè, veicolano la stessa informazione, così come bande appartenenti a differenti regionali spettrali vicine. Questo produce canali adiacenti molto simili tra loro dove la ridondanza del dato è elevata. Attraverso l'Analisi delle Componenti Principali tale ridondanza è ridotta, trasformando un gruppo di variabili correlate (cioè simili) in un nuovo gruppo di variabili non correlate. Lo scopo del processo è di ridurre le informazioni precedentemente contenute nell'originale gruppo di bande in un numero inferiore di bande nuove (denominate PC1, PC2 ecc., ovvero

Fig. 7-Confronto tra l'immagine in *composite* Vero Colore e l'esito dell'indice MSAVI2: si noti la capacità dell'indice di discriminare tracce altrimenti non visibili su un campo dove la risposta spettrale del suolo altera fortemente i valori relativi alla vegetazione. Si noti anche la riduzione degli effetti delle ombre degli alberi (nell'immagine Vero colore, in alto a sin.) nell'immagine trasformata.

Fig. 8-Disposizione dei pixel in uno scatterogramma delle bande del Rosso e Infrarosso Vicino (8a): A) acqua, B) terreno umido, C) terreno asciutto, D) area a vegetazione "stressata", E) area a vegetazione "sana". Posizionamento dei pixel relativi all'acqua presente sulla scena, della Linea del Suolo e della Soglia della Vegetazione nello scatterogramma (8b). Visualizzazione grafica della proiezione del segmento ZP lungo la Linea del Suolo (8c).

Fig. 9-Indice del Suolo: dettaglio dell'area a E del Circo di Aquileia dove l'indice ha evidenziato con chiarezza la presenza di una serie di tracce da riferirsi a strutture massicce enfatizzando le differenti caratteristiche d'umidità dei suoli.

<sup>57</sup> Tiusi 2004, p. 282.

<sup>58</sup> Si ringrazia il dott. Tiusi per i preziosi commenti e suggerimenti relativi all'interpretazione delle tracce identificate. Ulteriori indagini e analisi dei dati MIVIS sono in corso per definire con precisione la natura delle tracce ed eventualmente validare questa prima ipotesi interpretativa.

<sup>59</sup> Per un approfondimento sull'argomento si vedano, tra i più recenti, DERMANNIS, BIAGI 2002, pp. 143-153; LILLESAND *et Al.* 2004, pp. 536-542; MATHER 2004, pp. 149-160; a riguardo delle applicazioni della PCA in ambito archeologico, il primo utilizzo risale al 1981 (MORAIN *et Al.* 1981); per le prime applicazioni in Italia si vedano CAMPANA, PRANZINI 2001, pp. 34-39 per dati multispettrali, MEROLA 2004, pp. 311-313 e TRAVIGLIA 2005, pp. 153-160 per dati iperspettrali.

Componente Principale 1, 2 ecc.) che possono essere utilizzate in luogo delle originali, accorciando sensibilmente i tempi della verifica delle informazioni in esse contenute. Nelle immagini MIVIS di Aquileia soggette a computo della PCA<sup>60</sup> normalmente la PC1 e la PC2 insieme hanno fornito nella maggior parte dei casi circa il 98,90% della variabilità totale nelle bande originarie e solitamente un 1% è stato trovato nella terza Componente Principale: PC1, PC2 e PC3 condensano in sé virtualmente, cioè, la maggior parte della varianza nella scena (mediamente 99,6%) e di conseguenza dell'informazione inizialmente distribuita nelle bande originali<sup>61</sup>. Le Componenti dalla PC4 in avanti contengono normalmente tutte insieme solo circa il 0,4% della varianza del dato. Tuttavia alcune di queste componenti dalla quarta in poi hanno dimostrato, nel test aquileiese, di contenere informazioni utili, riconoscibili e identificabili solo attraverso una ispezione visiva delle immagini P.C. stesse, e non, come normalmente accade, tramite indici numerici che accompagnano l'immagine. Tecnicamente, Componenti Principali di numero elevato (ad esempio maggiori di 4) sono considerate prive di valore, avendo un minor rapporto segnale/rumore rispetto alle prime Componenti: in questa verifica, invece, la presenza di significative informazioni aggiuntive che non sono presenti nelle prime Componenti sono state notate anche fino alla 30°-40° Componente Principale<sup>62</sup>, tale valore variando da strisciata a strisciata. Questo dato ha portato alla necessità di controllare visivamente tutte le P.C. prodotte singolarmente piuttosto che affidarsi solamente alla magnitudo dei valori numerici come indicatori di contenuto informativo. Le immagini ottenute dal computo dell'Analisi delle Componenti Principali e selezionate in base al loro contenuto sono state sottoposte a interpretazione visiva: accanto alla loro visualizzazione come singole PC in scala di grigio, la procedura più comune di ispezione visiva consiste nel generare delle composizioni in Falso Colore RGB (*RGB False Color Composite*), utilizzando le prime 3 Componenti Principali di una scena e creando 6 differenti combinazioni di *composite*. Come risultato si ottengono immagini estremamente colorate dove i colori possono combinarsi liberamente, creando combinazioni che facilitano la discriminazione di superfici diverse. In questo caso, invece, dal momento che applicare la medesima procedura avrebbe significato escludere dalle composizioni Componenti che avevano dimostrato di convogliare nuova informazione, si è scelto di elevare a 4 o più (massimo 6) il numero delle PC da usare nei *composite*: la procedura, che ha portato alla creazione di un numero di composizioni in Falso Colore da 24 a 120 a seconda del numero di PC impiegate nelle combinazioni, si è dimostrata assai soddisfacente, fornendo risultati interessanti in termini di specifici tipi di tracce: le immagini composte da PC4 assegnata al Blu, PC1 al Verde e PC3 al Rosso, ad esempio, (fig. 11) si sono dimostrate molto efficienti in termini di visibilità di certe irregolarità nella tessitura del terreno e la combinazione PC 2-4-6 in RGB ha fornito risultati estremamente interessanti in termini di visibilità e chiarezza delle tracce sulla superficie terrestre nonché in termini di penetrazione delle acque marine in area lagunare (fig. 12). I soddisfacenti risultati dell'Analisi delle Componenti Principali hanno tuttavia un risvolto che non può non essere ignorato: alcuni dei dettagli che sono visibili analizzando singolarmente le bande originali non possono essere sempre riconosciuti nelle immagini delle Componenti Principali in quanto oscurati dalla sovrapposizione delle informazioni delle altre bande. Per questo motivo si è ritenuto utile procedere nell'utilizzo di questo tipo di elaborazione variando però l'immissione delle bande originali nel computo dell'Analisi attraverso una selezione dei canali utilizzati nella trasformazione.

### Analisi Selettiva delle Componenti Principali (SPCA)

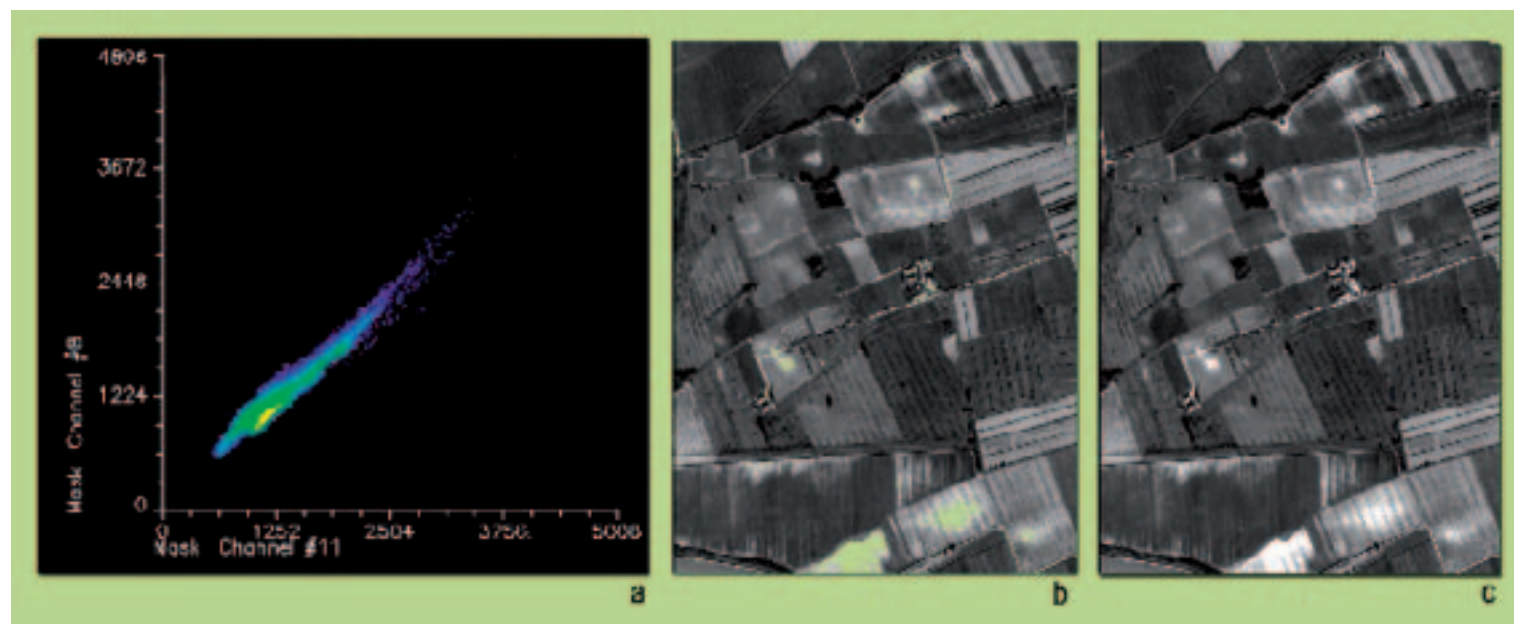
Per superare il problema di obliterazione di dati importanti verificato nella PCA e convogliare solo l'informazione delle regioni spettrali d'interesse, l'Analisi delle Componenti Principali è stata applicata a sottoinsiemi dei canali MIVIS, producendo una Analisi Selettiva delle Componenti Principali (o *SPCA*, *Selective Principal Component Analysis*)<sup>63</sup>. Si tratta di una Analisi delle Componenti Principali applicata a gruppi di bande appartenenti, ad esempio, al medesimo spettrometro o alla stessa regione spettrale (fig. 13): questo *input* selezionato permette la separazioni degli spettri e la possibilità di scelta combinatoria.

<sup>60</sup> Dal computo della PCA sono state escluse le bande del IV spettrometro relative all'Infrarosso Termico i cui valori sono espressi in temperatura al sensore. Le bande termiche sono state invece utilizzate nell'analisi SPC descritta nel successivo paragrafo.

<sup>61</sup> Questo è ciò che viene denominato "dimensionalità intrinseca" dei dati, ovvero l'ammontare delle prime immagini PC che fornisce la maggior parte dell'informazione e che possono essere usate a sostituzione delle bande originali.

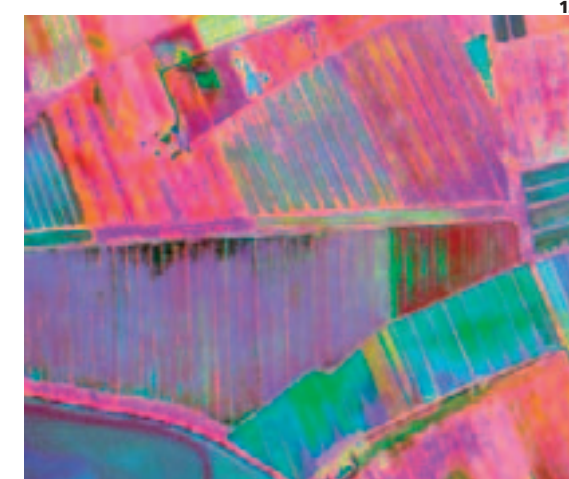
<sup>62</sup> Sull'utilità delle PC successive alle prime si veda TOWNSEND, HARRISON 1984, pp. 68-70.

<sup>63</sup> SILJESTROM *et Al.* 1997.



10

11



12

Fig. 10- Scatterogramma delle bande 8 e 11 di una strisciata MIVIS che mostra la forte correlazione tra bande vicine (10a); la correlazione è evidente anche al confronto visivo delle bande: dettaglio della banda Verde 8 (10b); dettaglio della banda Rossa 11 (10c).

Fig. 11- Combinazione in sintesi additiva RGB delle Componenti Principali (PC) 3-4 della strisciata MIVIS: la PC4 è stata assegnata al Blu, la PC1 al Verde e la PC3 al Rosso. L'insieme, estremamente colorato, facilita la discriminazione di superfici diverse.

Fig. 12- Combinazione in sintesi additiva RGB delle Componenti Principali (PC) 2-4-6: si noti in particolare la penetrazione dell'acqua lagunare nell'angolo in basso a sinistra dove è immediatamente rintracciabile un canale in acque lagunari.

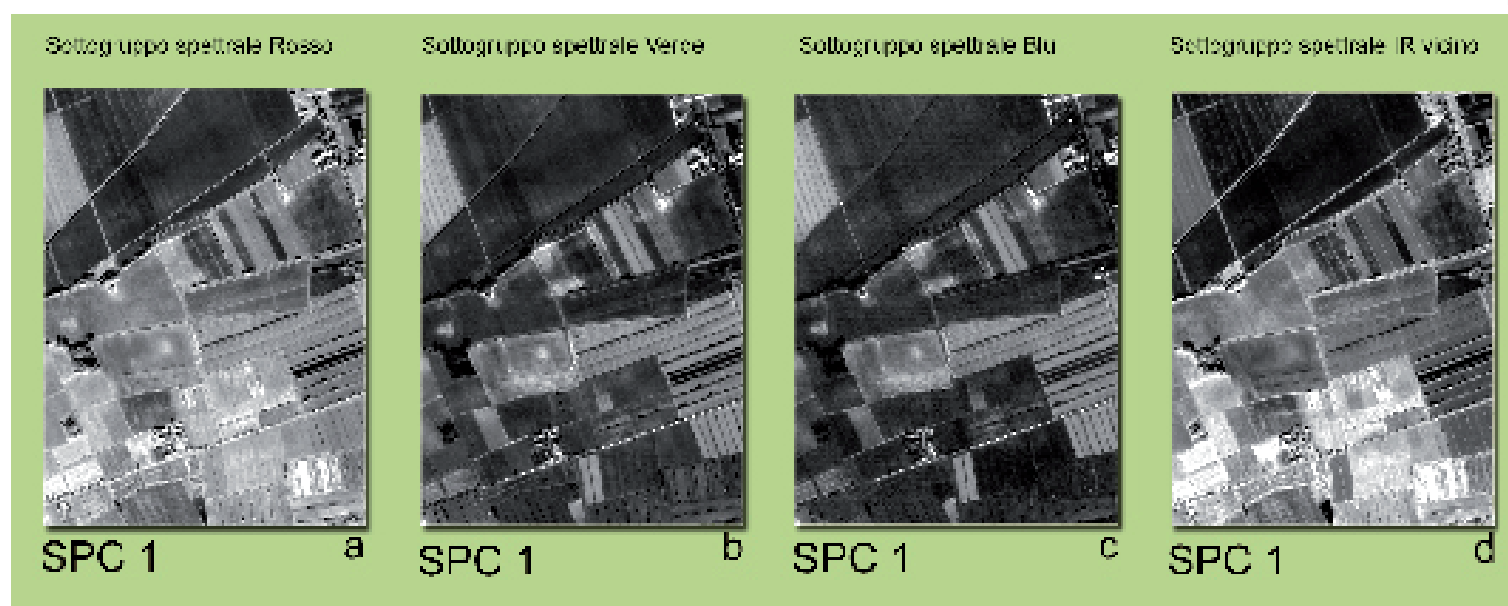
Fig. 13-Tavola dei sottoinsiemi di bande utilizzate per la realizzazione di SPC (*Selective Principal Components*).

Fig. 14-Confronto tra le prime Componenti Principali di ciascuno dei 4 spettrometri del sensore MIVIS.

Reggruppamento spettrale	Regioni Spettrali coinvolte	Intervallo Bande utilizzate	Intervallo Velocità Spettrali ( $\mu\text{m}$ )
Parte Obiett. I	Blu Verde Giallo Infrarosso Vicino	1-20	0,43-0,83
Parte Obiett. II	Infrarosso Vicino	21-28	1,15-1,55
Parte Obiett. III	Infrarosso Medio	29-35	1,98-3,475
Parte Obiett. IV	Infrarosso Lungo	36-52	8,21-12,7
Regione spettrale Blu	Blu	1-7	0,43-0,475
Regione spettrale Verde	Verde	8-9	0,512-0,56
Regione spettrale Rosso	Rosso	10-17	0,611-0,775
Regione spettrale Infrarosso vicino	Infrarosso vicino	18-23	0,772-1,15
Parte Obiett. I - Infrarosso vicino	Infrarosso vicino	18-23	0,772-1,15
Parte Obiett. II - Bande del visibile	Blu Verde Rosso	1-7	0,43-0,775

13

14



L'analisi autoptica a monitor delle Componenti Principali dei sottoinsiemi prodotti (SPC) può poi procedere singolarmente esaminando ciascuna delle singole SPC estratte<sup>64</sup> o più efficacemente tramite *composite* delle stesse<sup>65</sup>. L'analisi delle Componenti dei singoli sottoinsiemi ha rivelato come le prime SPC di ciascuno d'essi possano fornire una interessante quantità di informazioni che non sono riconoscibili nelle bande originali (fig. 14). Le prime 3 SPC (ovvero SPC1, SPC2, SPC3) del sottoinsieme del I spettrometro, ad esempio, che include le bande che vanno dal Blu all'inizio del Infrarosso Vicino (20 bande comprese tra 0,43 e 0,83  $\mu\text{m}$ ), hanno mostrato quelli che possono essere considerati i migliori risultati tra tutti quelli forniti dai vari sottoinsiemi: molte tracce e anomalie sulla superficie investigata possono essere agevolmente identificate e più facilmente discriminate dall'ambiente circostante. Le prime SPC del sottoinsieme del II Spettrometro, che registra nel pieno Infrarosso Vicino (8 bande comprese tra 1,15 e 1,55  $\mu\text{m}$ ), sono particolarmente utili nello studio della variazione del vigore della vegetazione, grazie alla forte riflettanza della vegetazione in questa regione dello spettro; esse, tuttavia, si sono dimostrate poco attendibili nella discriminazione di suoli tra loro differenti. Questi ultimi sono più efficacemente analizzabili attraverso la PC1 del sottoinsieme delle bande termiche (cioè lo Spettrometro 4), dove possibili variazioni dovute alla presenza di particolari tipi di sedimenti, rocce o materiale laterizio nel sottosuolo possono risultare in una alterazione della temperatura rilevata dal sensore; di conseguenza l'informazione

<sup>64</sup> TRAVIGLIA 2005a, pp. 157-158; MEROLA 2004, pp. 311-313.

<sup>65</sup> TRAVIGLIA 2005a, pp. 159-160.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	PC1 I.O.P.	PC2 I.O.P.	PC3 I.O.P.	PC1 II O.P.	PC2 II O.P.	PC3 II O.P.	PC1 III O.P.	PC1 IV O.P.	PC1 B.R.	PC1 G.R.	PC1 R.R.	PC1 N.I.R.
1	PC1 I.O.P.	1,000	0,000	0,000	0,073	-0,083	0,370	0,430	0,531	0,651	0,651	0,521
2	PC2 I.O.P.	0,000	1,000	0,000	-0,012	-0,312	-0,050	0,252	0,188	0,748	0,161	-0,236
3	PC3 I.O.P.	0,000	0,000	1,000	0,179	-0,242	0,269	0,316	0,180	-0,242	-0,122	0,047
4	PC1 II O.P.	0,073	-0,012	0,179	1,000	0,000	0,445	0,521	0,459	0,591	0,441	0,441
5	PC2 II O.P.	0,073	-0,312	-0,242	0,000	1,000	0,000	-0,871	-0,538	-0,649	-0,599	-0,085
6	PC3 II O.P.	-0,083	-0,050	0,269	0,000	0,000	1,000	0,050	-0,273	-0,185	-0,111	-0,075
7	PC1 III O.P.	0,370	0,252	0,316	0,445	0,371	0,060	1,000	0,690	0,762	0,787	0,504
8	PC1 IV O.P.	0,430	0,452	0,100	0,521	-0,520	-0,273	0,690	1,000	0,504	0,509	0,509
9	PC1 B.R.	0,531	0,316	-0,242	0,459	-0,649	-0,185	0,762	0,584	1,000	0,973	0,641
10	PC1 G.R.	0,651	0,748	-0,122	0,691	0,599	0,111	0,781	0,689	0,972	1,000	0,766
11	PC1 R.R.	0,651	0,161	0,047	0,441	-0,085	-0,075	0,504	0,509	0,641	0,759	1,000
12	PC1 N.I.R.	0,521	-0,236	0,017	0,441	0,277	-0,084	0,185	0,599	0,325	0,454	0,766

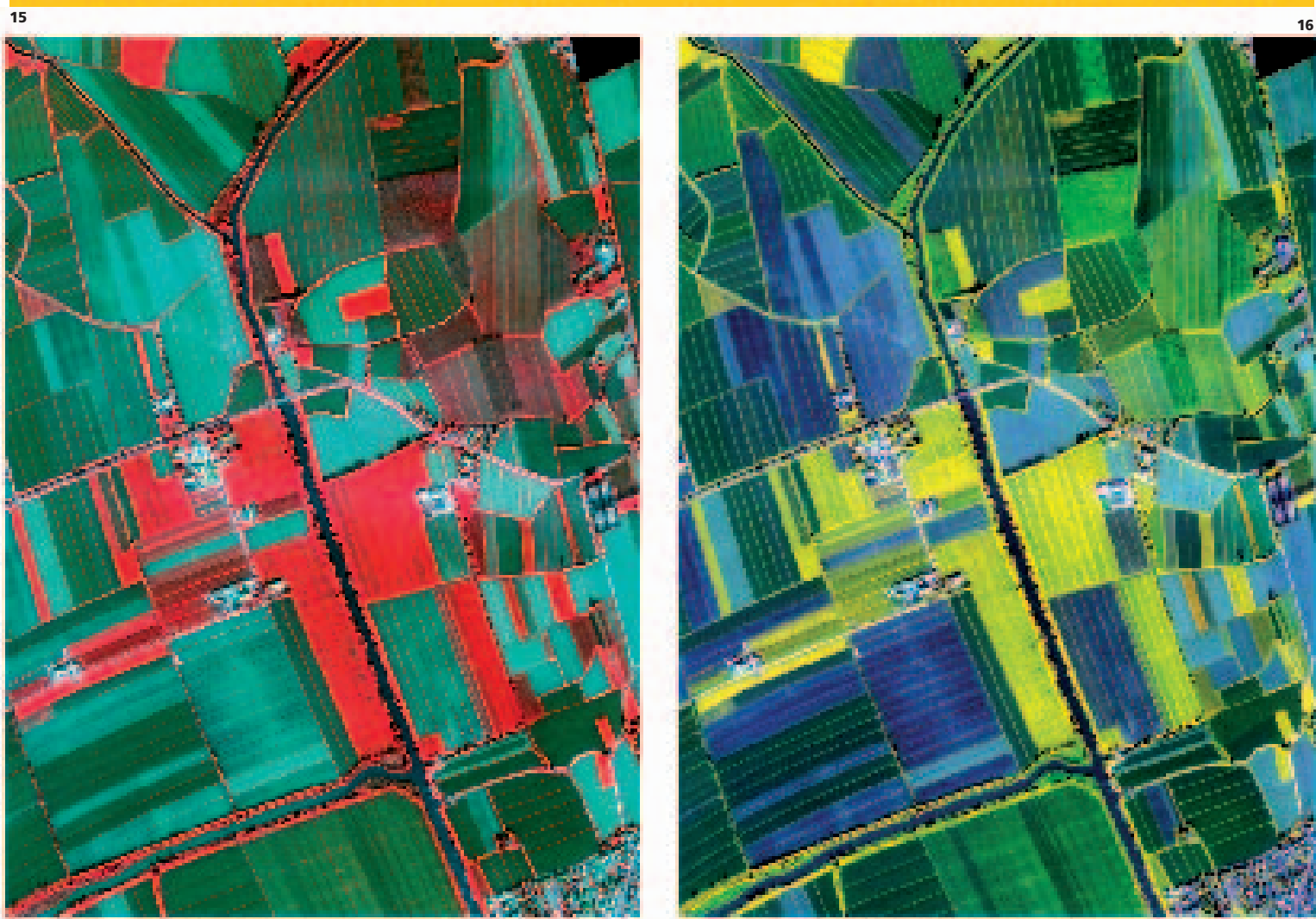
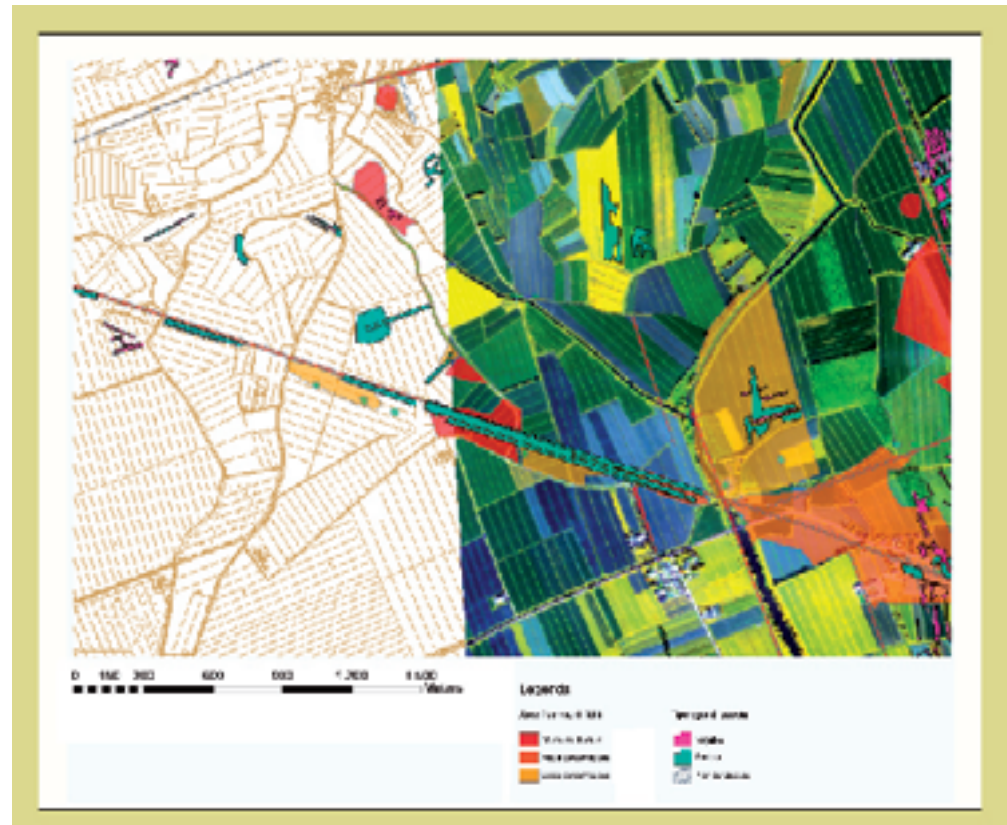


Fig. 15-Matrix di correlazione per la determinazione delle SPC che garantiscono informazione completa senza perdita di copertura spettrale.

Fig. 16-Composite RGB di differenti *Selective Principal Components*: a sinistra combinazione della SPC1 dello spettrometro 1, SPC2 dello spettrometro 1 e SPC1 del gruppo di bande del Blu; a destra, per confronto, la combinazione della SPC1 dello spettrometro 1, SPC1 dello spettrometro 2 e SPC1 del gruppo di bande del Blu.

Fig. 17 - Le tracce riscontrabili sul *composite* di SPC (fig. 16, dex.) vengono riportate graficamente su un layer del GIS per essere confrontate con gli altri dati; sono caratterizzate graficamente in base alla loro natura (positive, negative, non determinabili). In altri layer compaiono informazioni relative a concentrazioni di laterizi o materiale fittile, suddivise per quantificazione, ed a depositi archeologici noti.



fornita dalla singola banda originale termica è qui magnificata e più facilmente osservabile.

I risultati più efficaci in termini di tracce riconoscibili possono essere raggiunti, come anticipato, tramite *composite* delle Componenti Principali dei sottoinsiemi. Dato, tuttavia, l'elevato numero di SPC che si creano realizzando questo tipo di analisi, si è rivelato utile innanzitutto selezionare le singole Componenti sulla base delle loro dimensionalità intrinseca e successivamente, una volta identificate, determinare le loro migliori combinazioni possibili attraverso un matrix di correlazione dedicato (fig. 15), in grado di identificare quelle SPC che forniscano informazione completa senza perdita di copertura spettrale<sup>66</sup>. Il risultato è stato l'identificazione di 4 SPC per ciascuna strisciata che sono state diversamente combinate in composizioni RGB: nella maggior parte dei test eseguiti i *composite* validi si sono dimostrati quelli in cui erano presenti la SPC1 del I Spettrometro, con le informazioni delle bande visibili e dell'infrarosso vicino, e la PC2 sempre del I spettrometro che è fortemente correlata alle informazioni dell'Infrarosso Vicino, dell'Infrarosso Medio e del Blu (fig. 16).

Le tracce che sono state maggiormente enfatizzate da questo flusso di operazioni, accanto ad alterazioni dello stato vegetazionale e della sua crescita, a tracce riconducibili a paleoalvei e a modificazioni della tessitura della superficie, sono state linee ed aree irregolari di colorazione differente da quella del contesto su terreno spoglio. Da un punto di vista archeologico questo si è tradotto in alcuni casi nell'opportunità di identificare oggetti potenzialmente archeologici identificati in zone la cui presenza è connotata, sulla base di prospezioni di superficie, da concentrazioni di laterizi o materiale fittile<sup>67</sup> (fig. 17). Rientrano in questa tipologia la serie di tracce relative alla *Via Annia*, specialmente per quanto attiene il tratto prossimo alla città (fig. 18). Il tracciato della *Via*, già noto tramite foto aerea<sup>68</sup>, documentazione edita e cartografica storica, risulta ben visibile in molte dei dati MIVIS originali e nelle loro trasformazioni, ma acquista particolare definizione e visibilità nella trasformazione qui in oggetto, arricchendosi di nuovi particolari di dettaglio non completamente visibili nelle coperture aeree precedenti.

<sup>66</sup> Per una dettagliata descrizione tecnica si veda TRAVIGLIA c.s.

<sup>67</sup> MAGGI, ORIOLO 1999, p. 106, fig. 3; p. 115, fig. 7; p. 118, fig. 9.

<sup>68</sup> Il tracciato è ben visibile in alcuni suoi tratti nelle foto aeree IGM datate 1954, nelle immagini fatte eseguite dalla Regione Friuli V.G. nel 1990 e, più blandamente, nelle Ortofotocarte del 1998.

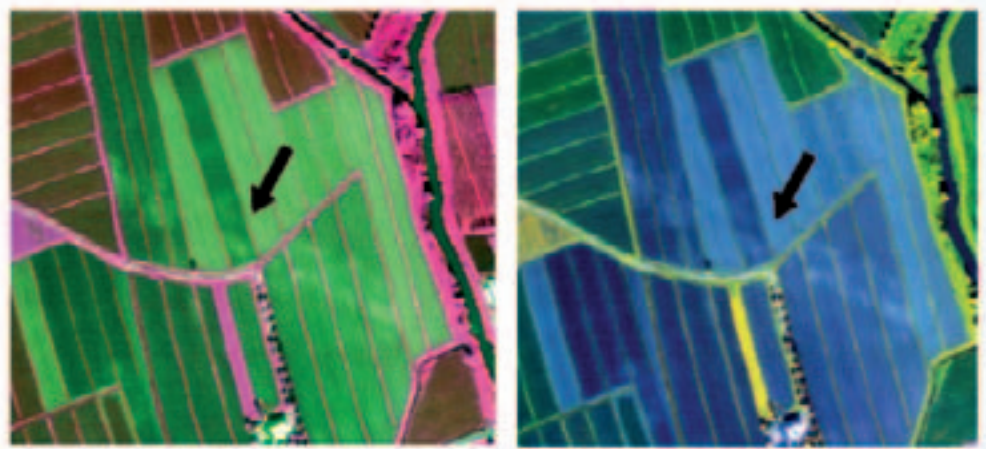


Fig. 18-Due dettagli delle immagini di *composite* di SPC (fig. 16) relativi al tracciato della *Via Annia* in prossimità dell'uscita a Ovest di Aquileia, nei pressi di Ponte Rosso.

### Approccio all'interpretazione e valutazione delle immagini

Al termine di ciascuna delle procedure di pre-elaborazione o di trattamento sopra descritte, le immagini prodotte sono state importate all'interno dell'ambiente GIS dove sono state georiferite per essere successivamente sottoposte al processo di foto-interpretazione.

Il processo autoptico di riconoscimento di possibili tracce archeologiche è stato eseguito a schermo, dapprima sulle immagini visualizzate semplicemente in banda originale singola in scala di grigio, e successivamente in combinazioni a colori reali o sintesi additive (*false color* tipico, *false color* geologico ecc.); in un secondo momento l'analisi visiva è proseguita con le immagini processate, a seconda dell'elaborazione applicata. Durante o dopo il completamento della fotolettura ed analisi, le tracce riconosciute sulle immagini sono state restituite cartograficamente in un layer vettoriale del GIS, differenziandole sulla base del meccanismo della loro formazione (positivo, negativo, sconosciuto) attraverso colori differenti come espediente grafico e attraverso attributi come risorsa informativa testuale (fig. 18). Parimenti, le tracce e le anomalie sono state distinte e etichettate sulla base dei tipi di elaborazione digitale attraverso cui sono stati estratte.

A questo primo riconoscimento e restituzione di tracce significative è seguita un'indagine dei meccanismi di formazione delle tracce stesse a partire dal tipo di impiego della superficie in cui esse sono state riscontrate, per comprenderne appieno natura e tipologia. Si sono perciò esaminate le relazioni con i tipi di suolo o di vegetazione in cui le tracce erano visibili, a seconda della superficie su cui esse insistevano, così come le caratteristiche di ciascuna traccia in relazione agli elementi ambientali circostanti del territorio, con particolare riguardo all'idrografia naturale e ai sistemi di canalizzazione artificiale. Complessivamente il dato MIVIS ha permesso di individuare tracce che si manifestano in ogni tipo di situazione ambientale presente nell'area bersaglio, ivi incluse le aree lagunari. La situazione più comunemente riscontrata è stata quella relativa alla identificazione di tracce su terreno privo di manto vegetale, ma questo dato va visto come diretta conseguenza del periodo in cui le immagini sono state scattate; in numero inferiore sono state identificate tracce su terreni caratterizzati da presenza di copertura vegetale, dove la maggior parte delle tracce sono espresse da alterazioni nella crescita della vegetazione, con picchi positivi o negativi della biomassa.

Successivamente al confronto coi dati ambientali si è presa in considerazione la documentazione antichistico-archeologica vettorializzata in layer dedicati, per comparare tracce e anomalie identificate attraverso i dati MIVIS con gli orientamenti di tracciati di strade (noti o ipotizzati), sopravvivenze di canalizzazioni antiche, strutture antiche ed ogni altro componente archeologica presente nel territorio e per considerare le possibili relazioni esistenti tra questi ultimi e le tracce stesse. A questo punto è stato possibile operare una selezione delle tracce, eliminando quelle che, attraverso lo studio comparativo, sono state attribuite a natura non archeologica, pur mantenendo un livello del GIS dedicato alla loro presenza per eventuali, successive revisioni, con una percentuale di scarto pari a circa il 45% delle tracce e anomalie identificate in prima istanza<sup>69</sup>.

<sup>69</sup> Le tracce individuate all'interno dell'area campione complessiva sono state in prima battuta circa 500, distribuite con una densità maggiore in prossimità dell'apparato urbano e con densità decrescente in rapporto alla distanza da esso. Successive selezioni hanno portato a ridurre fortemente il numero delle attestazioni considerate attendibili.

Un problema che si è dovuto fronteggiare sin dalla fase progettuale è stato quello dell'impraticabilità del diretto riscontro a terra delle anomalie identificate tramite telerilevamento e della conseguente mancanza di un metodo di validazione delle tracce. Per ovviare parzialmente a questa situazione, è stata realizzata una scala di livelli di attendibilità delle tracce e un indice relativo allo loro visibilità: se non in grado di sostituire completamente il valore di una sessione di ricognizione a terra, tali indici, esprimendo una valutazione sulla qualità delle tracce osservate, enfatizzano quantomeno quali di esse hanno, sulla base di analisi multicriteriale, più possibilità di avere natura archeologica. L'indice di "attendibilità archeologica" deriva dall'analisi dei vari dati cartografici e dell'edito a disposizione per l'area di identificazione di una traccia o anomalia e dalla comparazione con tale posizionamento. Esso è espresso da una percentuale che indica il livello di attendibilità che può essere attribuito ad una specifica traccia e che suggerisce la possibilità che tale traccia rappresenti un elemento di origine archeologica sulla base delle informazioni note: più elevata la percentuale, più numerose e contestuali le informazioni che rendono la traccia attendibile e viceversa. L'indice di "visibilità" delle tracce e anomalie è invece un indice della qualità della manifestazione visiva delle tracce che viene attribuita singolarmente per ciascuna delle immagini originali ed elaborazioni in cui la traccia è riscontrabile. L'indice è espresso da una scala di punteggio con valori che variano da 1 a 5, dove 1 indica debole possibilità di identificazione della traccia in oggetto e 5 estrema visibilità, indipendentemente dalla superficie su cui è stata riscontrata.

Un elemento da sottolineare è tuttavia che l'attribuzione di un valore ad un oggetto che si descrive è un processo soggettivo basato sulla comparazione tra tracce di superficie e caratteristiche morfologiche o cromatiche di giacimenti archeologici noti: questo processo risente dell'esperienza pregressa dell'archeologo e può risultare in valutazioni differenti se effettuato da operatori diversi nonostante un approccio il più possibile obbiettivo.

Le tracce selezionate attraverso le varie fasi di vaglio appena descritte e aventi sufficiente livello di attendibilità archeologica sono state comparate numericamente con le tracce aventi medesime caratteristiche riscontrate nelle Ortofotocarte, utilizzando queste ultime quali termini di confronto per la valutazione dell'incremento di visibilità delle tracce ottenibile tramite l'impiego di dati iperspettrali.

È evidente che grande cautela è dovuta non solo nel confronto tra immagini fotografiche e spettrali, ma anche tra riprese di periodi differenti, a maggior ragione se registrate da strumenti di natura diversa. Le immagini MIVIS e quelle aeree, per essere pienamente comparabili, dovrebbero essere state scattate nello stesso periodo dell'anno, preferibilmente alla stessa ora del giorno per poter godere di condizioni di luce simili; le immagini disponibili hanno invece 5 mesi di differenza e sono state scattate in orari diversi.

Per questo, nel raffrontare gli esiti numerici conseguibili col loro impiego, va tenuto in considerazione che i risultati raggiunti tramite i dati MIVIS potrebbero non essere intermente dovuti solo alla maggiore sensibilità e alle possibilità offerte dal *processing* delle immagini, ma anche, invece, ad altri fattori connessi con il momento della ripresa, fattori che alterano in modo determinante il livello di visibilità di una traccia quali le condizioni atmosferiche, di illuminazione, di andamento stagionale ecc. Avendo presente questo principio, dal confronto del numero delle tracce identificabili sull'immagine a Veri Colori del MIVIS con quelle visualizzabili tramite Ortofoto sembrerebbe comunque dimostrabile che attraverso il dato iperspettrale è possibile riconoscere un elevato numero di tracce che non sono identificabili nella fotografia aerea; tale numero aumenta ulteriormente se il confronto viene effettuato sul numero totale di tracce riscontrabili nelle diverse elaborazioni del dato grezzo, con un incremento della rintracciabilità di anomalie rilevato pari al 486%.

Quest'ultimo dato, assai incoraggiante, spinge ad affermare che la migliore visibilità delle tracce reperibile nei dati MIVIS è da collegare assai probabilmente più al contenuto spettrale delle immagini ed alla possibilità di elaborazione di tale contenuto che ad altri fattori di natura ambientale.

## Considerazioni finali

L'esperienza fin qui condotta, pur nei limiti dovuti alla mancanza del sistematico riscontro a terra dell'informazione derivata a distanza, permette di fare alcune riflessioni finali sull'utilità dell'impiego delle immagini iperspettrali MIVIS nel contesto aquileiese.

Il numero e tipo di anomalie in traccia riscontrate sulla superficie indagata ha dimostrato chiaramente le potenzialità dello strumento iperspettrale, e come queste siano legate al suo contenuto informativo che consente di identificare difformità su superfici anche marcatamente diverse che non sono individuabili tramite normale foto aerea o ricognizione a terra. In particolare, si è riscontrato e conteggiato un incremento esponenziale dell'informazione tramite l'utilizzo di bande che fanno parte del dominio del non-visibile e che permettono di visualizzare informazioni relative, ad esempio, allo stato della biomassa vegetale o alla differenza termica rilevabile sulla superficie, non altrimenti identificabili. La validità dell'applicazione delle immagini MIVIS è stata verificata su vari tipi di copertura superficiale del paesaggio, fornendo significativi risultati su quasi tutte le condizioni ambientali rappresentate nell'area campione: lo strumento si è dimostrato particolarmente efficace nel caso di tracce su vegetazione, dove vengono esaltate particolarmente le capacità del sensore di studio dello stress vegetale, e su suolo spoglio, dove esso ha dimostrato la propria idoneità nella discriminazione dei diversi gradi di umidità del terreno.

È stato appurato che questa capacità di registrazione di anomalie sugli elementi mediatori di depositi sepolti persiste anche in prossimità di aree molto disturbate, soggette a ripetute arature o modificate più o meno pesantemente dall'intervento antropico degli ultimi decenni o da fenomeni di elevazione del suolo a causa della sedimentazione alluvionale, dando in questo senso ragionevole certezza di poter identificare col proseguo della ricerca un numero anche maggiore di tracce focalizzandosi su aree in prima battuta non esaminate approfonditamente in quanto ritenute eccessivamente compromesse.

Accanto ad elementi certamente positivi ed incoraggianti, sono tuttavia emerse chiaramente anche restrizioni tecniche del sensore che portano conseguentemente a limitazioni funzionali. È evidente, ad esempio, che il dato MIVIS necessita in determinate situazioni di essere affiancato da altri dati telerilevati per la fase di interpretazione in quanto la sua risoluzione spaziale non è ancora sufficiente per determinate scale di lavoro: in questo senso, le Ortofoto si sono rilevate all'interno di questa indagine fondamentali per guidare il processo di riconoscimento delle anomalie superficiali al di sotto di una certa dimensione. Per tutte le altre situazioni, in cui le anomalie superassero la dimensione critica della non-riconoscibilità di per sé, il livello di dettaglio si è dimostrato sufficiente per la lettura e interpretazione archeologica della traccia, consentendo l'individuazione di un'ampia gamma di oggetti superficiali, ivi inclusi quelli di dimensioni medio-piccole. Va precisato, tuttavia, che in quest'ultimo caso l'individuazione stessa di tali oggetti sulla scena MIVIS è stata favorita e supportata dalle pregresse indicazioni offerte alternativamente da altri dati telerilevati o dalle indicazioni presenti nei layer informativi del GIS, enfatizzando nuovamente la necessità di un processo interpretativo basato sull'integrazione di differenti dati telerilevati e di pregresse acquisizioni scientifiche derivate dallo studio tradizionale.

Abstract4 Traviglia  
dell'AUTRICE:

Identification of archaeological traces over landscape through airborne MIVIS sensor images: the example of Aquileia.

In the last 10 years, particular attention to the use of airborne hyperspectral sensors applied to archaeological research has occurred in Italy, where the MIVIS sensor has found large application as a complementary source of information in topographical studies. In this paper, the results of research based in the area surrounding the Roman *municipium* of Aquileia are presented. The spectral content of the MIVIS images has been used to emphasize the presence of archaeological deposits on the basis of the different spectral characteristics of the terrains and the vegetation. Various algorithms for processing of the images have been applied and their results compared in order to define the ones that deliver better results according to the different research goals. The large amount of processed images has been managed through the use of GIS technology, which provided and handled all the archaeological and topographical data necessary to evaluate the surface anomalies as ancient origin traces.

## Ringraziamenti

Si intende cogliere l'opportunità per ringraziare il "Servizio Sistema Informativo Territoriale e Cartografia" della "Direzione centrale pianificazione territoriale, energia, mobilità e infrastrutture di trasporto" della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, nella persona dell'Arch. M. Ghidini, per la concessione di dati e strumenti indispensabili per la presente ricerca (immagini MIVIS, Ortofotocarte, C.T.R.).

Dati MIVIS, Ortofoto digitali, Carta Tecnica Regionale (C.T.R.): autorizzazione ricevuta dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, P.M.T./1295/2100, 25 Gennaio 2005. Ortofoto: proprietà della Compagnia Generale Ripresearee S.p.A. Parma.

## Abbreviazioni bibliografiche

- ALVISI 1989: G. ALVISI, *La fotografia aerea nell'indagine archeologica*, Roma 1989.
- Aquileia romana 1991: *Aquileia romana. Vita pubblica e privata* (Catalogo della mostra), Venezia 1991.
- ARDISSONE, BOCCARDO, RINAUDO 2003: P. ARDISSONE, P. BOCCARDO, F. RINAUDO, *Il rilevamento iperspettrale MIVIS nell'analisi archeologica del territorio della Valle del Po*, in 7<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASIT-AL l'informazione territoriale e la dimensione tempo ATTI Volume 1 Palazzo della Gran Guardia Piazza Bra Verona, 28-31 ottobre 2003, Verona 2003, pp. 97-102.
- ARNAUD-FASSETTA *et al.* 2003: G. ARNAUD-FASSETTA, M.-B. CARRE, R. MAROCCO, F. MASELLI SCOTTI, N. PUGLIESE, C. ZACCARIA, A. BANDELLI, V. BRESSESON, G. MANZONI, M.E. MONTENEGRO, CH. MORHANGE, M. PIPAN, A. PRIZZON, I. SICHÉ, *The site of Aquileia (northeastern Italy): example of fluvial geoarchaeology in a Mediterranean deltaic plain - Le site d'Aquileia (Italie nord-orientale): exemple de géoarchéologie fluviale dans une plaine deltaïque méditerranéenne*, in *Géomorphologie: relief, processus, environnement.*, IV, 2003, pp. 227-246.
- BARET, JACQUEMOND, HANOCQ 1993: F. BARET, S. JACQUEMOND, J.F. HANOCQ, *The soil line concept in remote sensing*, in *Remote Sensing Reviews*, 7, 1993, pp. 65-82.
- BELVEDERE *et al.* 2001: O. BELVEDERE, A. BURGIO, G. CIRAOLO, G. LA LOGGIA, A. MALTESE, *Hyperspectral MIVIS data analysis for archaeological applications*, in *Proceedings of the Fifth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*. S. Francisco, California 17-20 September 2001, S. Francisco 2001, [CD Rom].
- BELVEDERE *et al.* 2004: O. BELVEDERE, A. BURGIO, G. CIRAOLO, G. LA LOGGIA, A. MALTESE, D. RAMETTA, *Telerilevamento di aree archeologiche mediante dati iperspettrali MIVIS*, in *Ag. Cent.*, I, 2004, pp. 199-215.
- BERTACCHI 1990: L. BERTACCHI, *Il sistema portuale della metropoli aquileiese*, in *AAAd*, XXXVI, 1990, pp. 227-253.
- BERTACCHI 2003: L. BERTACCHI, *Nuova pianta archeologica di Aquileia*, Udine 2003.
- BIANCHI *et al.* 1997: R. BIANCHI, R.M. CAVALLI, F. COLOSI, C.M. MARINO, S. PIGNATTI, M. POSCOLIERI 1997, *Airborne Hyperspectral MIVIS data over Selinunte ancient town area (Sicily, Italy) as a support to classical archaeological investigation*, in *Proceedings of the third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition. Development, Integration, Application & Operations*, 7-10 July 1997, Copenhagen, Denmark, II, Ann Arbor 1997, pp. 761-768.
- BIANCHI *et al.* 1998: R. BIANCHI, R.M. CAVALLI, F. COLOSI, M.C. CONTI, C.M. MARINO, S. PIGNATTI, S. PIRO, M. POSCOLIERI, L. VERSINO, C. ZOPPI, *Selinunte 4*, Roma 1998.
- BIANCHI *et al.* 1999: R. BIANCHI, R.M. CAVALLI, C. CORSI, C.M. MARINO, S. PIGNATTI, *Ricerche topografiche in Sicilia: integrazione tra metodi tradizionali e dati iperspettrali da piattaforma aerea*, in R.F. DOCTER, E.M. MOORMAN (a cura di), *Classical archaeology towards the Third Millennium: reflections and perspectives; Proceedings of the XVth International Congress of Classical Archaeology*, Amsterdam, July 12-17, 1998, Amsterdam 1999, pp. 70-72.
- BOARDMAN, KRUSE 1994: J.W. BOARDMAN, F.A. KRUSE, *Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada*, in *Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan*, San Antonio TX 1994, pp. 407-18.
- BOCCARDO, TOMOLO, SPANÒ 2002: P. BOCCARDO, F. G. TOMOLO, A. SPANÒ, *GIS design using high geometric resolution satellite images and hyperspectral airborne data*, in *ISPRS Vol. XXXIV Part 5 Commission V Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium. Close-Range Imaging, Long-Range Vision, September, 2-6, 2002 Corfu, Greece*, Corfu 2002, pp. 309-314.
- BOSIO 1991: L. BOSIO, *Le strade romane della Venetia e dell'Histria*, Padova 1991.
- BOTTAZZI, BUORA 1999: G. BOTTAZZI, M. BUORA, *Nuovi dati sul territorio di Aquileia romana*, in *AAAd*, XLV, 1999, pp. 61-77.
- BUORA 1992: M. BUORA, *Continuità e discontinuità degli insediamenti in Aquileia e nell'immediato suburbio*, in G.P. BROGIOLO, L. CASTELLETTI (a cura di), *Il territorio tra tardoantico e altomedioevo. Metodi di indagine e risultati*, III Seminario sul tardoantico e l'altomedioevo nell'area alpina e padana, (Monte Barro - Galbiate 1991), Firenze 1992, pp. 73-83.
- CAMPANA 2002: S. CAMPANA, *High resolution satellite imagery: a new source of information to the archaeological study of Italian landscapes? Case study of Tuscany*, in B. WARMBEIN (a cura di), *Proceedings of the Conference Space Applications for Heritage Conservation, 5-8 November 2002 Strasbourg, France*, Strasbourg 2002, S2\_14 [CD Rom].
- CAMPANA 2004: S. CAMPANA, *Le immagini da satellite nell'indagine archeologica: stato dell'arte, casi di studio, prospettive*, *Archeologia aerea*, I, 2004, pp. 279-299.
- CAMPANA, PRANZINI 2001: S. CAMPANA, E. PRANZINI, *Il telerilevamento in archeologia*, in S. CAMPANA, M. FORTE (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology: XI ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia*, Certosa di Pontignano (Siena), 6-11 Dicembre 1999, Firenze 2001, pp. 17-62.
- CARRE *et al.* 2003: M.-B. CARRE, R. MAROCCO, F. MASELLI SCOTTI, N. PUGLIESE, *Quelques données récentes sur le réseau fluviale et le paléoenvironnement d'Aquileia (Italie nord-orientale)*, in *Puertos fluviales antiguos: ciudad, desarrollo e infraestructuras*, *Actas IV Jornadas de Arqueología Subacuática*, Valencia 2003, pp. 299-311.
- CARRE, MASELLI SCOTTI 2001: M.-B. CARRE, F. MASELLI SCOTTI, *Il porto di Aquileia: dati antichi e ritrovamenti recenti*, in *AAAd*, XLVI, 2001, pp. 211-243.
- CAVALLI R.M. *et al.* 1998: R.M. CAVALLI, F. COLOSI, S. PIGNATTI, M. POSCOLIERI, *Il telerilevamento aereo per lo studio dei beni archeologici: Applicazione dei dati iperspettrali MIVIS sul Parco Archeologico di Selinunte*, in R. BIANCHI, R.M. CAVALLI, F. COLOSI, M.C. CONTI, C.M. MARINO, S. PIGNATTI, S. PIRO, M. POSCOLIERI, L. VERSINO, C. ZOPPI (a cura di) *Selinunte 4*, Roma 1998, pp. 339-351.
- CAVALLI *et al.* 2005: R.M. CAVALLI, P. MEROLA, S. PIGNATTI, M. POSCOLIERI, *Telerilevamento iperspettrale MIVIS per lo studio delle testimonianze antropiche nell'area archeologica di Arpi (FG)*, in *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 33/34, 2005, pag. 109-117.
- CAVALLI, MARINO, PIGNATTI 2003: R.M. CAVALLI, C. M. MARINO, S. PIGNATTI, *Hyperspectral airborne remote sensing as an aid to a better understanding and characterization of buried elements in different archaeological sites*, in M. FORTE, P. RYAN-WILLIAMS (a cura di), *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies. Proceedings of the 1st Italy-United States Workshop*,

- Boston, Massachusetts, USA, November 1-3, 2001, Oxford 2003, pp. 29-32.
- CAVALLI, PIGNATTI 2001: R.M. CAVALLI, S. PIGNATTI, *Il rilevamento iperspettrale da aereo per lo studio dei beni archeologici: applicazione dei dati iperspettrali MIVIS*, in CAMPANA, FORTE (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology: XI Ciclo di Lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, Certosa di Pontignano (Siena), 6-11 Dicembre 1999*, Firenze 2001, pp. 221-231.
- COREN *et Al.* 2005: F. COREN, D. VISINTINI, F. M. FALES, P. STERZAI, G. PREARO, M. RUBINICH 2005, *Integrazione di dati laserscanning ed iperspettrali per applicazioni archeologiche*, in 9<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali 15 - 18 novembre 2005, Centro Congressuale "Le Ciminiere", Catania, I, Catania 2005, pp. 793-798.
- DE PAULIS, CAVAZZINI 2000: R. DE PAULIS, A. CAVAZZINI, *Georeferenziazione e integrazione di dati iperspettrali MIVIS all'interno di Sistemi Informativi Geografici*, in *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 20/21, 2000, pp. 19-26.
- DERMANIS, BIAGI 2002: A. DERMANNIS, L. BIAGI, *Telerilevamento. Informazione territoriale mediante immagini da satellite*, Milano 2002.
- EMMOLO *et Al.* 2003: D. EMMOLO, V. FRANCO, P. ORLANDO, B. VILLA, *Tecniche di telerilevamento iperspettrale per indagini archeologiche*, in 7<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA L'informazione territoriale e la dimensione tempo ATTI Volume 2 Palazzo della Gran Guardia Piazza Bra Verona, 28-31 ottobre 2003, II, Verona 2003, pp. 1029-1034.
- EMMOLO *et Al.* 2004: D. EMMOLO, V. FRANCO, M. LO BRUTTO, P. ORLANDO, B. VILLA, *Hyperspectral techniques and GIS for archaeological investigation*, in ISPRS, Vol. XXXV, part B7, Commission VII *Proceeding of the ISPRS Commission VII Symposium. Geo-Imagery Bridging Continents July 12-23, 2004 Istanbul, Turkey*, Istanbul 2004, pp. 492-497.
- GADDI 2001: D. GADDI, *Approdi nella laguna di Grado*, in AAAA, XLVI, 2001, pp. 261-275.
- GRILLI 1979: A. GRILLI, *Aquileia: il sistema viario romano*, in AAAA, XV, 1, 1971, pp. 223-257.
- JACKSON 1983: R.D. JACKSON, *Spectral Indices in n-space*, in *Remote Sensing of Environment*, 13, pp. 409-421.
- KAUTH, THOMAS 1976: R.J. KAUTH, G.S. THOMAS, *The Tasseled Cap. A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat*, in *Proceeding of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette -IN 1976, pp. 41-51.
- LEPRIEUR, KERR, PICHON 1996: C. LEPRIEUR, Y.H. KERR, J.M. PICHON, *Critical assessment of vegetation indices from AVHRR in a semi-arid environment*, in *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1996, pp. 2549-2563.
- LILLESAND, KIEFER, CHIPMAN 2004: T.M. LILLESAND, R.W. KIEFER, J.W. CHIPMAN, *Remote sensing and image interpretation*, New York 2004.
- LOGAN, STRAHLER 1983: T.L. LOGAN, A.H. STRAHLER, *Landsat transforms for forest applications*, in *Proceeding of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette -IN 1983, pp. 146-152.
- MAGGI, ORIOLO 1999: P. MAGGI, F. ORIOLO, *Dati d'archivio e prospezioni di superficie: nuove prospettive di ricerca per il territorio suburbano di Aquileia*, in AAAA, XLV, 1999, pp. 99-123.
- MAGGI, ORIOLO 2004: P. MAGGI, F. ORIOLO, *Il percorso della via Annia nel territorio di Aquileia: elementi per la sua definizione*, in M. S. BUANA, F. GHIDINI (a cura di), *La via Annia e le sue infrastrutture. Atti delle Giornate di Studio Ca' Tron di Roncade, Treviso 6-7 novembre 2003*, Cornuta 2004.
- MASELLI SCOTTI, PARONUZZI, PUGLIESE 1999: F. MASELLI SCOTTI, P. PARONUZZI, N. PUGLIESE, *Sondaggi geognostici per la prospezione geoarcheologica del territorio di Aquileia: il progetto SARA*, in AAAA, XLV, 1999, pp. 79-97.
- MASELLI SCOTTI F., ZACCARIA C. 1998: F. MASELLI SCOTTI, C. ZACCARIA, *Novità epigrafiche dal foro di Aquileia. A proposito della base di T. Annius T.f. Tri.vir*, in G. PACI (a cura di), *Epigrafia romana in area adriatica*, Macerata 1998, pp. 113-158.
- MATHER 2004: P.M. MATHER, *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: an introduction*, Chichester 2004.
- MEROLA 2004: P. MEROLA, *Tecniche di telerilevamento iperspettrale applicate alla ricerca archeologica. Il caso di Lilybaeum (Marsala)*, in *Archeologia aerea*, I, 2004, pp. 301-317.
- MEROLA *et Al.* 2006: P. MEROLA, A. ALLERINI, D. GUGLIETTA, S. SAMPIETRI, *Using Vegetation Indices to study archaeological areas*, in S. CAMPANA, M. FORTE (a cura di), *From Space to Place, 2<sup>nd</sup> International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, *Proceedings of the 2nd International Workshop*, CNR, Rome, Italy, December 4-7, 2006, Oxford 2006, pp. 303-309.
- MIRABELLA ROBERTI 1990: M. MIRABELLA ROBERTI, *Via Gemina*, in AAAA, XXXVI, 1990, pp. 61-77.
- MORAIN *et Al.* 1981: S. MORAIN, C. NELSON, M.E. WHITE, A. KOMAREK, *Remote detection of prehistoric sites in Bandelier National Monument*, in T.R. LYONS (a cura di), *Remote Sensing: Multispectral Analyses of Cultural Resources, Chaco Canyon and Bandelier National Monument*, Washington DC 1981, pp. 38-61.
- MORSELLI 1999: C. MORSELLI, *La carta archeologica come strumento di conoscenza e di tutela: l'esperienza del Friuli-Venezia Giulia*, in AAAA, XLV, 1999, pp. 253-262.
- NOGI, SUN, TAKAGI 1993: A. NOGI, W. SUN, M. TAKAGI, *An Alternative Correction of Atmospheric Effects for NDVI Estimation*, in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993. IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment*, 3, 1993, pp. 1137-1139.
- ORIOLO 1998: F. ORIOLO, *Nuovi dati sulle vie sepolcrali di Aquileia*, in *Xantener Berichte*, VII, 1998, pp. 177-180.
- PARMEGIANI, POSCOLIERI 1996: N. PARMEGIANI, M. POSCOLIERI, *Analisi di siti archeologici inquadrati nel loro contesto territoriale: gli insediamenti proto-storici del bacino del fiume Fionra*, in P. MOSCATI (a cura di), *III Convegno internazionale di Archeologia e Informatica. III International Symposium on Computing and Archaeology, ACalc*, VII, 1996, pp. 79-89.
- PERRY, LAUTENSCHLAGER 1984: C.R. PERRY C.R., L.F. LAUTENSCHLAGER, *Functional equivalence of spectra vegetation indices*, in *Remote Sensing of Environment*, 14, 1984, pp. 169-182.
- PICCARRETA, CERAUDO 2000: F. PICCARRETA, G. CERAUDO, *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologia, tecniche e applicazioni*, Bari 2000.
- PRENC 2002: F. PRENC, *Le pianificazioni agrarie di età romana nella pianura aquileiese*, Trieste 2002.
- QI *et Al.* 1994: J. QI, A. CHEHBOUNI, A. R. HUETE, Y. H. KERR, *Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)*, in *Remote Sensing of Environment*, 48, pp. 119-126.
- RICHARDSON, WIENGAND 1977: A.J. RICHARDSON, C.L. WIENGAND, *Distinguishing vegetation from*

- soil background information, in *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, 43, 1977, pp. 1541-1552.
- ROSADA 1998: G. ROSADA, *La via Postumia da Verona ad Aquileia: un percorso in terre umide*, in G. SENA CHIESA, M.P. LAVIZZARI PEDRAZINI (a cura di), *Tesori della Postumia. Archeologia e storia intorno a una grande strada romana alle radici dell'Europa*. (Catalogo della mostra), Cremona 1998, pp. 242-248.
- Rivista Italiana di Telerilevamento 2000: Rivista Italiana di Telerilevamento. Numero speciale dedicato ai lavori presentati al seminario "I rilevamenti iperspettrali MIVIS: ricerca ed applicazioni"*, Colorno (Pr) giugno 2000, 20/21, 2000.
- ROUSE *et Al.* 1973: J.W. ROUSE, R.H. HAAS, J.A. SCHELL, D.W. DEERING, *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ETRS, Third ETRS Symposium, NASA SP353*, 1, Washington DC 1973, pp. 309-317.
- Scavi ad Aquileia* 1994: M. VERZÀR BASS (a cura di), *Scavi ad Aquileia, I. L'area ad est del Foro, II. Rapporto degli scavi 1989-1991*, Roma 1994.
- SEVER 1998: T. L. SEVER, *Validating Prehistoric and Current Social Phenomena upon the Landscape of the Peten, Guatemala*, in D. LIVERMAN, E. F.MORAN, R. R. RINDFUSS, P.C. STERN (a cura di), *People and Pixels. Linking Remote Sensing and Social Science*, Washington DC 1998, pp. 145-163.
- SILJESTROM *et Al.* 1997: P.A. SILJESTRÖM, A. MORENO, K. VIKGREN, L. M. CACERES, *The application of selective principal components analysis (SPCA) to a Thematic Mapper (TM) image for the recognition of geomorphologic features configuration*, in *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1997, pp. 3843-3852.
- STRAZZULLA 1989: M.J. STRAZZULLA, *In paludibus moenia constituta: problemi urbanistici di Aquileia in età repubblicana alla luce della documentazione archeologica e delle fonti scritte*, in *AAAd*, XXXV, 1989, pp. 187-228.
- SUGAN *et Al.* 2003: M. SUGAN, P. MOGOROVICH, M. PIPAN, *Integrazione di metodologie d'analisi per la ricerca di beni archeologici sepolti*, in 7<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA L'informazione territoriale e la dimensione tempo ATTI Volume 2 Palazzo della Gran Guardia Piazza Bra Verona, 28-31 ottobre 2003, II, Verona 2003, pp. 1777-1782.
- TIUSI 2004: C. TIUSI, *Il sistema di distribuzione di Aquileia: mercati e magazzini*, in *AAAd*, LIX, 2004, pp. 257-316.
- TORTORICI 1997: E. TORTORICI, *Archeologia subacquea e trasformazioni geomorfologiche del territorio: il caso della Laguna di Grado*, in *Atti del Convegno Nazionale di Archeologia Subacquea (Anzio 1996)*, Bari 1997, pp. 315-325.
- TOWNSEND, HARRISON 1984: J.R.G. TOWNSEND, A. HARRISON, *Estimation of the spatial resolving power of the Thematic Mapper of Landsat-4*, in *Proceedings of 10th Annual Conference of the Remote Sensing Society. Satellite Remote Sensing: Review and Preview*, Reading UK 1984, pp. 433-442.
- TRAVIGLIA 2005a: A. TRAVIGLIA, *Integration of MIVIS Hyperspectral remotely sensed data and Geographical Information Systems to study ancient landscape: the Aquileia case study*, in *Ag. Cent.*, 2, 2005, pp. 139-170.
- TRAVIGLIA 2005b: A. TRAVIGLIA, *A semi-empirical index for estimating soil moisture from MIVIS data to identify subsurface archaeological sites*, in 9<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali 15 - 18 novembre 2005, Centro Congressuale "Le Ciminiere", Catania, II, Catania 2005, pp. 1969-1974.
- TRAVIGLIA, c.s.: A. TRAVIGLIA, *MIVIS Hyperspectral Sensors for the Detection and GIS supported Interpretation of Subsoil Archaeological Sites*, in *Proceedings CAA2006. Digital Discovery. Exploring New Frontiers in Human Heritage*, Fargo -ND, in corso stampa.
- TUCKER 1979: C.J. TUCKER, *Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation*, in *Remote Sensing of Environment*, 8, 1979, pp. 127-150.
- TUCKER, TOWNSHEND, GOFF 1985: C.J. TUCKER, J. G.R. TOWNSHEND, T.E. GOFF 1985, *African Land-Cover Classification Using Satellite Data*, in *Science*, 227 (4685), 1985, pp. 369-375.
- WIEGAND, RICHARDSON 1982: C.L. WIEGAND, A.J. RICHARDSON, *Comparisons among a new soil index and other two and four dimensional vegetation indices*, in *American Congress on Surveying and Mapping and American Society of Photogrammetry Convention; APS Annual Meeting, 48th, Denver, CO; United States, Denver -CO 1982*, pp. 210-227.
- WILSON 2000: D.R. WILSON, *Air Photo Interpretation for Archaeologists*, London 2000.

### Riferimenti Internet

- AISA Eagle: [www.specim.fi](http://www.specim.fi)  
 CGR Parma <http://www.cgrit.it/tecnologie/mivis.html>  
 LARA: <http://www.lara.rm.cnr.it/italiano/mivis/>  
<http://www.lara.rm.cnr.it/italiano/lara/index.html>

### Abbreviazioni delle riviste

- AAAd: *Antichità Altoadriatiche*  
 ACalc: *Archeologia e Calcolatori*  
 Ag.Cent.: *Agri Centuriati. International Journal of Landscape Archaeology*  
 Archeologia aerea: *Archeologia aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica*