

DAVIDE TRAVAGLINI (*) - GHERARDO CHIRICI (*)
PIERMARIA CORONA (**) - ANDREA LAMONACA (**)
MARCO MARCHETTI (***)

POTENZIALITÀ DELLE IMMAGINI TELERILEVATE SPOT 5 PER INVENTARI FORESTALI SU VASTA SCALA (1)

FDC 587.2 : 587.5

L'esigenza di una conoscenza sempre più approfondita del patrimonio forestale richiede il supporto di informazioni territoriali di elevato dettaglio. Per questo motivo, nei progetti operativi di tipo inventariale condotti in Italia il telerilevamento aereo è stato finora preferito a quello satellitare. I nuovi satelliti commerciali a risoluzione spaziale e spettrale alta o molto alta permettono oggi di superare tale limite e si propongono come una valida fonte di dati per la produzione di cartografie forestali a grande e media scala e per finalità di tipo inventariale. In questa prospettiva, il presente studio è incentrato sul confronto sperimentale tra il contenuto informativo derivabile tramite fotointerpretazione in ambiente GIS da immagini satellitari Spot 5 ad alta risoluzione e da ortofoto digitali in toni di grigio/8 bit. Sebbene la sperimentazione sia stata limitata a un campione relativamente ridotto di fotopunti in provincia di Roma, i risultati ottenuti evidenziano in modo significativo la potenziale efficienza delle immagini Spot 5 per applicazioni in inventari forestali su vasta scala.

INTRODUZIONE

Il ricorso a tecniche di telerilevamento in ambito inventariale e cartografico forestale è pratica ampiamente sperimentata nel nostro Paese. La

(*) geoLAB – Laboratorio di Geomatica, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Ambientali Forestali, Università di Firenze. Via S. Bonaventura, 13 – 50145, Firenze. Tel.: +39-055-30231221, Fax: +39-055-319179. e-mail: davide.travaglini@unifi.it

(**) sisFOR – Laboratorio di Inventari Forestali e Sistemi Informativi, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse, Università della Tuscia. Via S. Camillo de Lellis – 01100, Viterbo. Tel.: +39-0761-357405, Fax: +39-0761-357389. e-mail: alamo.sisfor@unitus.it

(***) Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università del Molise. Via Mazzini, 8 – 86170, Isernia. Tel.: +39-0865-478978, Fax: +39-0865-411283. e-mail: marchetti-marco@unimol.it

¹ Lavoro realizzato dagli Autori in parti uguali nell'ambito del progetto MIPAF-Riservitalia, 4.1.4., U.O. DISAFRI - Università della Tuscia (responsabile: P. Corona).

scelta del tipo di dato più idoneo per tali applicazioni è condizionata essenzialmente dalla scala di riferimento e, soprattutto, dalla definizione di bosco che viene adottata.

Le immagini da aereo (foto pancromatiche, a colori, iperspettrali) sono da tempo una preziosa fonte di dati a supporto della pianificazione forestale (PRETO, 1984; MARCHETTI, 1990; AMBROSINI *et al.*, 1994; CASTAGNOLI *et al.*, 1997). Nel nostro Paese, esse sono state impiegate nella gran parte di inventari forestali regionali per distinguere i punti bosco (CORONA e AMBROSINI, 1995; TOSI e MARCHETTI, 1998; BIANCHI *et al.*, 1999) o nella cartografia tematica per la classificazione delle fisionomie forestali, e ultimamente anche della tipologia forestale (a esempio, CORONA *et al.*, 1999).

In particolare, negli ultimi anni, a seguito della diffusione dei sistemi informativi geografici (GIS) e grazie alla crescente disponibilità del dato, hanno trovato sempre più ampio impiego le ortofoto digitali in bianco e nero e a colori in scala nominale 1:10000: dai controlli in agricoltura (BARTOLETTI e CASTAGNOLI, 1997) alla realizzazione di cartografie di dettaglio d'interesse forestale (MARCHETTI e CASTAGNOLI, 1989). A tale riguardo, CHIRICI *et al.* (2002a) segnalano un'esperienza condotta in Abruzzo su oltre 230000 ha dove le ortofoto sono state utilizzate per l'interpretazione a video dei boschi e delle altre aree forestali, sulla base della definizione di bosco della FAO *Forest Resource Assessment 2000* (FRA2000). Applicazioni in ambito inventariale, spesso integrate all'uso di foto aeree in stereoscopia, sono state realizzate in vari Paesi europei (CORONA e TABACCHI, 2001).

I principali vantaggi offerti dalle ortofoto digitali sono l'elevata risoluzione geometrica (pixel di 1 m x 1 m), la possibilità di migliorare la qualità dell'immagine attraverso la variazione del contrasto e della luminosità e la possibilità di essere direttamente implementate in ambiente GIS: quest'ultimo fattore permette, tra l'altro, la visione in continuo del territorio in esame, l'integrazione con altri dati geografici e rende possibile la creazione di banche dati georeferenziate facilmente aggiornabili. Viceversa, rispetto alle più comuni foto aeree, le ortofoto digitali non consentono la visione stereoscopica, a meno di lunghe e costose operazioni, e possono presentare deformazioni dell'immagine a seguito del processo di ortorettifica. I vantaggi citati consentono tuttavia una semplificazione dell'attività fotointerpretativa, motivo per cui recentemente l'uso di ortofoto digitali è stato adottato per la classificazione della categoria tipologica inventariale di prima fase dell'Inventario Nazionale italiano delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC).

Al contempo, soprattutto a partire dagli anni '90 si sono avuti notevoli sviluppi anche nel settore del telerilevamento satellitare, con l'avvento delle prime missioni interamente commerciali che hanno reso disponibili sul

mercato prodotti acquisiti con sensori ottici dotati di risoluzione spaziale alta o molto alta e risoluzione spettrale relativamente alta (MARCHETTI *et al.*, 1988; BARBATI *et al.*, 1999; CORONA e FERRARA, 1999; CARTOGRAPHICA, 2003). Rispetto alle comprovate capacità sinottiche e sincroniche del dato spaziale tradizionale, largamente impiegato con successo nei progetti a piccola scala (MARCHETTI *et al.*, 2000), i nuovi satelliti Ikonos, QuickBird e Spot 5 inviano a terra immagini capaci di fornire informazioni territoriali di dettaglio, e pertanto di interesse per il settore forestale, con particolare riferimento alla produzione di cartografie tematiche a grande e media scala e per finalità di tipo inventariale (CHIRICI *et al.*, 2001; CHIRICI *et al.*, 2003).

In questa prospettiva, il lavoro qui presentato mostra i risultati di un confronto tra il contenuto informativo offerto da immagini satellitari Spot 5 ad alta risoluzione spaziale e quello derivabile da ortofoto digitali in toni di grigio/8 bit, attraverso la fotointerpretazione in ambiente GIS di un campione di fotopunti distribuiti su un'area estesa circa 15000 ha in provincia di Roma. L'attenzione è stata focalizzata sulle immagini Spot 5 in quanto allo stato attuale costituiscono, tra i dati satellitari a risoluzione alta e molto alta, la migliore alternativa alle ortofoto digitali, in termini di rapporto qualità/prezzo (Tabella 1).

MATERIALI E METODI

Area di studio

L'area oggetto della presente sperimentazione (Figura 1) è stata selezionata in modo tale da includere in percentuale simile sia superfici a uso agricolo, sia superfici a copertura forestale (Tabella 2).

L'altitudine media della zona inventariata è di 560 m s.l.m., con quote che si distribuiscono da un minimo di 80 m s.l.m. a un massimo di 1360 m s.l.m.. Fra le colture agrarie gli oliveti sono i più diffusi, occupando una superficie pari al 26% di quella esaminata; il rimanente 14% è caratterizzato da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti (7%), seminativi (3%), sistemi colturali e particellari complessi (3%), frutteti (1%). Fra le superfici a copertura forestale prevalgono i boschi di querce caducifoglie (22%), i soprassuoli di leccio e sughera (12%), i boschi di faggio (11%). Praterie (8%), brughiere e cespuglieti (4%), e boschi di castagno (1%) sono altresì presenti.

Immagini acquisite

Il materiale impiegato per l'implementazione dell'analisi comparata consiste di una scena Spot 5 in modalità *supermode*, acquisita il

Tabella 1 – Confronto tra i prezzi di acquisto di immagini telerilevate ad alta risoluzione. I valori sono stati ottenuti consultando i siti web di produttori delle immagini e di distributori autorizzati. Considerate le periodiche fluttuazioni dei prezzi e la difficoltà di rendere omogenei e confrontabili le informazioni a causa di differenti politiche di vendita, le cifre presentate devono essere intese come puramente indicative. Inoltre, i prezzi dei prodotti satellitari non tengono in considerazione i costi di ortorettifica delle immagini, operazione necessaria per ottenere una accuratezza nella localizzazione del dato paragonabile a quella delle ortofoto digitali.

– *Comparison between prices of different high resolution remotely sensed images. Values have been obtained by web sites of image providers and authorized sellers. Taking into account the price fluctuations and the difficulties to make homogeneous comparisons because of the different marketing strategies by the various providers/sellers, the reported prices must be taken as indicative.*

Tipo di prodotto	QuickBird		Ikonos		Spot 5		Ortofoto	
	US\$/km ²	Pixel (m)	US\$/km ²	Pixel (m)	Euro/km ²	Pixel (m)	Euro/km ²	Pixel (m)
Pancromatico (nuova acquisizione)	22,50 ¹	0,7	28,00 ³	1	1,72 ⁵	2,5		
Multispettrale (nuova acquisizione)	25,00 ¹	2,8	28,00 ³	4	0,97 ⁶	10		
Pancromatico (dato di archivio)	22,50 ²	0,7	20,00 ⁴	1	1,50 ⁵	2,5	0,52 ⁷	1
Multispettrale (dato di archivio)	25,00 ²	2,8	20,00 ⁴	4	0,75 ⁶	10		

¹ Prodotto STANDARD, acquisizione minima 64 km², correzione radiometrica e geometrica (disponibile anche il «*Bundle products*»), che consiste in un unico ordine per la fornitura del dato pancromatico e multispettrale della stessa aerea, acquisiti alla medesima data, al prezzo di 30 US\$/km²).

² Prodotto STANDARD, acquisizione minima 25 km² (ulteriore sconto del 20% se l'immagine richiesta è stata acquisita almeno 2 mesi prima dell'ordine di acquisto), correzione radiometrica e geometrica (disponibile anche il «*Bundle products*»), che consiste in un unico ordine per la fornitura del dato pancromatico e multispettrale della stessa aerea, acquisiti alla medesima data, al prezzo di 30 US\$/km²).

³ Prodotto GEO, acquisizione minima 100 km², *Map oriented* (disponibile anche il «*Bundle products*»), che consiste in un unico ordine per la fornitura del dato pancromatico e multispettrale della stessa aerea, acquisiti alla medesima data, al prezzo di 32 US\$/km²).

⁴ Prodotto GEO, acquisizione minima 80 km², *Map oriented*, è considerata di archivio una immagine acquisita 4 mesi prima della data di ordine (disponibile anche il «*Bundle products*»), che consiste in un unico ordine per la fornitura del dato pancromatico e multispettrale della stessa aerea, acquisiti alla medesima data, al prezzo di 22 US\$/km²).

⁵ Prodotto STANDARD in modalità *supermode, full scene*: 60 km x 60 km, livello 1A (correzione radiometrica, accuratezza nella localizzazione dell'immagine inferiore a 50 m), 1B (correzione geometrica e radiometrica, accuratezza nella localizzazione dell'immagine inferiore a 50 m), livello 2A (correzione radiometrica e geometrica, fornito nel sistema di riferimento cartografico UTM WGS84, accuratezza nella localizzazione dell'immagine inferiore a 50 m).

⁶ Prodotto STANDARD, *full scene*: 60 km x 60 km, livello 1A (correzione radiometrica, accuratezza nella localizzazione dell'immagine inferiore a 50 m), 1B (correzione geometrica e radiometrica, accuratezza nella localizzazione dell'immagine inferiore a 50 m), livello 2A (correzione radiometrica e geometrica, fornito nel sistema di riferimento cartografico UTM WGS84, accuratezza nella localizzazione dell'immagine inferiore a 50 m).

⁷ Prodotto fornito in toni di grigio/8bit (risoluzione 1 m), superficie media considerata 45 km².

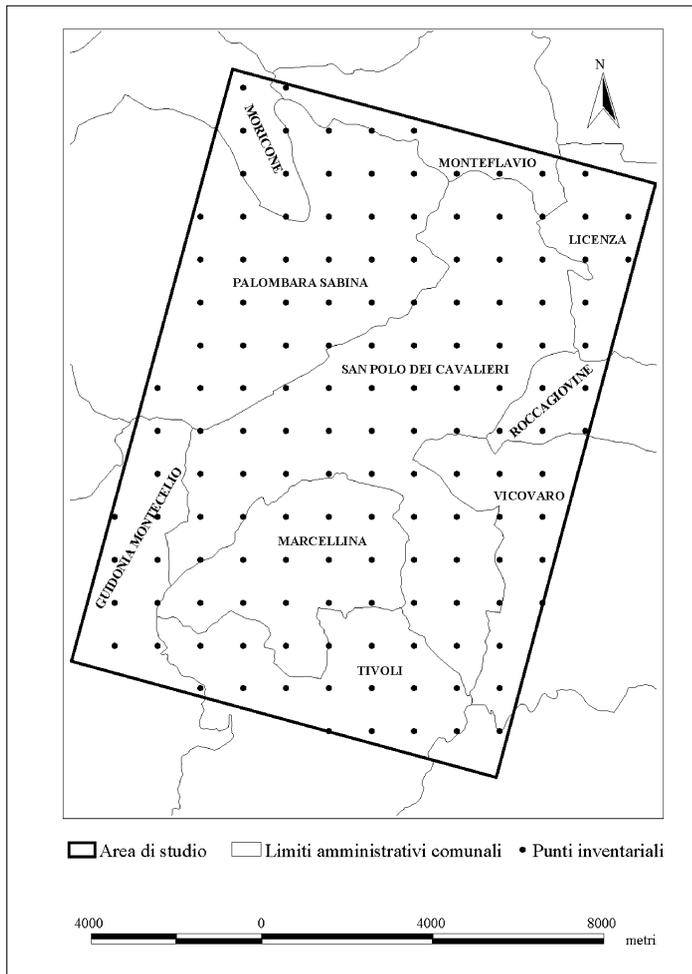


Figura 1 – Localizzazione dell'area di studio in provincia di Roma e dislocazione geografica dei punti inventariati.

– Overall study area (Central Italy, near Rome) and localization of the sampling points.

21/07/2002, e di alcune ortofoto digitali in bianco e nero datate 2001. La sopra citata copertura satellitare è stata gentilmente concessa da Eurimage S.p.a., esclusivamente per le finalità perseguite da questo studio.

Il satellite Spot 5 fa parte della serie Spot concepita fin dalla sua origine a risoluzioni spaziali più spinte della media degli altri satelliti per l'osservazione della Terra e che ha portato a utilizzazioni di buon dettaglio geometrico nella cartografia di copertura del suolo (vd., a esempio, carta ISTAT d'uso del suolo del 1991) e agli inventari agricoli su target complessi (MARCHETTI *et al.*,

Tabella 2 – Ripartizione territoriale nelle principali categorie di uso e copertura del suolo nell'area di studio, ottenuta per riclassificazione del database geografico Corine Land Cover (CHIRICI *et al.*, 2002b).

– Major land cover/land use classes in the study area, as assessed by re-classification of Corine Land Cover database (CHIRICI *et al.*, 2002b).

Classi di uso e copertura del suolo	Estensione	
	ha	%
Superfici artificiali	248,3	1,7
Superfici agricole	5931,3	40,3
Superfici boscate e ambienti seminaturali	8548,0	58,0
Totale	14727,6	100,0

1988; CUMER *et al.*, 1988). Spot 5 è operativo da luglio 2002 con risoluzione geometrica pari a 5 m nel pancromatico (2,5 m nella modalità *supermode*) e 10 m nel multispettrale. La risoluzione della banda 4 è in realtà di 20 m, ma viene fornita ricampionata a 10 m. La banda pancromatica campiona nella lunghezza d'onda del visibile (0,51-0,73 μm), mentre le quattro bande multispettrali campionano nel verde (banda 1: 0,50-0,59 μm), rosso (banda 2: 0,61-0,68 μm), vicino infrarosso (banda 3: 0,79-0,89 μm) e infrarosso a onde corte (banda 4: 1,58-1,75 μm). Sia la banda pancromatica, sia le bande multispettrali sono caratterizzate da una profondità del dato a 8 bit. Una scena satellitare completa (*full scene*) copre una superficie minima di 3600 km², ma è tuttora possibile acquistare porzioni corrispondenti a 1/2, 1/4 o 1/8 di scena.

Le ortofoto digitali pancromatiche in toni di grigio e a colori sono dotate di una risoluzione geometrica a terra di 1 m e sono ottimamente visualizzabili alla scala nominale di 1:10000. Il taglio geografico della copertura territoriale delle ortofoto digitali coincide con quello delle Carte Tecniche Regionali, scala 1:10000, in media pari a 45 km².

Pre-elaborazione delle immagini

Dalla scena pancromatica del satellite Spot 5 è stata estratta la porzione di immagine corrispondente all'area d'indagine e si è proceduto alla sua correzione geometrica acquisendo i Ground Control Points (GCPs) direttamente dalle ortofoto digitali proiettate nel sistema di riferimento UTM33N, European Datum 1950. In una prima fase è stata tentata l'ortocorrezione del dato pancromatico, impiegando oltre 400 GCPs. L'esito è stato però insoddisfacente a causa della bassa risoluzione del modello digitale del terreno a disposizione (pixel di 75 m). Sulla base di precedenti esperienze, gli stessi GCPs sono stati applicati ad un algoritmo di *Thin Plate Spline* (ORTHOENGINE, 2001) che ha invece fornito buoni risultati. Lo

stesso algoritmo è stato impiegato per la correzione geometrica dei dati multispettrali, utilizzando oltre 400 GCPs individuati sulla banda pancromatica georeferenziata.

Mediante una trasformazione RGB-HLS-RGB, la banda pancromatica è stata fusa con un falso colore derivante dalla combinazione dei dati multispettrali (RGB:321), in modo da disporre in fase di fotointerpretazione di una immagine a colori a 24 bit con risoluzione geometrica di 2,5 m.

Campione inventariale e sistema di classificazione

Al fine di valutare il differente contributo informativo derivabile per fotointerpretazione dai due tipi di dato telerilevato, è stato simulato un contesto inventariale sovrapponendo all'area di studio un grigliato a maglia quadrata con passo di un chilometro e procedendo alla classificazione in ambiente GIS dei fotopunti ricadenti sui nodi del reticolato. Complessivamente sono stati esaminati 146 punti inventariali. La maglia di campionamento è stata realizzata individuando all'interno della zona d'indagine un primo punto di coordinate x,y estratte casualmente e costruendo attorno a esso una maglia sistematica con orientamento casuale (Figura 1).

La fotointerpretazione è stata eseguita facendo riferimento alle classi e sottoclassi di uso e copertura del suolo proposte per la prima fase di INFC (Tabella 3).

Nel sistema di classificazione adottato, che al primo livello gerarchico distingue cinque grandi classi di uso e copertura del suolo riprese dal sistema Corine Land Cover (CLC) (DE ANGELIS *et al.*, 1992) e parzialmente modificate², le definizioni di «bosco» e di «altre terre boscate» corrispondono a quelle utilizzate nell'ambito del FAO *Forest Resource Assessment* del 2000 (FRA2000): (i) territorio con copertura arborea maggiore del 10% su una superficie minima di 0,5 ha e larghezza superiore a 20 m, con alberi che a maturità raggiungono un'altezza minima di 5 m; (ii) territorio con copertura arborea compresa tra il 5% e il 10% di alberi che a maturità raggiungono un'altezza minima di 5 m oppure con una copertura maggiore del 10% costituita da specie arboree che a maturità non raggiungono l'altezza minima di 5 m, o da arbusti e cespugli.

A eccezione dell'attributo «altezza», la cui valutazione non è possibile né da ortofoto digitali né da immagini satellitari ad alta risoluzione (si

² Castagneti da frutto e altre formazioni forestali a prevalente produzione di frutti non sono inclusi nella classe «2 - Superfici agricole», come prevede il sistema di classificazione CLC, ma nella classe «3 - Superfici boscate ed ambienti seminaturali»; la classe «2 - Superfici agricole» comprende la sottoclasse «2.1 - Impianti di arboricoltura da legno», che non compare nel sistema CLC (Mipaf/Isafa/Cfs, 2003).

Tabella 3 – Classi e sottoclassi di uso e copertura del suolo e tipi di incluso di interesse inventariale adottati in fase di fotointerpretazione (MIPAF/ISAF/CFS, 2003).

– *Land use/land cover classes adopted for the photointerpretation.*

<i>Codice</i>	<i>Classe e sottoclasse</i>
1	Superfici artificiali
1.1	Parchi urbani
1.2	Altre superfici artificiali
2	Superfici agricole
2.1	Impianti di arboricoltura da legno
2.2	Altre superfici agricole
3	Superfici boscate e ambienti seminaturali
3.1	Aree boscate
3.1.a	Formazioni forestali
3.1.b	Formazioni forestali rade
3.1.c	Aree temporaneamente prive di soprassuolo
3.2	Praterie, pascoli, incolti
3.3	Aree con vegetazione rada o assente
4	Zone umide
5	Acque
<i>Codice</i>	<i>Tipo di incluso</i>
1	Non è un incluso o non è un incluso di interesse inventariale
2	Incluso di superfici artificiali
3	Incluso di superfici agricole
4	Incluso di aree temporaneamente prive di soprassuolo
5	Incluso di praterie, pascoli e incolti
6	Incluso di zone aperte con vegetazione rada o assente
7	Incluso di zone umide
8	Incluso di acque
9	Boschetto incluso nel non bosco
10	Formazione forestale lineare inclusa nel non bosco

segnala tuttavia la possibilità di acquisire stereocoppie di immagini Spot 5 per una visualizzazione 3D del territorio), i requisiti necessari per l'individuazione delle aree a bosco secondo la classificazione FRA2000 non presentano particolari difficoltà di riconoscimento tramite fotointerpretazione a video degli aerofotogrammi digitali (CHIRICI *et al.*, 2002a). Per questo motivo, l'esito della fotointerpretazione operata sulle ortofoto digitali è stato considerato come verità rispetto alla quale confrontare i risultati derivanti dalla fotointerpretazione del dato satellitare.

Per maggiore chiarezza, viene di seguito fornita una breve descrizione dei principali caratteri distintivi delle sottoclassi di cui alla Tabella 3, ai quali è stato fatto riferimento in fase di fotointerpretazione. Per la sottoclasse «3.1 - Aree boscate», valgono le definizioni di «bosco» e «altre terre boscate» precedentemente citate:

3.1.a - Formazioni forestali: territorio con copertura arborea o arbustiva

superiore al 10%, superficie minima superiore a 0,5 ha, larghezza maggiore di 20 m;

3.1.b - *Formazioni forestali rade*: territorio con copertura arborea o arbustiva compresa tra il 5% e il 10%, superficie minima superiore a 0,5 ha, larghezza maggiore di 20 m;

3.1.c - *Aree temporaneamente prive di soprassuolo*: territorio con copertura arborea o arbustiva inferiore al 10% per cause naturali o artificiali, superficie minima superiore a 0,5 ha, larghezza maggiore di 20 m;

3.2 - *Praterie, pascoli e incolti*: territorio con copertura arborea o arbustiva inferiore al 5% e copertura erbacea spontanea superiore al 40%;

3.3 - *Aree con vegetazione rada o assente*: territorio con copertura arborea o arbustiva inferiore al 5% e copertura erbacea spontanea inferiore al 40%.

Modalità di fotointerpretazione

L'attribuzione delle singole unità inventariali a una delle classi di uso e copertura del suolo previste dal sistema di classificazione adottato è stata eseguita secondo la procedura proposta per la prima fase dell'INFC (MIPAF/ISAFA/CFS, 2003):

- a) individuazione del punto inventariale;
- b) analisi del contesto territoriale circostante il punto inventariale;
- c) individuazione del poligono a uso e copertura del suolo omogeneo all'interno del quale ricade il punto inventariale;
 - c1) verifica del requisito di superficie minima pari a 0,5 ha;
 - c2) verifica del requisito di larghezza minima pari a 20 m;
- d) soddisfatte le condizioni c1 e c2, il punto inventariale viene attribuito alla classe di uso e copertura del suolo le cui caratteristiche coincidono con quelle del poligono all'interno del quale ricade il punto in esame; se l'unità inventariale compete alla classe «3 – *Superfici boscate e ambienti seminaturali*», l'appartenenza a una delle sottoclassi viene determinata valutando il grado di copertura arboreo-arbustiva o erbacea.
- e) nel caso in cui una delle condizioni di cui al punto c1 e c2 non risulta rispettata, il punto inventariale viene attribuito alla classe di uso e copertura del suolo le cui caratteristiche coincidono con quella del poligono più prossimo al punto in esame, capace di soddisfare i requisiti c1 e c2; si segnala la presenza di un incluso di interesse inventariale se la porzione omogenea di territorio sulla quale ricade il punto campione soddisfa una delle seguenti condizioni: (i) estensione compresa tra 500 m² e 5000 m², larghezza maggiore di 20 m, attribuibile a uno degli inclusi indicati in Tabella 3; (ii) larghezza compresa tra 3 m e 20 m, lunghezza maggiore di 20 m, attribuibile a uno degli inclusi indicati in Tabella 3.

Per facilitare l'attività del fotointerprete nel processo di verifica del

requisito di superficie minima, attorno a ciascun punto di rilevamento è stato tracciato un *buffer* di 0,5 ha. Nel caso in cui più classi di uso/copertura del suolo ricadevano all'interno di tale *buffer* e la stima a vista dell'estensione del poligono contenente il fotopunto risultava dubbia, si è proceduto alla digitalizzazione del perimetro del poligono in modo da poterne determinare l'esatta superficie.

Anche la stima della percentuale di copertura per le classi forestali è stata eseguita prevalentemente a vista e solo nei casi dubbi, cioè quelli più prossimi alle soglie minime del 5% e del 10%, è stata valutata a video con il supporto di un apposito reticolo.

La procedura adottata ha previsto la fotointerpretazione separata dei due dati telerilevati, iniziando da quello satellitare per il quale la classificazione dei fotopunti è stata eseguita sfruttando sia la banda pancromatica, sia un'immagine all'infrarosso falso colore fusa con il canale pancromatico tramite trasformazione RGB-HLS-RGB. Si è così potuto disporre di un dato a colori ad alta risoluzione a supporto dell'attività fotointerpretativa, nel tentativo di semplificare la discriminazione delle differenti classi inventariali (HOWARD, 1991). La scelta di utilizzare nella fotointerpretazione del dato Spot 5 un'immagine a colori a 24 bit e una in toni di grigio a 8 bit, alla medesima risoluzione di 2,5 m, deriva dalla inevitabile presenza di fenomeni di saturazione nel dato in falso colore, generati dalla differente risoluzione geometrica originaria tra il canale pancromatico e quello multi-spettrale.

Alcuni esempi di confronto tra ortofoto digitali e immagini Spot 5 sono mostrati in Figura 2.

L'aver proceduto dapprima alla fotointerpretazione del dato satellitare e solo successivamente a quella del dato telerilevato da aereo ha permesso di evitare che il fotointerprete fosse in qualche modo condizionato, in fase di classificazione su Spot 5, da una precedente visione dei fotopunti sulle ortofoto digitali.

La fotointerpretazione è stata effettuata da un unico operatore per garantire l'omogeneità di valutazione nei casi di attribuzione dubbia.

RISULTATI

Il confronto dei risultati della fotointerpretazione della copertura Spot 5, eseguita secondo le modalità precedentemente descritte, rispetto a quelli delle ortofoto digitali in bianco e nero è riportato in Tabella 4. Su un campione di 146 fotopunti inventariali, 143 sono stati attribuiti alle medesime classi di uso e copertura del suolo: solamente per 3 fotopunti, pari al 2%

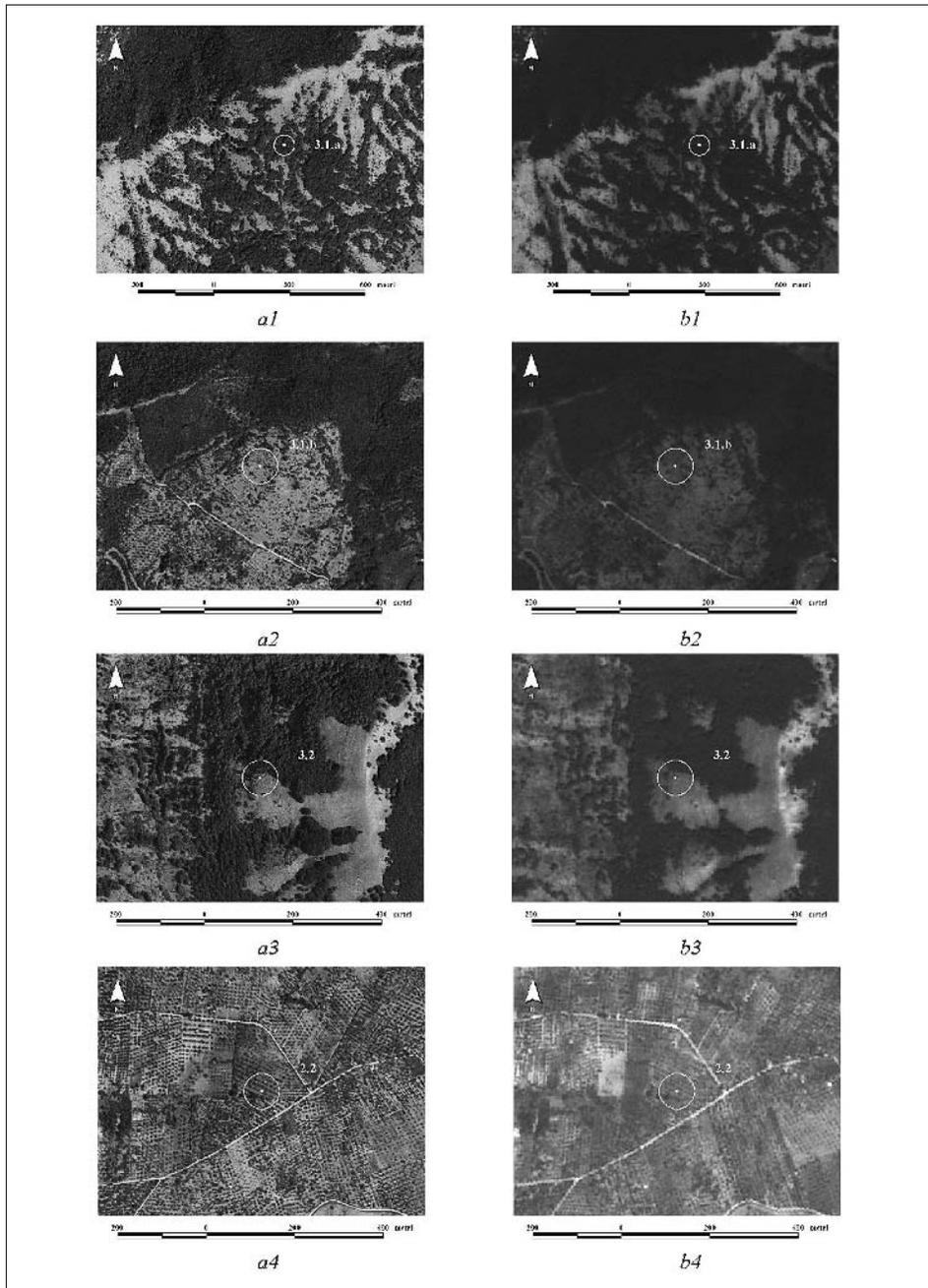


Figura 2 – Esempi di confronto tra ortofoto digitale in bianco e nero (*a*, *pixel* di 1 m) e banda pancromatica Spot 5 in modalità *supermode* (*b*, *pixel* di 2,5 m) di alcune classi *target* previste dal sistema di nomenclatura adottato. Attorno a ciascun punto inventariale è evidenziato in bianco un *buffer* di 0,5 ha e il codice di uso e copertura del suolo associato al punto campione.

– Comparison between digital black and white orthophotos (*a*, 1 meter of resolution) and Spot 5 panchromatic channel images (*b*, 2,5 meters of resolution). A 0,5-ha-wide buffer (white circle) and the classification label of the sampling points are shown.

Tabella 4 – Risultato della fotointerpretazione a video dei 146 punti inventariati.
– Results of the on-screen photointerpretation of 146 sampling points.

<i>Codice classe</i>	<i>Numero di punti classificati su ortofoto digitale</i>	<i>Numero di punti classificati su Spot 5</i>
1.1	0	0
1.2	7	7
2.1	0	0
2.2	41	39
3.1.a	86	85
3.1.b	5	5
3.1.c	0	0
3.2	6	9
3.3	1	1
4	0	0
5	0	0
Totale	146	146

<i>Codice incluso</i>	<i>Numero di punti classificati su ortofoto digitale</i>	<i>Numero di punti classificati su Spot 5</i>
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	1	1
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	2	2
10	0	0

del campione analizzato, si è avuta un'attribuzione discordante tra la classificazione operata sulle ortofoto digitali e quella prodotta dalla fotointerpretazione del dato Spot 5. La discordanza complessiva tra le attribuzioni prodotte per le 11 classi considerate non è statisticamente significativa (*Kolmogorov-Smirnov two sample test*, $d = 0.454$; $P = 0.21$). Inoltre, nessuna discordanza è stata riscontrata per l'identificazione degli inclusi inventariati. Il valore di KIA (*Kappa Index of Agreement*, vd. CONGALTON, 1991) derivante dal confronto dei risultati ottenuti è pari a 0,96.

In Tabella 5 viene mostrato in dettaglio l'esito della fotointerpretazione operata sulle ortofoto digitali e sulle immagini Spot 5 per i tre punti «erroneamente» classificati.

Limitando l'analisi alle categorie di uso e copertura del suolo riscontrate in fase di fotointerpretazione, si osserva che:

Tabella 5 – Fotopunti classificati in modo differente sulle immagini Spot 5 rispetto alle ortofoto digitali.
 – *Sampling points discordantly photointerpreted by Spot 5 images with respect to digital black and white orthophotos.*

<u>Codice punto</u>	<u>Classificazione su ortofoto digitale</u>	<u>Classificazione su Spot 5</u>
109	2.2	3.2
198	2.2	3.2
201	3.1.a	3.2

- sia il dato telerilevato da aereo, sia quello satellitare hanno mostrato un sufficiente dettaglio per il riconoscimento delle categorie target oggetto di studio; l'implementazione in ambiente GIS della attività fotointerpretativa ha facilitato notevolmente la possibilità di discriminare differenti gradi di copertura dei soprassuoli boschivi e la verifica dei requisiti dimensionali mediante il ricorso a strumenti di *editing* geografico;
- la maggiore risoluzione delle ortofoto digitali si è rivelata utile per discriminare poligoni con presenza di coltivazioni agrarie arboree (a esempio, frutteti) o impianti di arboricoltura da legno di probabile recente impianto, caratterizzati da chiome di limitata estensione, più difficilmente riconoscibili sulle immagini Spot 5; si segnala, tuttavia, la difficoltà riscontrata sia sulle ortofoto digitali, sia sulle immagini satellitari, nel discriminare correttamente tra impianti di arboricoltura da legno e coltivazioni agrarie arboree: in questi casi, assume particolare importanza la conoscenza del fotointerprete delle realtà locali del territorio in esame;
- la distinzione oggettiva tra la sottoclasse «3.2 – *Praterie, pascoli e incolti*» e «3.3 – *Aree con vegetazione rada o assente*» presenta un certo grado di difficoltà, poiché l'unico parametro che le differenzia è la percentuale di copertura erbacea: maggiore del 40% la prima, minore del 40% la seconda; tale difficoltà, si è dimostrata maggiore per le ortofoto digitali in bianco e nero rispetto alle immagini Spot 5, per le quali l'impiego del falso colore può essere di supporto per il riconoscimento e la stima del grado di copertura erbacea;
- in particolari contesti, soprattutto se caratterizzati da elevata frammentazione del mosaico territoriale e in presenza di colture foraggere temporanee in rotazione o di prati stabili sottoposti a sfalcio misti a superfici agricole in abbandono culturale³, è possibile confondere la sottoclasse «2.2 – *Altre superfici agricole*» con la sottoclasse «3.2 – *Praterie, pascoli*

³ Secondo il sistema di classificazione adottato, colture foraggere temporanee in rotazione e prati stabili sottoposti a sfalcio appartengono alla sottoclasse 2.2, mentre le superfici agricole in abbandono culturale alla sottoclasse 3.2.

e incolti», indipendentemente dall'immagine utilizzata per l'osservazione del punto (ortofoto digitale o dato satellitare).

CONCLUSIONI

I risultati di questa prima sperimentazione confermano le potenzialità del telerilevamento satellitare ad alta risoluzione per applicazioni di tipo inventariale su vasta scala.

Sulla base del sistema di classificazione adottato, *le differenze riscontrate tra la fotointerpretazione sulle ortofoto digitali e quella sulle immagini Spot 5 sono risultate statisticamente non significative.* I risultati ottenuti vanno tuttavia intesi come indicazione di massima, poiché avendo esaminato un numero relativamente ridotto di fotopunti non è escluso che estendendo la sperimentazione a diverse e più vaste realtà territoriali nel nostro Paese si possa giungere a conclusioni differenti.

A seguito della pur limitata esperienza condotta, si conclude che:

- le immagini satellitari Spot 5 in modalità *supermode* (pixel di 2,5 m x 2,5 m nel canale pancromatico), benchè dotate di minore risoluzione geometrica rispetto alle ortofoto digitali, rendono ugualmente possibile la distinzione di classi e sottoclassi inventariali del tipo di quelle adottate in prima fase da INFC;
- allo stato attuale, considerato il rapporto costi/benefici, le ortofoto digitali in bianco e nero o a colori sono un'adeguata soluzione per applicazioni nelle prime fasi di inventari forestali a scala regionale o nazionale e le immagini Spot 5 sono quelle che, tra i dati satellitari ad alta e altissima risoluzione, ne costituiscono una valida alternativa laddove le prime dovessero non essere disponibili, garantendo così la possibilità d'impiego di dati aggiornati ed escludendo il ricorso a voli aerei *ad hoc*, di probabile maggior costo operativo.

RINGRAZIAMENTI

Ai fini della realizzazione dello studio, un particolare ringraziamento va a G. Tabacchi (Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e l'Alpicoltura, Trento), per le informazioni in merito alla legenda proposta per INFC, e a L. Rossi (Eurimage S.p.A., Roma) per avere messo a disposizione la copertura satellitare Spot 5.

SUMMARY

Potential of Spot 5 imagery for forest inventory

The current needs of an in-depth knowledge about forest ecosystems requires the support of very detailed information. That is why up to now air-born imagery has been preferred to satellite imagery for forest inventory applications, at least in Italy. The new satellite sensors with high or very high spatial resolution and quite high spectral resolution allow to overcome such a limit and can be considered as suitable data for forest mapping at high and medium scales as well as inventory supports. In such a view, this paper shows the results of an experimental comparison between sampling point photointerpretation by Spot 5 images and by digital orthophotos (grey scale/8 bit), over a 15000-ha-wide study area in Central Italy. Albeit a more enlarged testing is needed for definitive conclusions, the obtained results already prove the significative efficiency of Spot 5 high resolution images for forest inventory application.

BIBLIOGRAFIA

- AMBROSINI I., BUFFONI A., GHERARDI L., VITI M. L., 1994 – *Valutazione del contenuto informativo a fini forestali di riprese aeree bianco/nero realizzate ad uso topografico*. L'Italia Forestale e Montana, 3: 241-254.
- BARBATI A., CORONA P., DE NATALE F., TOSI V., MARCHETTI M., 2000 – *Forest remote sensing in Italy in the framework of FRA2000*. In: Zawila-Niedzwiecki T., Brach M. (a cura di), Remote sensing and forest monitoring, EUR 19530, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg: 284-299.
- BARTOLETTI M., CASTAGNOLI A., 1997 – *L'Italia vista dall'AIMA. Una realizzazione a servizio del Paese*. Compagnia Generale delle Riprese Aeree, Parma.
- BIANCHI M., CORONA P., MARCHETTI M., 1999 – *Gli inventari e il controllo dei sistemi forestali italiani*. In: Magni M., Giordano E., Di Girolamo C. (a cura di), Atti, Secondo Congresso Nazionale di Selvicoltura, Consulta Nazionale per le Foreste e il Legno, Direzione Generale per le Risorse Forestali, Montane e Idriche, Accademia Italiana di Scienze Forestali: 219-239.
- CARTOGRAPHICA, 2003 – *Quattro satelliti a confronto*. Cartographica, il notiziario dei dati geografici, MondoGIS (supplemento), 33: 3-7.
- CASTAGNOLI A., MARCHETTI M., BOTTAI L., CHIRICI G., ORADINI A., 1997 – *Uso del sensore iperspettrale MIVIS per la realizzazione di cartografia forestale a media e grande scala*. Genio Rurale, 9: 54-6.
- CHIRICI G., CORONA P., DELLISANTI R., DI GIOVINE M., MARCHETTI M., ROSSINI P., TRAVAGLINI D., 2001 – *Confronto e integrazione di dati telerilevati IKONOS e Landsat 7 ETM+ nella valutazione dei danni da incendio in ambiente mediterraneo: il caso della Pineta di Castel Fusano*. Atti, 5^a Conferenza Nazionale ASITA, Rimini, vol. I: 529-537.
- CHIRICI G., CORONA P., MARCHETTI M., RICOTTA C., TRAVAGLINI D., 2002a – *Esperienze di ricerca sul monitoraggio mediante telerilevamento degli ecosistemi*

- forestali a supporto di una gestione sostenibile*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 24: 69-79.
- CHIRICI G., CORONA P., MARCHETTI M., BLASI C., 2002b – *Elaborazione della carta dell'uso del suolo e delle coperture vegetazionali a copertura nazionale in scala 1:250.000*. Atti, 6^a Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, vol. I: 787-792.
- CHIRICI G., CORONA P., TRAVAGLINI D., 2003 – *Sperimentazione di tecniche di classificazione object-oriented di immagini QuickBird a fini forestali*. L'Italia Forestale e Montana, 4: 231-250.
- CONGALTON R., 1991 – *A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.
- CORONA P., AMBROSINI I., 1995 – *Inventari forestali in Italia*. L'Italia Forestale e Montana, 2: 198-214.
- CORONA P., FERRARA A., 1999 – *Orientamenti tecnici innovativi nell'inventariazione e monitoraggio dei sistemi forestali*. In: Ciancio O. (a cura di), *Le nuove frontiere della gestione forestale*, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze: 217-242.
- CORONA P., MARCHETTI M., FILESI L., 1999 – *Mappatura in scala 1:10.000 di tipi forestali in Abruzzo*. Documenti del Territorio, 42: 31-34.
- CORONA P., TABACCHI G., 2001 – *Inventariazione delle risorse forestali su ampi territori. Finalità, metodi e prospettive*. Monti e Boschi, 6: 27-38.
- CUMER A., MARCHETTI M., MONTI F., ROSSI L., 1988 – *Valutazione dati SPOT negli inventari di vite e olivo*. Atti, 2° Convegno Nazionale AIT, Bolzano: 551-557.
- DE ANGELIS P., GIOVACCHINI A., MARCHETTI M., ADAMI P., 1992 – *Progetto CORINE – Carta dell'uso e della copertura del suolo*. 5° Convegno Nazionale AIT, Milano: 73-89.
- HOWARD J.A., 1991 – *Remote Sensing of Forest Resources*. Chapman & Hall, London.
- MARCHETTI M., REMOTTI D., ROSSI L., 1988 – *Il telerilevamento da satellite: tecniche e applicazioni*. Quaderno Tecnico n. 2, Italeco, Roma, 1988: 1-60.
- MARCHETTI M., CASTAGNOLI A., 1989 – *Proposed methods for application of new techniques for vegetation inventory, forest damage evaluation, their cartographic representation and permanent monitoring*. Proceedings, Int. FAO-IUFRO Conference, Global Natural Resources Monitoring and Assessment: preparation for the 21st century, Venezia: 496-503.
- MARCHETTI M., 1990 – *Telerilevamento e pianificazione forestale: nuovi strumenti e metodologie d'impiego*. Monti e Boschi, 2: 4-11.
- MARCHETTI M., ORADINI A., MARIOTTI B., CUMER A., 1998 – *Progetto TRANSITALIA: telerilevamento dei danni sulle foreste di aree appenniniche ed insulari*. Documenti del Territorio, 39: 20-30.
- MARCHETTI M., CHIRICI G., CORONA P., ESTREGUIL C., FOLVING S., HAME T., KENNEDY P., 2000 – *FMERS: una sperimentazione operativa del telerilevamento da satellite per la realizzazione di una carta forestale pan-europea*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 17/18: 21-30.
- MIPAF/ISAF/CFIS, 2003 – *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di*

- Carbonio (INFC). Manuale di fotointerpretazione per la classificazione delle unità di campionamento di prima fase.* A cura di De Natale F., Gasparini P., Trento (dattiloscritto, in stampa).
- ORTHOENGINE, 2001 – *Reference Manual, Version 8.2.* October 2001. PCI Geomatics.
- PRETO G., 1984 – *Inventario forestale della Toscana. Manuale di fotointerpretazione.* Regione Toscana, Giunta Regionale, Firenze.
- TOSI V., MARCHETTI M., 1998 – *I sistemi informativi forestali in Italia: uniformità e divergenze negli inventari delle risorse naturali.* L'Italia Forestale e Montana, 5: 220-252.