

Interpretazione di immagini satellitari della Pianura di Pisa

Bini M., Kukavicic M., Pappalardo M.

Sono state acquisite immagini multispettrali a medio-alta risoluzione dai satelliti SPOT, ALOS AVNIR-2 e TERRA ASTER, allo scopo di individuare tracce di paleoalvei ed antiche zone umide allo stato attuale invisibili con l'indagine morfologica di superficie. Sono state sperimentate e comparate tra di loro diverse tecniche di elaborazione di immagini, quali l'applicazione di differenti composizioni di bande in falsi colori (colour composite), l'enfatizzazione di singole bande e la trasformazione dell'intero dataset multispettrale. I risultati dimostrano che esiste una buona corrispondenza tra le forme evidenziate e quelle precedentemente rilevate nell'ambito del progetto MAPPA attraverso altre tecniche di analisi geomorfologica.

Keywords: Immagini satellitari, paleoalvei, zone umide, Pisa.

1. Dati satellitari

Sono state acquisite diverse immagini multispettrali allo scopo di integrare le conoscenze sull'assetto geomorfologico della Pianura di Pisa derivate dalle fasi precedenti del progetto, e per valutare, a tale fine, il potenziale delle immagini satellitari. In particolare questo tipo di approccio è stato incentrato sull'individuazione di tracce di paleoalvei ed abbinato all'analisi stereoscopica di fotografie aeree multitemporali dal 1943 to 2010 (BINI *et alii*, 2011). Sebbene fossero disponibili per l'area dati satellitari ad altissima risoluzione (ad esempio dati Geoeye-1, con pixel di 2 m di risoluzione), le forme che ci si proponeva di rilevare erano sovradimensionate rispetto alla risoluzione delle immagini VHR. Di conseguenza era lecito aspettarsi alti livelli di rumore nella risposta spettrale e probabilmente un'accuratezza eccessivamente bassa. Per questo motivo sono state scelte immagini a medio-alta risoluzione (con pixel di 10 m di risoluzione) acquisite dai satelliti SPOT, ALOS AVNIR-2 e TERRA ASTER.

La piattaforma SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*) fa parte del programma francese di osservazione della terra gestito dal CNES (*Centre National*

d'Etudes Spatiales). Lo SPOT 5 è il satellite ottico più recente del programma, lanciato nel 2002 ed ancora operativo. Lo SPOT 5 ha due strumenti ad alta risoluzione (HRG) che offrono una risoluzione maggiore rispetto ai precedenti, ossia da 2,5 a 5 m in modalità pancromatica e di 10 m in quella multispettrale. La scena di ripresa copre un'area vasta (60 x 60 km), il che, unitamente all'alta risoluzione, rappresenta un buon compromesso per applicazioni quali il rilevamento a media scala (1:25 000 sino a 1:10 000). L'immagine multispettrale scelta dal catalogo SPOT, considerando la stagione più idonea e l'assenza di copertura nuvolosa, è stata quella del 3 marzo 2006. Essa è caratterizzata da quattro bande spettrali che coprono la porzione dello spettro elettromagnetico che va dal visibile (VIS) all'infrarosso vicino (NIR) sino all'infrarosso medio (SWIR). Mentre la banda del verde, del rosso e dell'infrarosso vicino hanno risoluzione spaziale di 10 m, quella dell'infrarosso medio ha risoluzione di 20 m; questa però viene ricampionata a 10 m di risoluzione prima di essere distribuita. Le caratteristiche spettrali e di acquisizione sono illustrate in Tabella 1.

Bande spettrali	Risoluzione spaziale (m)	Intervallo spettrale (µm)
B1: verde	10	0.50 - 0.59
B2: rosso	10	0.61 - 0.68
B3: infrarosso vicino	10	0.78 - 0.89
B4: infrarosso medio (SWIR)	20	1.58 - 1.75

Tabella 1. Caratteristiche del sensore SPOT 5.

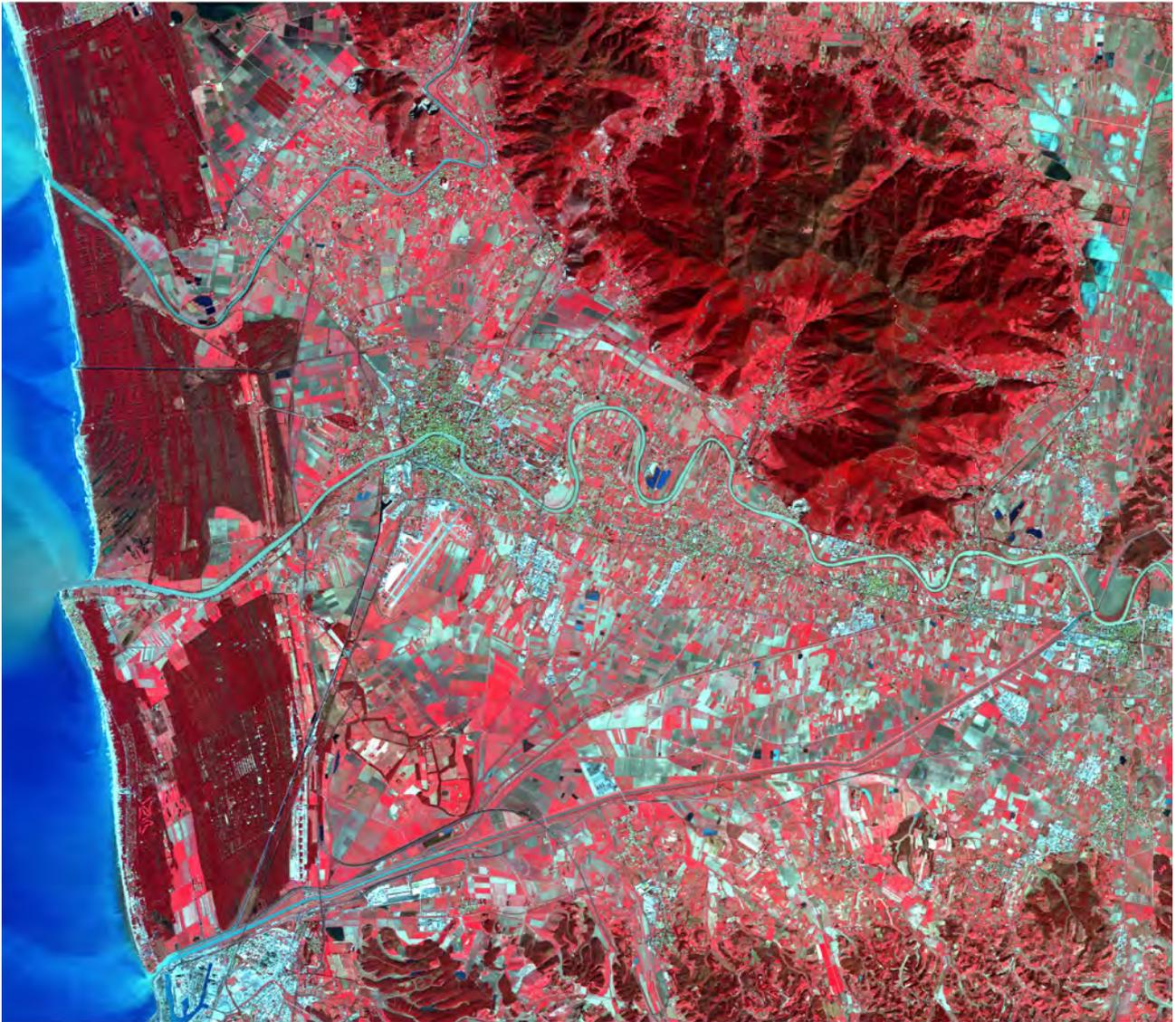


Figura 1. Immagine SPOT 5 dell'area di studio visualizzata nella composizione in falsi colori, o colour composite, 321 RGB.

Il secondo tipo di immagini multispettrali utilizzate deriva dal satellite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), che fa parte del programma di osservazione spaziale giapponese. Il satellite ALOS è stato messo in orbita nel Gennaio 2006 ed era dotato di tre sensori differenti. Per un'avaria della piattaforma avvenuta il 22 Aprile 2011, il satellite ha smesso di acquisire e il 12 Maggio 2011 l'agenzia aerospaziale giapponese JAXA (*Japanese Aerospace Exploration Agency*) ha spento definitivamente il trasmettitore a bordo di ALOS. Dei tre sensori presenti sul satellite, ANVIR-2 era un sensore multispettrale con quattro bande di ripresa nella porzione dello spettro elettromagnetico compresa tra il visibile e l'infrarosso vicino. La sua risoluzione spaziale era di 10 m e la dimensione delle singole scene era di 70 km di lato. Lo scopo del sensore era quello di acquisire dati per osservazioni di dettaglio della superficie terrestre. Gli altri due sensori presenti su ALOS erano PRISM, un radiometro pancromatico operante nella porzione dello spettro tra

0.52 e 0.77 μm , con risoluzione di 2,5 m, progettato per acquisire anche informazioni sull'altimetria della superficie terrestre, e PALSAR, dotato di un sensore attivo a microonde, che usava la banda L ad una frequenza di 1,3 GHz.

La migliore immagine disponibile fra quelle in catalogo, considerando la qualità, la stagione di acquisizione e il grado di copertura nuvolosa, è stata ritenuta quella del 13 Luglio 2007. Le caratteristiche di ANVIR-2 e le bande spettrali di acquisizione per l'immagine selezionata (Fig. 2) sono riassunte in Tabella 2.

La terza fonte di dati satellitari utilizzate ai fini di questo studio è il sensore ASTER della piattaforma TERRA. Dato il basso costo di queste immagini è stato possibile acquisire due scene relative a due differenti stagioni caratterizzate da condizioni climatiche che influenzano in maniera diversa la vegetazione, allo scopo di aumentare la probabilità di rilevare forme sepolte.

Caratteristiche del sensore ANVIR-2	
Numero di bande	4
Lunghezza d'onda	Banda 1: 0.42-0.50 μm Banda 2: 0.52-0.60 μm Banda 3: 0.61-0.69 μm Banda 4: 0.76-0.89 μm
Risoluzione spaziale	10 m (at Nadir)
Ampiezza della strisciata	700 km (at Nadir)
S/N	>200
MTF	Banda1-3: > 0.25 Banda4: > 0.20
Numero di sensori	7000 / banda
Angolo di puntamento	-44 to +44 gradi
Risoluzione radiometrica	8 bits

Tabella 2. Caratteristiche del sensore AVNIR-2.



Figura 2. Anteprima della scena ALOS AVNIR-2 del 13 Luglio 2007

Il sensore ASTER (*Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer*) può essere considerato il successore del più noto Landsat ETM. È stato lanciato dalla NASA JPL nel 1999 e raccoglie dati in 14 bande, con tre sottosistemi che operano in tre diverse regioni spettrali: il visibile-infrarosso vicino (VNIR), l'infrarosso medio (SWIR), e l'infrarosso termico (TIR) (Fig. 3), caratterizzate da risoluzione spaziale rispettivamente di 15, 30 e 90 m (Tab. 3). Come lo SPOT anche l'ASTER non acquisisce nella porzione blu dello spettro elettromagnetico.

Le immagini ASTER utilizzate in questo studio sono di livello 1A, acquisite il 1° Maggio 2005 e il 16 Febbraio 2007 (Fig. 4). Sebbene il satellite sia ancora operante si è preferito selezionare dati acquisiti prima del Maggio 2007, essendo quelli successivi a tale data affetti da anomalie di saturazione e di *striping* nelle bande dell'infrarosso medio.

Sottosistema	Numero Banda	Intervallo spettrale (μm)	Risoluzione spaziale (m)	Risoluzione radiometrica
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
TIR	9	2.360-2.430	90	12 bits
	10	8.125-8.475		
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

Tabella 3. Caratteristiche del sottosistema dei tre sensori ASTER (dal manuale d'uso di ASTER).

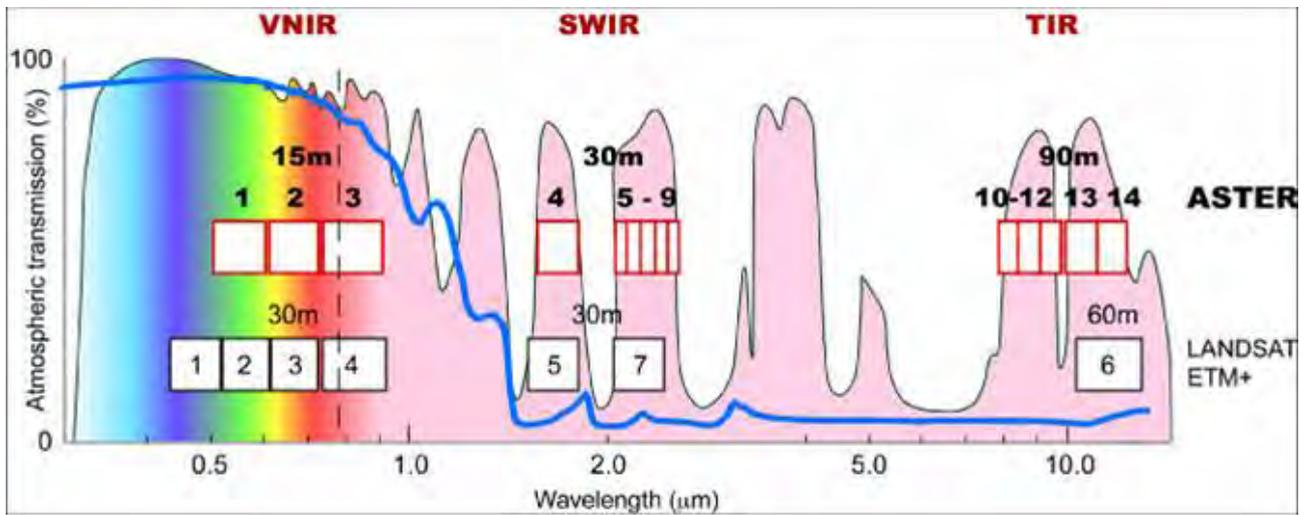


Figura 3. Distribuzione delle bande dei sensori ASTER e Landsat sovrapposte al modello della radiazione atmosferica (fonte: NASA <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/images/spectrum.jpg>>).

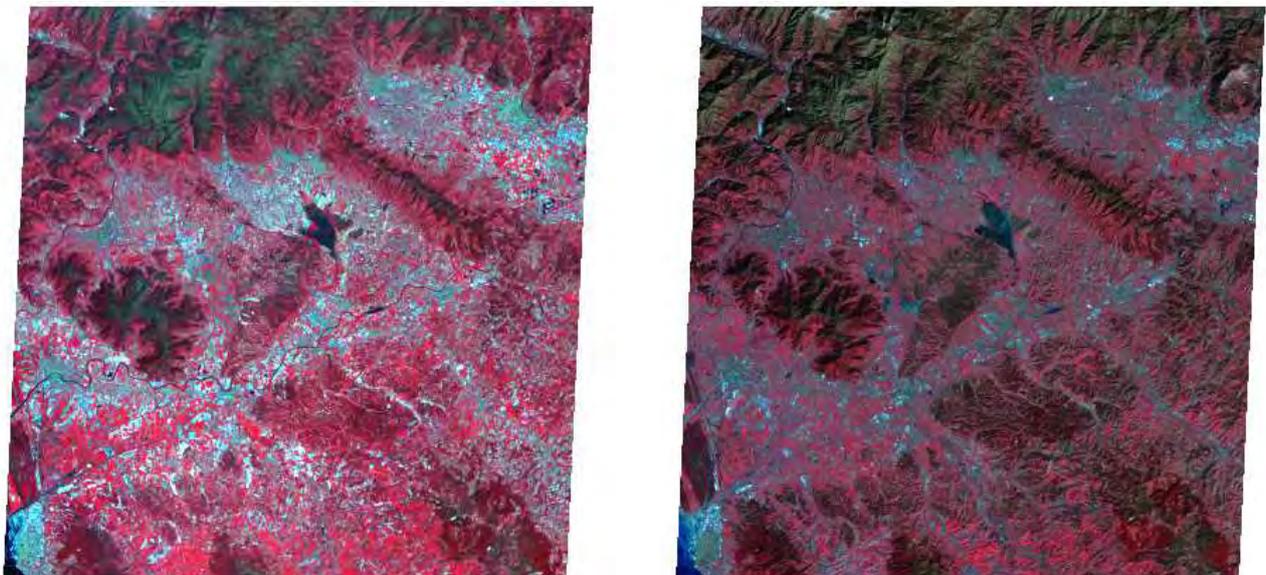


Figura 4. A sinistra l'immagine ASTER del Maggio 2005 della pianura di Pisa e della Toscana Orientale; a destra, l'immagine ASTER del Febbraio 2007 della stessa area (entrambe con rappresentazione in falsi colori 321 RGB). La copertura di entrambe le scene è di 60 x 60 km.

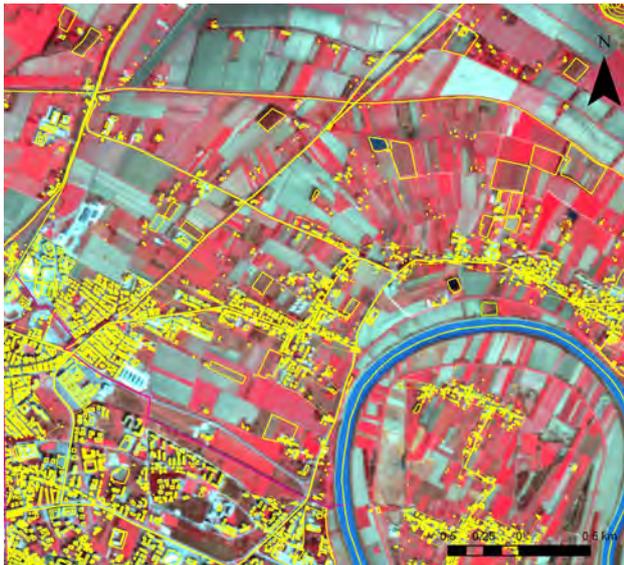


Figura 5. L'immagine SPOT 5 confrontata con la carta topografica digitale (C.T.R., 1:10.000) rappresentata in giallo.

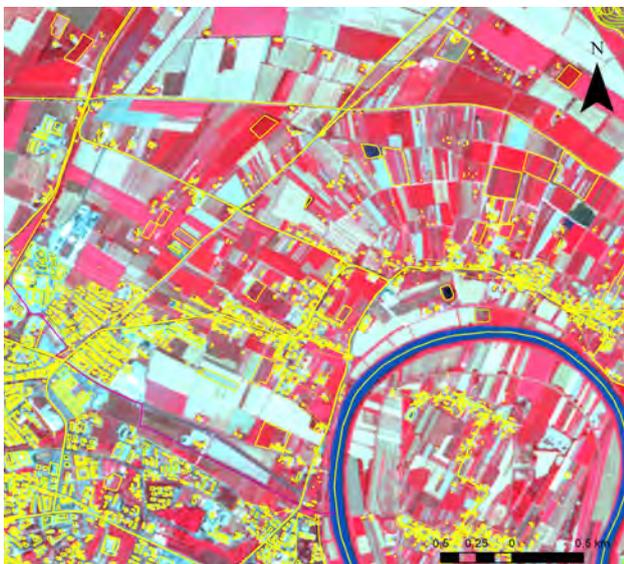


Figura 6. L'immagine ALOS AVNIR-2 confrontata con la carta topografica digitale (C.T.R., 1:10.000) rappresentata in giallo.

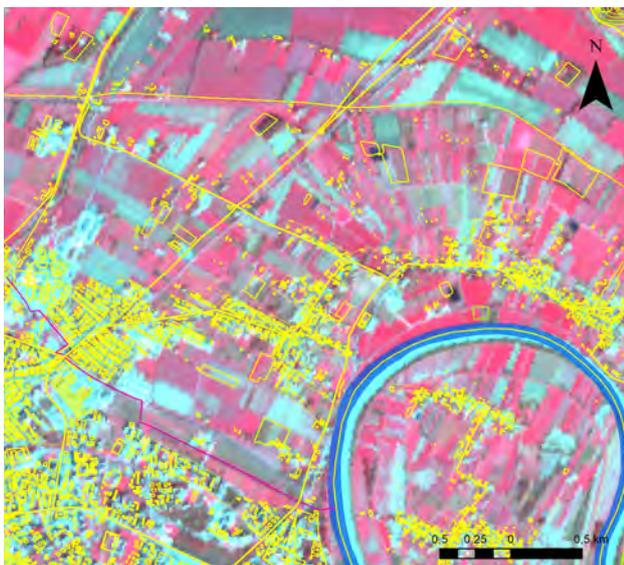


Figura 7. L'immagine ASTER (Febbraio 2007) confrontata con la carta topografica digitale (C.T.R., 1:10.000) rappresentata in giallo. E' evidente l'errore di posizionamento spaziale.

2. Elaborazione delle immagini

Prima delle fasi di elaborazione tutti i dati sono stati controllati per verificare se esistesse la necessità di effettuare operazioni preliminari. Solo i dati ASTER hanno richiesto di essere geometricamente corretti con una procedura che ha previsto la creazione di file di geo-calibrazione.

Tutte le immagini sono state originariamente acquisite in coordinate geografiche WGS84 e restituite in proiezione UTM, Zona 32 Nord. Dato che il Progetto MAPPA utilizza il sistema di coordinate nazionale italiano Gauss Boaga, tutti i dati sono stati convertiti di conseguenza.

Nella fase preliminare di controllo in ambiente GIS tutti i dati sono stati confrontati con la cartografia digitale di maggior dettaglio disponibile (1:10:000, C.R.T., Regione Toscana) (Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7).

Le immagini ASTER presentavano un errore spaziale di posizionamento assente nella SPOT e nella ALOS, che è stato corretto tramite l'ausilio di punti di controllo sul terreno.

Secondo gli obiettivi di questa indagine nell'ambito del Progetto MAPPA, ovvero l'individuazione di paleovalvi nella pianura alluvionale dell'Arno, sono state sperimentate e confrontate fra loro diverse tipologie di elaborazione d'immagine. In particolare sono state eseguite diverse composizioni in falsi colori, tecniche di enfattizzazione di banda e trasformazioni di immagine. Successivamente, i risultati migliori sono stati selezionati per la fotointerpretazione dei paleovalvi e delle zone umide.

Per i dati dello SPOT5 del 6 Marzo 2006 sono state valutate come elaborazioni più significative la rappresentazione (o composizione) in falsi colori 321 RGB, la prima componente principale della PCA (*Principal Component Analysis*) e l'enfattizzazione della banda SWIR.

Le figure 8 a 13 rappresentano alcuni esempi dell'analisi condotta con i dati SPOT e le relative didascalie descrivono la specifica elaborazione grazie alla quale si è ottenuta quell'immagine.

Per quanto riguarda i dati ALOS AVNIR-2, essendo stati acquisiti durante l'estate (13 Luglio 2007), a causa dell'aridità dei suoli e dell'estensione della copertura vegetale non è stato possibile evidenziare ulteriori paleotracce o identificare forme di interesse. Le elaborazioni fatte hanno consentito solamente di confermare per la maggior parte ciò che era stato già evidenziato con i dati SPOT. Le elaborazioni eseguite sono state le seguenti: composizione in falsi colori 432 RGB ed enfattizzazione della banda dell'infrarosso vicino (NIR) (da Fig. 14 a Fig. 17).

Infine le immagini ASTER, sebbene appartengano a due differenti periodi stagionali (Maggio 2005 e Febbraio 2007) non hanno mostrato differenze l'una rispetto all'altra che si siano rivelate significative per questo studio. Le elaborazioni effettuate sono state le stesse applicate ai dati derivati dagli altri sensori. L'area coperta dalle immagini ASTER è leggermente inferiore a quella coperta dalla SPOT e dalla ALOS, a causa dell'orbita del satellite TERRA: di conseguenza la comparazione non ha potuto essere totale.

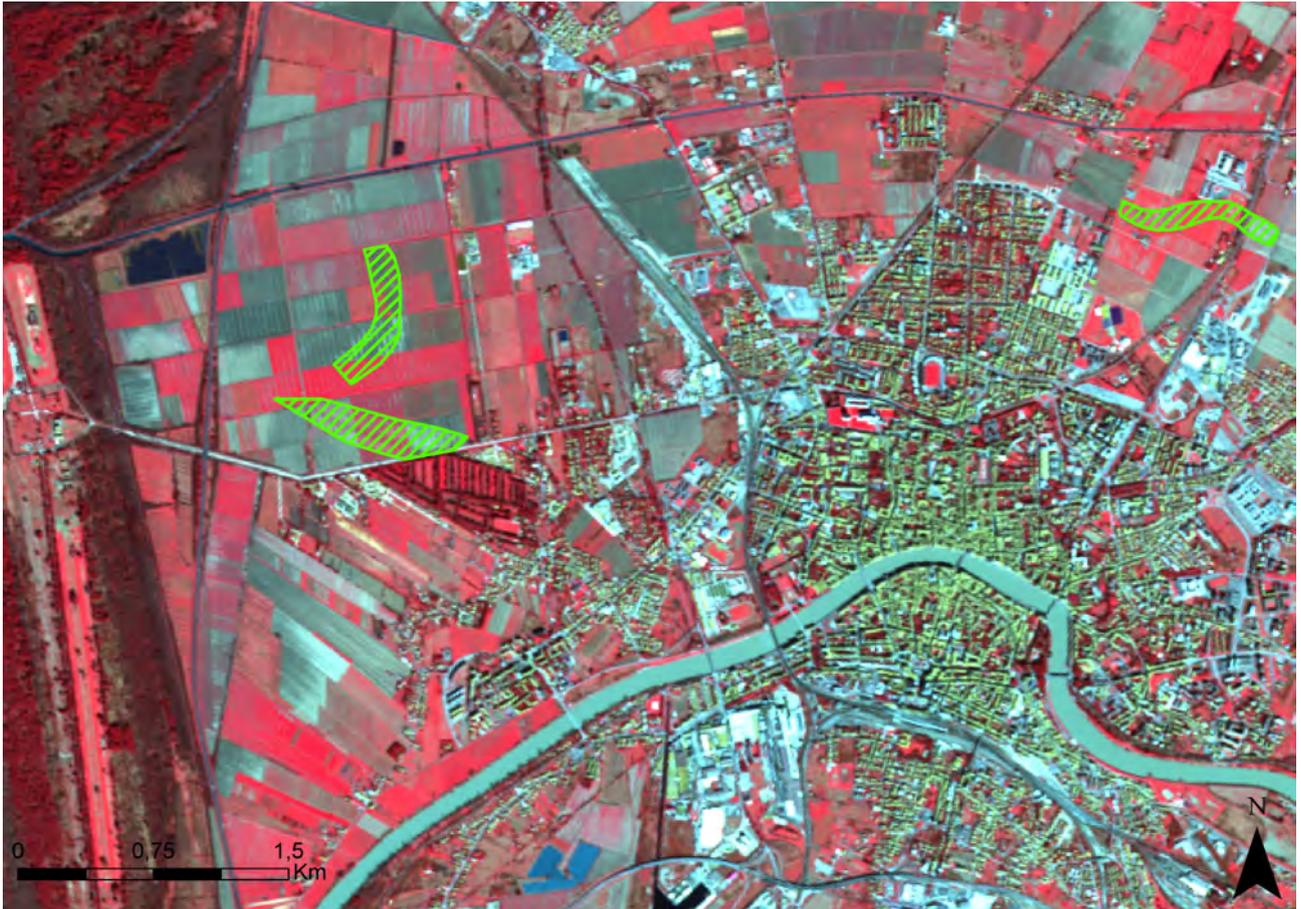


Figura 8. Esempio di tracce evidenziate sul *colour composite* 321 RGB dell'immagine SPOT5 a NO di Pisa. In questa visualizzazione la terza banda (infrarosso vicino) è rappresentata con il colore rosso, la seconda (rosso) in verde e la prima (verde) in blu. E' possibile distinguere la vegetazione arborea (rosso scuro) da quella erbacea delle colture (rosso chiaro) dato che essa ha un'alta riflettanza nell'infrarosso vicino e il tipo di risposta spettrale in questo range è influenzato dalla struttura stessa della vegetazione. Il fiume Arno è rappresentato in ciano per via dei sedimenti in sospensione che influenzano la risposta spettrale nella banda del verde e quella del rosso. Gli specchi d'acqua poco profondi invece appaiono in ciano più scuro a causa della scarsità di sedimenti in sospensione. I campi coltivati temporaneamente privi di vegetazione appaiono nelle varie tonalità di ciano in funzione della loro umidità (il ciano è più scuro là dove il suolo è più umido). Gli edifici commerciali e industriali attorno alla città di Pisa (in bianco in quanto riflettono molto in tutte le bande) si possono distinguere da quelli per civile abitazione (giallino) in quanto questi hanno generalmente il tetto rosso, che dà una risposta spettrale caratteristica.



Figura 9. Dettaglio ingrandito dell'immagine precedente. E' visualizzata la prima componente principale, ossia la prima banda derivata dall'applicazione della trasformazione definita "Analisi delle Componenti Principali" (*Principal Component Analysis*, PCA). Le anomalie sul terreno (identificate con cerchi rossi) sono ancora visibili e maggiormente enfatizzate rispetto al terreno circostante. La PCA è una tecnica di trasformazione multibanda che comprime le informazioni contenute nelle immagini multispettrali in un numero minore di bande e riduce di conseguenza la ridondanza dei dati (RICHARDS, 1986). Dopo questa procedura di decorrelazione le bande sintetiche risultanti contengono, in ordine decrescente, valori di varianza sempre minore, dove le prime 3 bande da sole contengono il 95% dell'informazione. Nel nostro caso, nella figura sovrastante, la PC1 esprime la massima variabilità ottenibile dalla compressione delle 4 bande dello SPOT 5.



Figura 10 . Un altro esempio di anomalie rilevabili sulla prima componente principale, riferibili a tracce di paleoalvei. Nell'immagine sulla sinistra le forme sono state evidenziate con linee verdi, mentre sulla destra è mostrata l'immagine originale.



Figura 11. Esempio di enfattizzazione di una singola banda: la banda dell'infrarosso medio (SWIR) del sensore SPOT. Questa banda, che copre l'intervallo spettrale da 1,58 a 1,75 μm , è indicativa dell'umidità del suolo e della vegetazione (si veda Fig. 13). L'acqua assorbe la radiazione solare e di conseguenza la porzione riflessa è minima, il che si evidenzia sull'immagine con le tonalità scure del grigio. Al contrario i terreni asciutti riflettono una maggiore quantità di radiazione rappresentati dalle tonalità grigio chiaro. Nella figura a sinistra si può notare la linea più scura, orientata N-S, visibile ad ovest della città presso il parco di San Rossore. La traccia è evidenziata con una linea rossa nella figura a destra. Questa linea potrebbe essere messa in relazione con la centuriazione di età Romana, ma necessita di verifiche con alte fonti.



Figura 12. Banda SWIR dello Spot, enfatizzata tramite tecniche di stretching, che mostra l'area a N di Pisa. Questa banda, come già osservato, è un utile indicatore dell'umidità presente nella vegetazione e nel suolo (si veda Fig. 13), tanto che può essere utilizzata per mappare le zone umide nell'area di studio (nell'esempio evidenziate tramite i poligoni gialli).

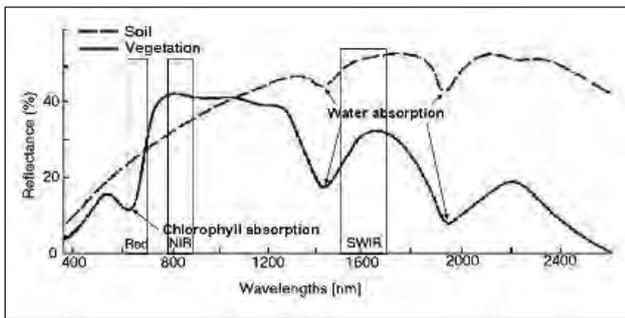


Figura 13. Firma spettrale del suolo e della vegetazione confrontata con alcune delle bande di ripresa del Landsat (rosso, infrarosso vicino e infrarosso medio). La banda dell'infrarosso medio dello SPOT è caratterizzata dello stesso range spettrale di acquisizione (1,58-1,75 μm) della prima banda dell'infrarosso medio del Landsat. Sono evidenziati i picchi di assorbimento dell'acqua a 1.45 e 1.95 μm, prima e dopo l'intervallo spettrale della banda SWIR dello SPOT (LILLESAND AND KIEFER, 1994; ALTOBELLI *et alii*, 2010).

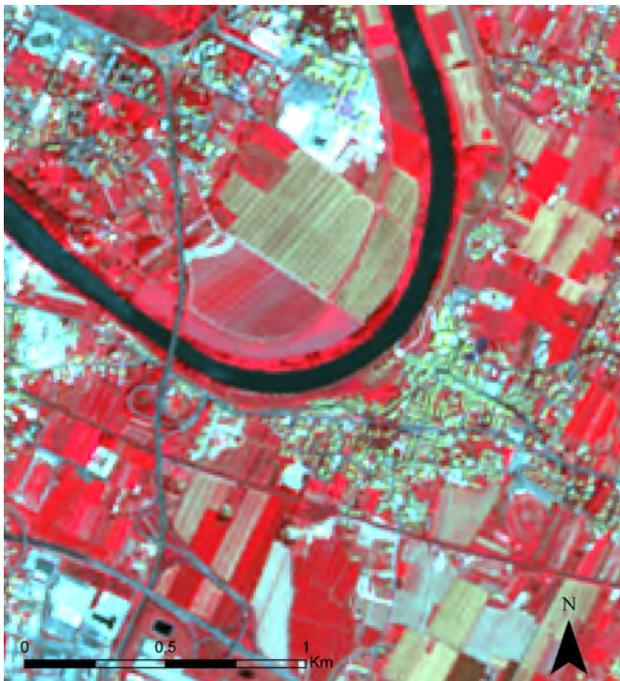


Figura 14. *Colour composite* 432 RGB dei dati ALOS AVNIR-2: area sudoccidentale di Pisa. Come nella composizione 321 RGB dello SPOT, la vegetazione appare in diverse tonalità di rosso, a seconda del tipo e dello stato di salute della vegetazione, a causa della sua riflettanza che, nell'infrarosso vicino, è superiore rispetto a quella delle altre superfici. I suoli nudi, le strade e gli edifici appaiono in diverse tonalità di blu, giallo o grigio, a seconda della loro composizione. In questo *composite*, le anomalie individuate nella risposta spettrale della vegetazione possono essere messe in relazione con un antico meandro dell'Arno, evidenziate nella figura a destra.

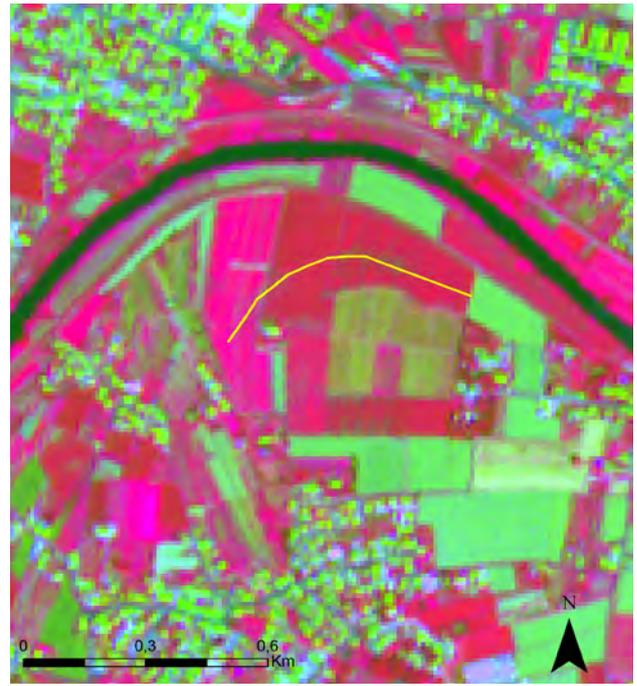


Figura 15. Elaborazione di *decorrelation stretching del composite* 432 RGB dei dati ALOS AVNIR-2 nell'area del Fiume Serchio. Questo tipo di elaborazione di immagine elimina l'alta correlazione che normalmente caratterizza i dati multispettrali, allo scopo di ottenere immagini con una gamma cromatica più ampia (GILLESPIE *et alii*, 1986). La visualizzazione con i colori enfatizzati facilita l'interpretazione delle forme. In questo caso è stata individuata un'anomalia simile in colture adiacenti pur presentando uno stadio vegetativo differente.



Figura 16. La banda dell'infrarosso vicino del sensore ALOS AVNIR-2 enfatizzata in destra idrografica del sistema deltizio del Fiume Arno (Parco di San Rossore, Cascine Nuove). E' visibile una linea sottile scura (evidenziata con una linea gialla nella figura a destra) che potrebbe identificare un paleomeandro dell'Arno.



Figura 17. *Colour composite* della PCA dei dati ALOS AVNIR-2. Questa immagine è il risultato della composizione delle prime tre componenti principali derivate dai dati AVNIR-2. Il processo di decorrelazione ha enfatizzato le differenze tra le risposte spettrali delle singole bande e il composite prodotto rende l'immagine molto più leggibile rispetto alla composizione di bande tradizionale. L'area rappresenta la porzione meridionale del Lago di Massaciuccoli e la trasformazione dell'immagine ha confermato la presenza (linee gialle) di paleocanali lungo la pineta litoranea, già evidenziati nell'immagine SPOT.

Durante le fasi di analisi e fotointerpretazione la ripresa ASTER di Maggio, rispetto a quella di Febbraio, ha comunque permesso di evidenziare un maggior numero di tracce, a causa della maggiore umidità presente nel suolo in quel periodo. La figura 18 mostra l'indice NDVI calcolato sulla scena ASTER di Maggio. L'NDVI (*Normalised Differential Vegetation Index*) è il più noto e diffuso indice vegetazionale (ROUSE *et alii*, 1974) usato nelle applicazioni di telerilevamento. Esso si calcola a partire dalla forte riflettività della vegetazione nell'infrarosso e dal suo elevato assorbimento nel rosso, e misura l'abbondanza e il vigore della vegetazione sulla superficie del suolo (TUCKER, 1979). Molti sono i fattori che influenzano i valori di NDVI, quali l'attività fotosintetica delle piante, la percentuale di copertura vegetale, la biomassa presente, l'umidità della vegetazione e del suolo, e le condizioni di stress delle piante. Pertanto è stato importante ai nostri fini interpretare le anomalie nei valori di questo indice (Fig. 18).

3. Risultati

L'analisi delle immagini satellitari ha reso possibile validare molte delle paleotracce identificate per mezzo della fotointerpretazione oltre che le principali zone umide rilevate attraverso l'analisi morfometrica nell'area di studio. La banda SWIR del satellite SPOT si è rivelata la più adatta al nostro scopo a causa della rilevante influenza che hanno su di essa l'umidità della vegetazione e dei suoli. Le morfologie derivate da questa analisi possono essere visualizzate nello Web-GIS di MAPPA (<http://mappaproject.arch.unipi.it>).

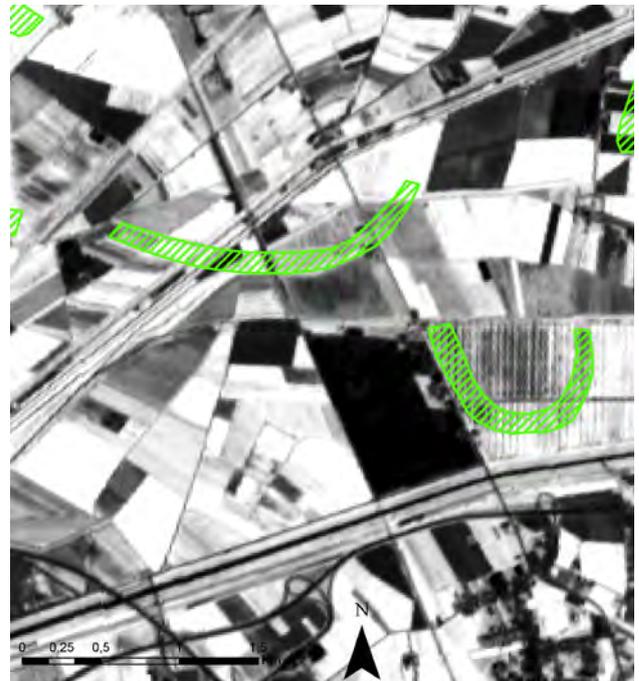
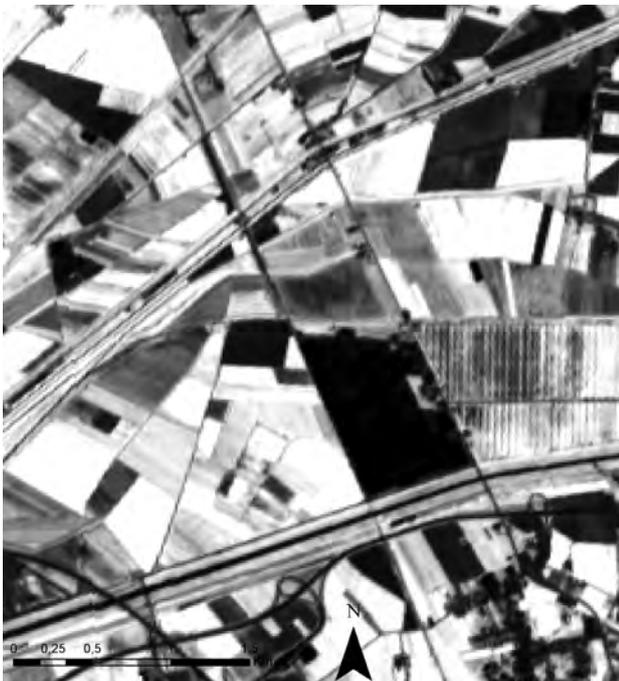


Figura 18. L'indice NDVI calcolato sui dati ASTER del Maggio 2005. Questo indice serve a distinguere le diverse condizioni vegetative delle colture.

Bibliografia

- ALTOBELLI A., SGAMBATI A., BADER F., FIOR G., MAGAJNA B., FERRAZZO L., BRAUT R., URRUTIA P., GANIS P., ORLANDO S. 2010, *Application of gvSIG's Remote Sensing Extension Forest Fire Monitoring*. *Geoinformatics*, 2010, issue 3: 44-47.
- BINI M., CAPITANI M., PAPPALARDO M., POCOBELLI G.F. 2011, *Vecchi e nuovi dati dalla fotointerpretazione aerea*, in ANICHINI F., FABIANI F., GATTIGLIA G., GUALANDI M.L. (a cura di), MAPPA. Metodologie Applicate alla Predittività del Potenziale Archeologico - Volume 1, pp. 131-156.
- GILLESPIE A. R., KAHLE A. B., WALKER R. E. 1986, *Color enhancement of highly correlated images. Decorrelation and HSI contrast stretches*. *Remote Sensing of Environment*, 20:209-235.
- LILLESAND T.M., KIEFFER R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. Publisher, 3rd Edition, 750 p.
- RICHARDS J.A. 1986, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag.
- ROUSE J. W., HAAS R. H., DEERING D. W., SEHELL J. A. 1974, *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation*. Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.
- TUCKER C. J. 1979, *Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation*. *Remote Sensing of the Environment*, 8:127-150.

Quest'opera è stata rilasciata con licenza Creative Commons Attribuzione 3.0 Unported. Per leggere una copia della licenza visita il sito web <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/> o spedisci una lettera a Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.

