
Tecniche *object-oriented* per l'estrazione delle coperture forestali da fotogrammi storici pancromatici

Daniele Savio

Regione del Veneto, Unità di Progetto Foreste e Parchi, Via Torino 110, 30172, Mestre (VE), Italia
E-mail: danielle.savio@regione.veneto.it

Riassunto

Le fotografie aeree storiche rappresentano un'insostituibile risorsa informativa da cui si possono desumere con elevato dettaglio informazioni sulle dinamiche spaziali delle coperture forestali nel medio-lungo periodo, con importanti ricadute nella comprensione dei meccanismi alla base dei processi di cambiamento e nell'impostazione delle future linee gestionali. In questa ricerca sono state testate le potenzialità delle tecniche *object-oriented* per delineare una procedura oggettiva e scalabile su area vasta di estrazione dei limiti del bosco dai fotogrammi del volo GAI. L'implementazione nel classificatore di algoritmi di calcolo dei parametri statistici di tessitura basati sulle matrici di co-occorrenza spaziale, rispetto all'impiego delle sole statistiche spettrali, ha determinato un aumento del valore del *KIA* da 0,84 a 0,91.

Parole chiave: telerilevamento pancromatico, classificazione ad oggetti, tessitura, *land cover*.

Object-oriented techniques for the extraction of forest cover from historical panchromatic frames

Abstract

The historical aerial photos are an irreplaceable source of information for details pertaining to the spatial dynamics of the forestry cover in the mid and long-term, with key implications for interpreting the mechanisms underlying the processes of change and in planning future management guidelines. In this study the object-oriented techniques potentialities have been tested to outline a wide-reaching objective and scalable procedure of extracting wood limits from the GAI flight frames. The implementation of algorithms of the statistic parameters of the texture calculus based on the grey level co-occurrence matrix, compared to the use of spectral statistics alone, caused an increase in the value of the KIA from 0.84 to 0.91.

Keywords: panchromatic remote sensing, object-oriented classification, texture, *land cover*.

Introduzione

La domanda informativa sulle foreste si presenta con connotazioni diverse a seconda della scala a cui la si analizza. Se a livello transnazionale prevalgono istanze legate ad una stima complessiva dell'entità delle risorse forestali, ad una scala nazionale o regionale emergono, oltre a queste, esigenze conoscitive orientate ad una valutazione che consenta di calibrare politiche di tutela delle risorse coerenti con una loro valorizzazione economica in una visione sinottica

che sappia cogliere le possibili ricadute nel breve e nel lungo periodo. In questo contesto gli obiettivi di conservazione, valorizzazione e gestione di determinati siti coinvolgono nuovi orizzonti scientifici e tecnici, che si aprono verso la comprensione dei meccanismi con cui l'ambiente ed, in particolare, gli ecosistemi forestali spontaneamente si assestano verso nuovi equilibri imposti dai cambiamenti conseguenti alle attività umane. Un'importante chiave di lettura di questo complesso quadro viene dallo studio diacronico di quello che può definirsi "paesaggio culturale", prodotto della coazione tra meccanismi ecologici e trasformazioni economico-sociali. Dall'analisi retrospettiva delle dinamiche dell'uso agro-forestale delle terre e delle diverse tipologie di trasformazioni e persistenze è possibile generare dei modelli predittivi ed impostare, in particolare, le possibili linee gestionali per i boschi di neoformazione, cioè insediatisi in tempi relativamente recenti su suoli privi di copertura arborea, con attenzione alle problematiche che le tendenze evolutive in atto possono determinare per quanto riguarda le relazioni tra la risorsa boschiva e gli altri elementi costitutivi del paesaggio. Questi boschi di origine secondaria, risultato del declino dell'economia agricola montana e del progressivo abbandono di pratiche di utilizzo del territorio silvo-pastorale dimensionate su scala familiare, da un lato conducono ad una semplificazione paesaggistica che si traduce in una riduzione degli ecotoni e quindi della biodiversità, dall'altro assumono un importante ruolo come serbatoi di carbonio o come preziose fonti di energia rinnovabile. Ai processi di espansione naturale del bosco, si aggiungono quelli di evidente matrice antropica, che generalmente sono facilmente riconoscibili dall'analisi di foto aeree di diverse epoche, perché vanno a definire consistenti spostamenti dei margini del bosco e limiti netti con conformazioni ben differenti dalle geometrie irregolari generate dai processi di successione secondaria. Queste situazioni attualmente pongono difficoltà gestionali correlate alla sbilanciata distribuzione planimetrica delle fasi cronologiche ed alla fragilità strutturale dei popolamenti, caratterizzati da alte perticizie o fustaie adulte monoplane e monospecifiche, particolarmente vulnerabili agli eventi meteorici ed a problematiche fitosanitarie. In tali contesti risulta complesso, a livello pianificatorio aziendale, modulare gli interventi selvicolturali nell'ottica di garantire una ripresa costante e duratura nel tempo [Corona et al., 2010]. Lo studio dell'evoluzione del paesaggio silvo-pastorale si attua, pertanto, attraverso un confronto tra le coperture boschive di differenti periodi storici (Fig. 1) in un orizzonte temporale sufficientemente ampio a rendere analizzabili sia i fenomeni di matrice antropica, sia i processi naturali di successione secondaria.

Questi vincoli temporali e la necessità di rappresentare il fenomeno con adeguato dettaglio geometrico limitano le basi informative utilizzabili alla fotogrammetria aerea. Infatti, la risoluzione dei primi satelliti è maggiore a 30 metri e, comunque, per periodi precedenti al 1972 (lancio del primo Landsat) non vi è disponibilità di immagini. Un elemento critico nella derivazione di cartografie di uso del suolo a partire da foto aeree storiche, oltre alle problematiche legate al recupero della metricità dell'immagine, è, tuttavia, rappresentato dalla loro scarsa informazione spettrale. Fino agli inizi degli anni '90 le foto aeree in bianco e nero sono state in assoluto le più usate per il loro costo più contenuto in relazione alle tecnologie allora disponibili (fino a 10 volte inferiore alle emulsioni a colori). Le pellicole pancromatiche hanno, tuttavia, la caratteristica e la limitazione di avere una scarsa sensibilità spettrale nei confronti dei verdi [Amadesi, 1977], di conseguenza queste emulsioni pongono evidenti limitazioni a derivazioni tematiche che riguardino la vegetazione. Soluzioni innovative a queste problematiche vengono dalle applicazioni dei sistemi di analisi delle immagini basati sul paradigma *object-oriented* in grado di implementare classificatori operanti con logica *fuzzy*.



Figura 1 - Espansione del bosco sopra l'abitato di Gavelle (frazione di Foza, Vicenza).

In questo contesto il presente contributo si propone di definire procedure semi-automatiche di estrazione delle coperture forestali da fotogrammi pancromatici storici alternative alle usuali tecniche di fotointerpretazione e digitalizzazione manuale, che consentano di ridurre al minimo il concorso manuale del fotointerprete, determinando, soprattutto nell'applicazione su vasti comprensori, una drastica riduzione dei tempi di produzione dell'output vettoriale. Inoltre, le procedure di segmentazione dinamica dell'immagine si contraddistinguono, rispetto alla fotointerpretazione manuale, per una maggiore oggettività del metodo di rappresentazione della complessità strutturale del paesaggio.

Area di studio e materiali utilizzati

L'area di analisi interessa la porzione settentrionale della Comunità Montana della Spettabile Reggenza dei Sette Comuni (Vicenza), comprendendo parte dei Comuni di Rotzo, Roana, Asiago, Gallio, Foza, Enego. Questo contesto territoriale è ampiamente documentato sotto il profilo storico, socio-economico e gestionale, pertanto è stato abbastanza agevole relazionare i processi di trasformazione ai fattori principali che li hanno generati.

E' stata analizzata una scena che ricopre una superficie molto estesa (circa 30.000 ha) con l'obiettivo di mettere a punto una procedura di classificazione speditiva, riproducibile su scala regionale.

Le immagini oggetto di classificazione sono le foto aeree del volo GAI (Gruppo Aeronautico Italiano) del 1954 scansionate in formato TIFF ad una risoluzione di 600 dpi. I fotogrammi utilizzati provengono da un preliminare lavoro di ortorettifica eseguito dall'Università IUAV di Venezia su committenza della Regione del Veneto e, in tale contesto, sono stati ricampionati forzando i pixel ad una *GSD* (*Ground Sample Distance*) di 2 m con un errore residuo minore di 2 pixel. La superficie sulla quale sono stati eseguiti i test ed estratto lo strato tematico è ricoperta da 9 fotogrammi appartenenti alle strisciate 21 e 22A (Fig. 2). Il dato vettoriale relativo alle coperture forestali nel 2007 è, invece, stato ricavato dalla "Carta della copertura del suolo del Veneto" alla scala 1:10.000, *database* geografico realizzato dalla Regione del Veneto nel contesto dell'attuazione del progetto europeo *GSE Land*. Le formazioni boschive in questo caso sono state individuate a partire dalle

ortofoto TERRAITALY 2006-2007 e rispondono a due diverse definizioni di bosco, quella adottata dalla “Legge forestale” (L.R. n.52/1978, art.14) della Regione del Veneto e quella messa a punto nel processo *Global Forest Resource Assesment* dell’anno 2000 (FRA2000).

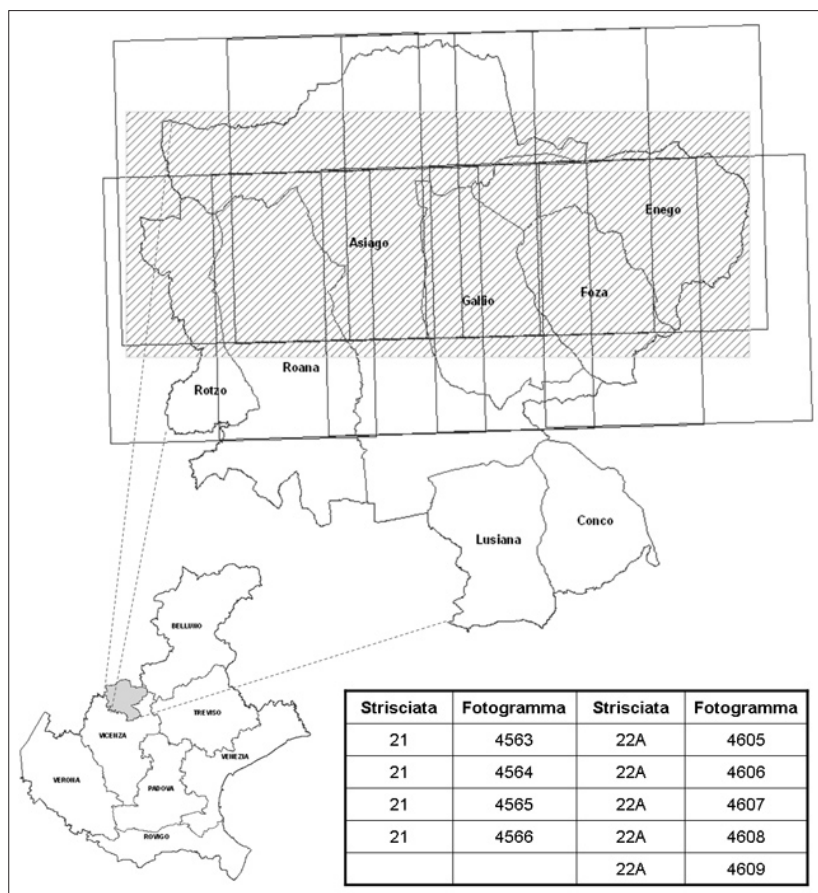


Figura 2 - Area di studio e fotogrammi selezionati.

Nel confronto multitemporale è stato adottato quest’ultimo standard, che consente di comparare i risultati con gli esiti di gran parte delle attività di monitoraggio forestale prodotte dalla comunità scientifica nell’ultimo decennio. Il processo di produzione del dato vettoriale relativo alle coperture forestali del 1954 e del 1991, pertanto, si è conformato alle specifiche di estensione minima (0,5 ha) e di copertura arborea minima (10%) previste dalla definizione di bosco FRA2000.

Approccio *object-oriented* e descrittori statistici di tessitura

La definizione di una procedura supervisionata per la classificazione delle coperture boschive a partire dalle immagini pancromatiche del volo GAI pone problematiche differenti e maggiori difficoltà rispetto all’analisi di immagini più recenti. L’interpretazione di questi fotogrammi a

256 livelli di grigio deve affrontare elevatissimi livelli di incertezza, in quanto ad un determinato valore di *DN* (*Digital Number*) possono corrispondere differenti classi di copertura del suolo. Questa incertezza aumenta ancor più in territori ad orografia accidentata, nei quali i diversi gradi di ombreggiatura, determinati da differenti condizioni di pendenza ed esposizione, rendono ancor meno univoca e, pertanto, attendibile una classificazione su base spettrale. In questo contesto l'approccio *object-oriented* è l'unico possibile, dal momento che la risposta radiometrica del singolo pixel non è direttamente correlabile al *land cover*. Il numero di descrittori (*features*) spettrali associabili ad un oggetto generato dalla segmentazione, tuttavia, rispetto ad immagini *RGB*, si riduce drasticamente dal momento che, nelle immagini mono-banda, i valori della media (*mean*) dei *DN* di ciascun oggetto corrispondono ai valori della luminosità (*brightness*) e che, in virtù di tale eguaglianza, la differenza massima (*maximum difference*) per ogni oggetto è pari a 0. Le uniche informazioni spettrali utilizzabili sono, pertanto, la media e la deviazione standard (*standard deviation*), ma da sole, come si vedrà negli esempi che seguono, queste statistiche sono insufficienti a realizzare una separazione delle classi tale da produrre una classificazione stabile.

Nelle aree montane, alle quote più elevate, un contributo al miglioramento dell'accuratezza tematica può venire dall'integrazione di modelli di distribuzione della vegetazione forestale su base altitudinale. L'utilizzo di funzioni di appartenenza costruite a partire da informazioni ancillari, quale un accurato DTM, pur consigliato, esula, tuttavia, dagli obiettivi di questo studio, che mira a determinare le modalità più efficaci di estrazione dall'immagine del suo contenuto semantico.

Un metodo che consente di ottenere risultati ben più accurati rispetto alla classificazione su base esclusivamente spettrale si basa sull'integrazione dell'analisi delle proprietà tessiturali delle diverse classi di copertura del suolo. La tessitura di un'immagine si può definire come la variazione spaziale dei valori dei toni di grigio secondo una disposizione ricorsiva e geometricamente identificabile. Le caratteristiche di tessitura consentono di analizzare l'omogeneità, la dipendenza lineare dei toni di grigio, il contrasto, il numero e la natura dei confini presenti e la complessità dell'immagine [Haralik et al., 1973]. Per un osservatore umano l'associazione ad una superficie di un particolare tipo di tessitura è intuitiva ed immediata e le definizioni che se ne danno sono tipicamente qualitative (pertanto soggettive) e legate al suo carattere percettivo. Le tecniche per descrivere le caratteristiche tessiturali in modo oggettivo possono essere di tipo strutturale o statistico. L'approccio strutturale descrive il posizionamento delle primitive di tessitura (*textel*) deterministiche attraverso concetti di adiacenza, vicinanza o periodicità, pertanto è più adatto all'analisi di immagini di strutture artificiali che alla descrizione di scene naturali. Le coperture forestali, come appaiono dalle immagini aeree, sono caratterizzate da tessiture costituite da primitive elementari molto piccole con caratteristiche irregolari e, per descriverne la variabilità, sono più appropriati i metodi basati sull'analisi di parametri statistici [Keller et al., 1989].

Nello specifico, sono stati sperimentati algoritmi per l'estrazione di parametri statistici di tessitura calcolati sulle matrici di co-occorrenza. Le matrici di co-occorrenza spaziale (*GLCM*, *grey level co-occurrence matrix*) proposte da Haralik [1973] si basano su statistiche del secondo ordine, ovvero sulla costruzione di un istogramma bidimensionale dei livelli di grigio misurati ai capi di un segmento posizionato in modo casuale nell'immagine con una determinata orientazione. Il software *Definiens Professional*, utilizzato per la segmentazione e la classificazione dei fotogrammi pancromatici del volo GAI, offre la possibilità di calcolare le statistiche relative alla

tessitura in una delle quattro direzioni possibili (0° , ovvero in direzione verticale, 45° , 90° , ossia in direzione orizzontale, 135°). Per ciascun pixel di un oggetto dell'immagine viene considerata la co-occorrenza tra il pixel più vicino in una delle quattro direzioni ed il pixel più vicino nel verso opposto [Navulur, 2007], comprendendo anche i pixel circostanti all'oggetto con distanza di uno, per eliminare gli effetti di bordo. Il calcolo delle statistiche di tessitura può anche essere eseguito contemporaneamente in tutte e quattro le direzioni; in questo caso il *software* opera su quattro matrici di calcolo ed i tempi di elaborazione si allungano sensibilmente.

Le prestazioni delle statistiche di tessitura risentono sensibilmente della modalità di ricampionamento delle immagini adottata nelle fasi di pre-elaborazione (ortorettifica e mosaicatura). In questo lavoro è stato adottato il metodo *nearest neighbor*, perché è l'unico a mantenere inalterato il valore di luminosità dei pixel [Gomasasca, 2004; Chirici e Corona, 2006], pur presentando l'inconveniente di produrre un più marcato effetto scalinatura, che, tuttavia, può essere facilmente corretto applicando opportuni algoritmi di regolarizzazione dei contorni (*smoothing*) contestualmente all'esportazione in formato vettoriale dell'*output* tematico della classificazione. Le altre modalità di ricampionamento introducono una redistribuzione dei valori dei *DN* nell'immagine di *output* attraverso tecniche di interpolazione che hanno in comune la caratteristica di "smussare" le differenze tra i valori dei *DN* e di eliminare i valori estremi, compromettendo l'analisi delle statistiche tessiturali, che il *software* Definiens Professional calcola su matrici di co-occorrenza costruite utilizzando finestre mobili di dimensione 3×3 .

Criteri di selezione dei descrittori

L'analisi delle co-occorrenze spaziali, ha lo svantaggio di generare una grande mole di dati e ciò comporta, in relazione al tipo e al numero di descrittori statistici di tessitura utilizzati, alla dimensione dell'immagine da analizzare ed alle capacità computazionali del processore impiegato, tempi di elaborazione anche estremamente lunghi.

Per questo motivo è importante limitare l'impiego delle statistiche tessiturali a quelle che meglio descrivono la natura delle classi rappresentate. Alcuni di questi descrittori riguardano caratteristiche specifiche dell'immagine o la presenza di strutture organizzate, altre caratterizzano la complessità e la natura delle transizioni dei toni di grigio.

Le 8 statistiche di tessitura che il *software* Definiens Professional può calcolare per ciascun oggetto prodotto dalla segmentazione sono:

- secondo momento angolare (*GLCM Ang. 2nd moment*): è un indicatore dell'omogeneità dell'oggetto e, quindi, della numerosità delle transizioni dei toni di grigio (è uguale alla somma dei quadrati delle frequenze delle co-occorrenze);
- omogeneità (*GLCM Homogeneity*): se l'oggetto è localmente omogeneo, i valori più elevati della matrice di co-occorrenza spaziale si concentrano lungo le diagonal; l'omogeneità diminuisce in misura esponenziale in funzione della distanza dei valori elevati della matrice dalla sua diagonale;
- contrasto (*GLCM Contrast*): all'opposto dell'omogeneità, il contrasto esprime la misura delle variazioni locali dei *DN*, pertanto presenta valori elevati per oggetti con tessitura molto pronunciata;
- dissomiglianza (*GLCM Dissimilarity*): simile alla precedente statistica, aumenta in modo lineare in relazione alla presenza all'interno dell'oggetto di primitive di tessitura con alto contrasto;

- entropia (*GLCM Entropy*): ha valori bassi quando l'oggetto presenta coppie di livelli di grigio dominanti per una certa direzione;
- deviazione standard (*GLCM Standard deviation*): misura la dispersione dei valori della matrice di co-occorrenza attorno alla media;
- correlazione (*GLCM Correlation*): esprime il grado di dipendenza lineare dei livelli di grigio di pixel adiacenti;
- media (*GLCM Mean*): misura il valore di un pixel ponderato con la frequenza della sua comparsa in combinazione con un determinato valore del pixel vicino [Haralik et al., 1973; Baatz et al., 2001].

Pur essendo noto il significato di ciascuno di questi indicatori dell'organizzazione spaziale delle primitive di tessitura, a poco aiuta una valutazione visiva dei fotogrammi per individuare quelli più efficaci a discriminare le classi da rappresentare, poiché nelle immagini che rappresentano scene naturali le caratteristiche di tessitura possono variare da zona a zona con modalità stocastiche.

La scelta delle statistiche di tessitura da implementare nell'algoritmo di classificazione, in una prima analisi, è stata fatta sulla base di esempi applicativi documentati in letteratura [Halounová, 2003; Laliberte e Rango, 2009]. In uno studio pilota eseguito da Halounová [2003] per conto del Ministero per l'Agricoltura della Repubblica Ceca, finalizzato alla definizione di una procedura di classificazione semi-automatica per distinguere boschi di latifoglie e di conifere ed aree deforestate a partire da foto aeree pancromatiche con risoluzione geometrica di 50 cm, i descrittori statistici di tessitura più efficaci nel migliorare l'accuratezza della classificazione sono risultati la media e la dissomiglianza. Diversa è l'indicazione di Laliberte e Rango [2009], i quali indicano l'entropia come la migliore statistica di tessitura in grado di discriminare gli arbusteti dai pascoli su immagini aeree a risoluzione sub-decimetrica.

In seconda analisi, sono stati evitati gli abbinamenti di descrittori statistici in grado di produrre risultati fortemente correlati. Di conseguenza sono stati esclusi l'omogeneità (correlata con la dissomiglianza: $r \approx -0,95$), la deviazione standard (correlata con la dissomiglianza: $r \approx 0,91$) e il secondo momento angolare (correlato con l'entropia: $r \approx -0,87$) [Hall-Beyer, 2007].

Con questo approccio, delle 8 statistiche di tessitura calcolate dal *software*, è stato selezionato un sottoinsieme di 5 statistiche, il cui potenziale risolutivo è stato ulteriormente analizzato adottando il processo automatico di ottimizzazione *Feature Space Optimization (FSO)*. Tale processo è d'aiuto alla determinazione della combinazione di descrittori che meglio contribuisce a discriminare le classi di interesse, mediante il calcolo automatico della distanza tra le classi determinata dall'algoritmo *standard nearest neighbor* nello spazio multidimensionale definito dai descrittori selezionati [Baatz et al., 2001; Grignetti et al., 2009].

I test applicativi di *FSO* sono stati eseguiti contestualmente alla definizione dei parametri di segmentazione, al fine di verificare l'esistenza di relazioni tra le potenzialità risolutive degli algoritmi di classificazione e le dimensioni medie degli oggetti generati dalla segmentazione e, pertanto, di valutare se anche questo aspetto possa rientrare tra i criteri di individuazione dei parametri ottimali.

Le prove di segmentazione sono state eseguite attraverso un approccio iterativo per prova ed errore, variando di volta in volta la combinazione dei parametri guida [Chirici e Corona, 2006; Chirici et al., 2006]. Sono stati ritenuti adeguati ad un'ideale classificazione dell'immagine quei parametri che hanno consentito di evitare un'eccessiva frammentazione e nel contempo

di produrre un dettaglio sufficiente a differenziare il bosco dalle altre tipologie di copertura del suolo, anche con riferimento alle dimensioni minime degli oggetti, che devono consentire l'identificazione di aree forestali e di *patch* non boscate con estensione di almeno 0,2 ha. Benché nel confronto diacronico si faccia riferimento alla definizione di bosco FRA2000 (che adotta un'unità minima di 0,5 ha), il riferimento dimensionale di 0,2 ha è stato scelto allo scopo di produrre una base di dati intermedia che potesse successivamente adeguarsi anche alla definizione di bosco prevista dalla legislazione regionale (che prevede appunto una superficie minima di 0,2 ha).

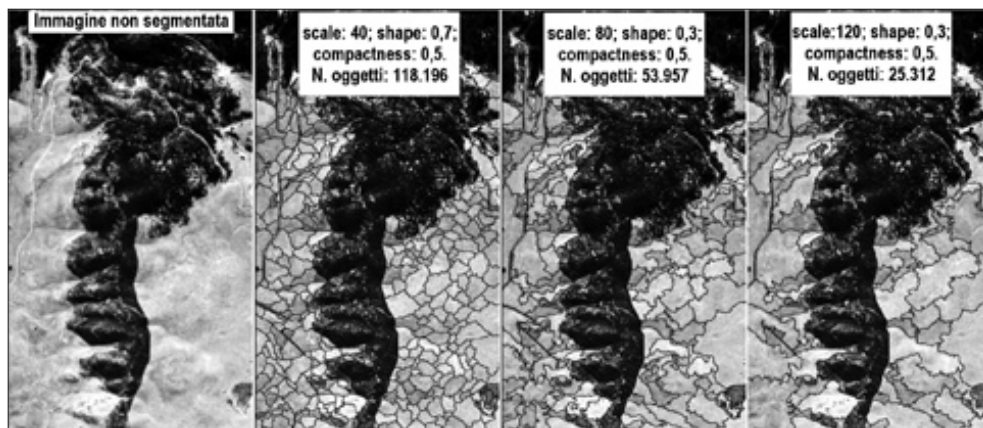


Figura 3 - Esempi di segmentazione e numero di oggetti generati sull'intera scena analizzata.

Inizialmente sono stati adottati i parametri suggeriti da Gennaretti et al. [2009] (*scale*=40; *shape*=0,7; *color*=0,3; *compactness*=0,5) (Fig. 3). Gli oggetti così generati, in conseguenza allo scarso peso assegnato all'eterogeneità spettrale, hanno forma per lo più compatta, ma rappresentano con accuratezza le discontinuità di copertura del suolo in virtù delle ridotte dimensioni. Le successive prove di segmentazione, invece, sono state eseguite aumentando progressivamente di 20 unità il fattore di scala ed innalzando l'*overall fusion value* attraverso una graduale riduzione del fattore di forma (*shape*) fino a 0,3. Gli oggetti prodotti sono di dimensioni mediamente maggiori, ma risultano, fino ad un valore massimo del parametro *scale*=120, ugualmente coerenti con l'estensione minima e con le classi da rappresentare, poiché delineano in modo più accurato le eterogeneità spettrali dell'immagine (in Figura 3 si riportano a titolo esemplificativo solo tre dei cinque risultati delle segmentazioni eseguite con progressione del fattore di scala pari a 20).

Per ciascun *output* di segmentazione è stato avviato il processo di *FSO*, dapprima utilizzando le sole caratteristiche spettrali, successivamente introducendo, oltre a queste, i 5 descrittori tessuturali selezionati, ovvero la media, la dissomiglianza, la correlazione, l'entropia e il contrasto, calcolati come valor medio delle statistiche estratte nelle quattro direzioni. Anche la classificazione è stata eseguita sia utilizzando le sole statistiche spettrali, sia implementando nel classificatore *standard nearest neighbor* anche le tre statistiche di tessitura che hanno maggiormente contribuito a determinare, nel processo di *FSO*, la massima distanza di separazione tra le classi (*maximum separation distance*) (Fig. 4).

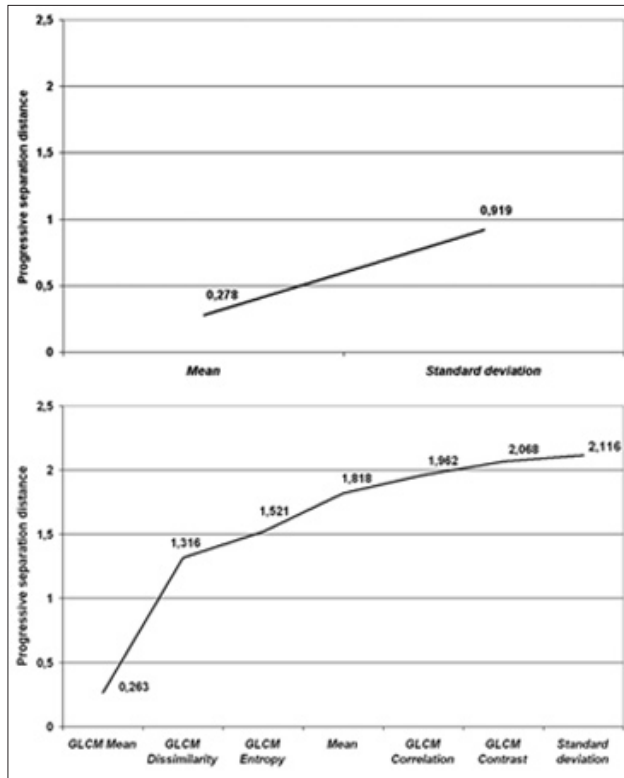


Figura 4 - Valori di *separation distance* ottenuti sull'area di analisi segmentata con $scale=120$, $shape=0,3$, $compactness=0,5$. L'implementazione nel processo di *FSO* dei descrittori statistici di tessitura determina un marcato aumento della distanza di separazione tra le classi (grafico in basso) rispetto all'impiego delle sole statistiche spettrali (grafico in alto).

Studi precedenti hanno, infatti, dimostrato che l'impiego di più di tre statistiche tessurali, a fronte di tempi di calcolo più lunghi, non produce miglioramenti significativi nell'accuratezza della classificazione [Trianni, 2005].

Ad ogni scala di segmentazione la selezione delle aree di *training* è stata effettuata, tramite fotointerpretazione, in modo da rappresentare l'eterogeneità delle classi bosco/non bosco, in relazione anche ai diversi gradi di ombreggiatura indotti dalla morfologia del terreno, e la variabilità dimensionale degli oggetti. Il numero di oggetti utilizzato come *samples* corrisponde a circa il 2% del numero degli oggetti dell'intera scena da classificare. Questo valore percentuale è inferiore a quello adottato in altre sperimentazioni (Lamonaca [2006] e Giuliarelli et al. [2007] suggeriscono di utilizzare almeno il 3-4% dell'intera immagine), ma consente di ridurre i tempi necessari all'esecuzione del processo di classificazione, dipendenti, oltre che dalle caratteristiche dell'*hardware* utilizzato e dal numero e dalla tipologia dei descrittori implementati nell'algoritmo di classificazione, anche dalla numerosità delle aree di *training*.

Infine sono state valutate le differenti prestazioni tramite matrice di contingenza tra classificazioni ed aree di controllo e calcolo dell'indice *KIA* (*Kappa Index of Agreement*) (Fig. 5).

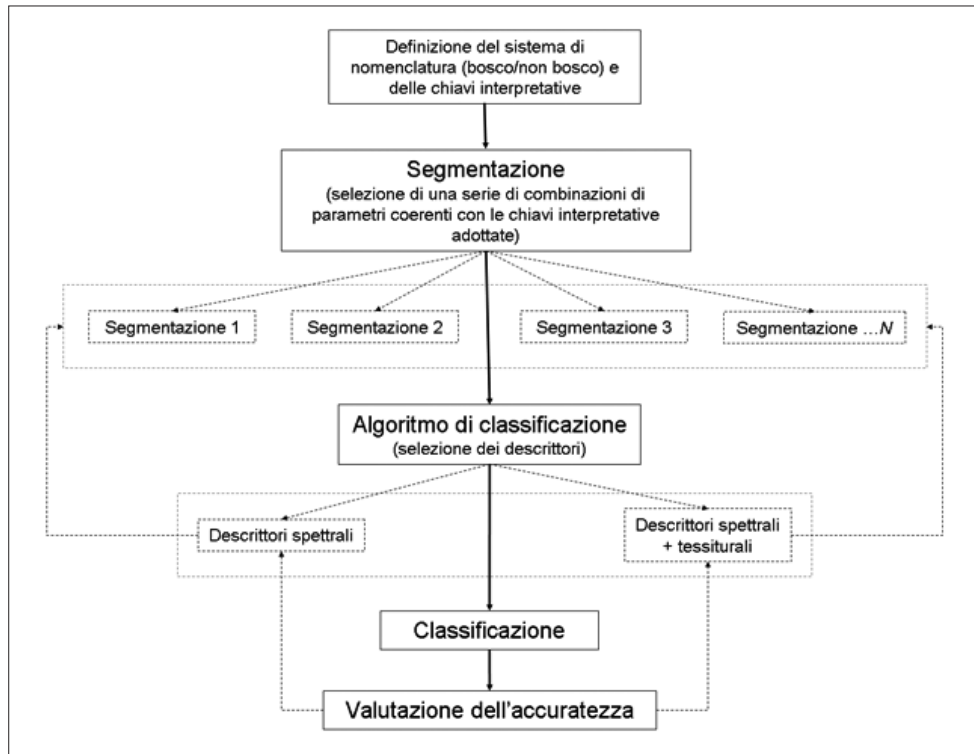


Figura 5 - Diagramma di flusso del processo di classificazione con riferimento all'approccio adottato.

Risultati

La distanza di separazione, misurata attraverso il processo *FSO*, è servita per stimare il contributo potenziale dell'informazione tessiturale al miglioramento della discriminazione tra le due classi di interesse (bosco/non bosco). A tutte le scale di segmentazione, l'integrazione delle statistiche di tessitura ha determinato una distanza di separazione tra le classi pressoché doppia rispetto al classificatore basato esclusivamente sulle statistiche spettrali (Fig. 4).

Nell'algoritmo di classificazione, pertanto, sono state implementate, oltre alla media ed alla deviazione standard dei *DN* di ciascun oggetto, le tre statistiche di tessitura che in tutti i test eseguiti hanno evidenziato il maggiore potenziale risolutivo, ossia la media, la dissomiglianza e l'entropia, determinate, in una prima definizione dell'algoritmo, dal valore medio delle statistiche calcolate sulle matrici costruite nelle quattro direzioni.

Proprio con riferimento all'angolo θ di calcolo della matrice di co-occorrenza spaziale, le strategie suggerite in letteratura non sono univoche. Haralik et al. [1973], oltre ad Halounová [2004], suggeriscono di estrarre le statistiche di tessitura in tutte le quattro possibili direzioni e poi calcolarne il valore medio. Peddle e Franklin [1989] sostengono invece che in molti casi le statistiche della *GCLM* calcolate considerando una appropriata direzione possono essere più idonee nella discriminazione di alcune classi di copertura del suolo. Ulteriori test, eseguiti attraverso il processo di *FSO*, di fatto hanno confermato la seconda

di queste tesi, pur evidenziando un aumento modesto della distanza di separazione tra le classi (Tab. 1), che non ha determinato miglioramenti nell'accuratezza della classificazione. Il calcolo delle statistiche tessiturali sulle matrici costruite in una sola direzione, tuttavia, ha mostrato il vantaggio di ridurre drasticamente (del 40-50%) i tempi di elaborazione, ma richiede un'analisi preliminare (che utilizza come guida il *tool FSO*) necessaria all'individuazione, per ciascuna delle tre statistiche tessiturali utilizzate, dell'angolo θ più efficace nella separazione delle classi. Questa analisi deve essere ripetuta per ogni scena da classificare, perché la migliore direzione di calcolo della matrice di co-occorrenza spaziale può variare localmente in relazione alle caratteristiche della copertura del suolo ed ai fattori che influiscono sulle condizioni di illuminazione (posizione del sole, orografia).

Tabella 1 - Potenziale discriminante delle *features* di tessitura in relazione alla direzione di calcolo (risultati relativi all'intera scena segmentata con *scale*=120, *shape*=0,3, *compactness*=0,5 calcolati con il *tool FSO*).

Descrittori	Distanza progressiva di separazione	Descrittori	Distanza progressiva di separazione
Media (tessiturale) (tutte le direzioni)	0,263	Media (tessiturale) (45°)	0,263
Dissomiglianza (tutte le direzioni)	1,316	Dissomiglianza (0°)	1,479
Entropia (tutte le direzioni)	1,521	Entropia (135°)	1,666
Media (spettrale)	1,818	Media (spettrale)	1,990
Deviazione standard	1,912	Deviazione standard	2,037

La scena analizzata presenta alcune situazioni non classificabili, rappresentate prevalentemente dalle coperture nuvolose e dalle ombre generate dai rilievi. Queste superfici, che interessano circa il 4% dell'area di studio, sono state mascherate ed escluse sia dalla selezione delle aree di *training* (*samples*), sia dall'individuazione delle aree di controllo impiegate per calcolare la matrice di errore, e sono state sottratte anche dal computo delle variazioni di superficie forestale nell'analisi multitemporale.

Nella fase di verifica dell'accuratezza della classificazione le geometrie delle aree di controllo sono state determinate utilizzando parametri di segmentazione differenti da quelli impiegati per classificare l'immagine (*scale*=90; *shape*=0,7; *compactness*=0,5), allo scopo di utilizzare siti di riscontro in nessun caso corrispondenti con gli oggetti classificati alle diverse scale di segmentazione. Queste aree, inoltre, sono state determinate evitando sovrapposizioni con gli oggetti utilizzati per l'apprendimento del classificatore, che produrrebbero una sovrastima dell'indice *KIA*. Le aree di controllo, determinate tramite fotointerpretazione, sono state distribuite secondo uno schema casuale stratificato, cercando, pertanto, di rappresentare, come nella selezione dei poligoni di *training*, la variabilità all'interno delle classi di interesse. Per ciascuna classe sono stati selezionati 80 *test sites* (Congalton [1991] suggerisce di selezionarne almeno 75 per classe), che includono 1.099.194 pixel afferenti alla classe bosco e 892.404 pixel alla classe non bosco (in totale il 2,23% dell'intera scena).

I risultati della classificazione sono stati valutati sia attraverso la rappresentazione grafica e statistica della *classification stability*, sia tramite il calcolo dei valori di accuratezza e dell'indice *KIA*.

La *classification stability* evidenzia la differenza tra i valori di appartenenza *fuzzy* di ciascun oggetto alle classi bosco/non-bosco sulla base dei descrittori impiegati. Quando l'algoritmo di classificazione assegna ad un oggetto valori di appartenenza *fuzzy* simili, la differenza tra gli indicatori di appartenenza assume valori prossimi a 0 e la classificazione di quell'oggetto si considera "instabile". Al contrario, quanto maggiore è la differenza tra il valore di appartenenza tra la prima classe (quella con il grado di appartenenza *fuzzy* più elevato) ed il secondo miglior risultato di assegnazione ad una classe, tanto più la classificazione può considerarsi "stabile". Questo indicatore non opera attraverso la selezione di aree di controllo e, pertanto, costituisce uno strumento di valutazione speditiva delle prestazioni dell'algoritmo di classificazione. Nella sua rappresentazione tabellare riporta per ciascuna classe le principali statistiche (media, deviazione standard, minimo, massimo) relative alla *classification stability* degli oggetti classificati (Tab. 2). L'*output* grafico rappresenta gli oggetti classificati con tonalità che vanno dal rosso (classificazione instabile) al verde (classificazione stabile).

Tabella 2 - Statistiche di *classification stability* relative alla classificazione della scena segmentata con *scale*=120, *shape*=0,3, *compactness*=0,5 ottenute sia utilizzando le sole caratteristiche spettrali, sia integrando anche i tre descrittori statistici di tessitura selezionati.

Descrittori: Media (spettrale) + Deviazione standard					
Classe	N. oggetti	Media	Dev. standard	Minimo	Massimo
non bosco	10.547	0,3796	0,2896	2,253055573e-005	1
bosco	14.765	0,3313	0,2092	2,241134644e-005	1
Descrittori: Media (spettrale) + Deviazione standard + Media (tessiturale) + Dissomiglianza + Entropia					
Classe	N. oggetti	Media	Dev. standard	Minimo	Massimo
non bosco	11.665	0,5204	0,306	0,0006107091904	1
bosco	13.647	0,4011	0,247	0,0002623796463	1

Il calcolo dell'indice *KIA*, effettuato per ciascun *output* di segmentazione, ha evidenziato una correlazione, nell'impiego delle statistiche di tessitura, tra accuratezza tematica e dimensione media degli oggetti. Questo probabilmente accade perché oggetti di piccole dimensioni sono meno rappresentativi dell'organizzazione spaziale dei toni di grigio, in relazione alle classi d'interesse da discriminare, rispetto a regioni più ampie dell'immagine. I valori dell'indice *KIA* più elevati, pertanto, sono stati ottenuti adottando i parametri di segmentazione *scale*=120, *shape*=0,3, *compactness*=0,5, con un significativo contributo delle statistiche di tessitura nell'aumento dell'accuratezza:

- media (spettrale) + deviazione standard: *KIA*=0,84;
- media (spettrale) + deviazione standard + media (tessiturale) (45°) + dissomiglianza (0°) + entropia (135°): *KIA*=0,91.

Criticità

La maggior parte degli errori di classificazione ha riguardato superfici analizzabili con difficoltà anche tramite fotointerpretazione. Queste situazioni sono rappresentate dalle formazioni a pino mugo localizzate nella parte settentrionale dell'Altopiano dei Sette Comuni, che non staccano un'ombra netta e, pertanto, sono difficilmente distinguibili dalle praterie in quota, e dagli orno-ostrieti distribuiti sui pendii meridionali del Corno Rosso e del Monte Spitz, che al momento della ripresa aerea (2 ottobre 1954) risultavano parzialmente privi della copertura fogliare. La corretta attribuzione tematica, in questi casi, ha richiesto un'attenta revisione fotointerpretativa. La comparazione con fonti aerofotogrammetriche più recenti ha rappresentato un supporto solo orientativo alla verifica a video, in quanto la dinamicità dei fenomeni di trasformazione e l'evoluzione temporale degli stessi obbliga ad un processo interpretativo più complesso, che deve essere risultato dell'interpolazione tra fonti bibliografiche ed archivi storici di dati [Mancini et al., 2008]. Il presente lavoro, finalizzato alla definizione di una procedura speditiva di estrazione tematica, non ha affrontato questo approfondimento analitico. Di conseguenza i casi non risolvibili con sicurezza tramite fotointerpretazione sono stati fatti rientrare nell'insieme delle aree non classificabili.

Altro elemento di criticità è rappresentato dalla verifica della correttezza della classificazione in relazione al grado minimo di copertura delle chiome previsto dalla definizione di bosco FRA2000. L'esecuzione di questo controllo è affidata all'esperienza del fotointerprete e, pertanto, si basa su valutazioni soggettive che possono rappresentare fonte di errore.

Confronto multitemporale

Pur non volendo entrare nel dettaglio dei risultati ottenuti dal confronto multitemporale nell'area di studio, appare interessante, più in generale, evidenziare la rilevanza che assume la scala temporale di osservazione delle dinamiche spaziali dei popolamenti forestali nel determinare l'approccio interpretativo e la scelta degli strumenti di analisi. In generale quanto maggiore è il lasso di tempo che intercorre tra due rilevamenti, tanto maggiore sarà l'entità dei mutamenti e tanto più elevata la probabilità che le cause generatrici siano legate a particolari eventi storici o alle trasformazioni socioeconomiche che hanno caratterizzato quel territorio, piuttosto che alle naturali dinamiche di successione forestale [Preto, 1994].

Comparando i fotogrammi del volo GAI del 1954 con le foto aeree del volo "Montagna Veneta 1991", è stato preso in considerazione un primo intervallo temporale di 37 anni che ha segnato sostanziali modifiche all'assetto territoriale dell'area di studio (la superficie forestale è aumentata del 24%). A modellare i boschi ed il paesaggio dell'intero comprensorio, oltre al progressivo declino del pascolo ovino, furono, soprattutto, le estese opere di ricostituzione boschiva (Fig. 6) eseguite tra gli anni '50 e '60, che compensarono le ingenti distruzioni e i danneggiamenti cui andò incontro l'Altopiano dei Sette Comuni durante le due guerre.

Il secondo intervallo temporale considerato analizza le dinamiche avvenute tra il 1991 e il 2007, periodo durante il quale le esigue opere di coniferamento di incolti e pascoli abbandonati sono di entità tale da non interferire sulla valutazione complessiva dei fattori di potenziale rilevanza funzionale nelle dinamiche di espansione del bosco.

L'opportunità di approfondire il livello di analisi, fino a relazionare i processi di trasformazione ai principali fattori naturali e gestionali che li hanno generati, si è scontrata, tuttavia, con la necessità di adottare tecniche di monitoraggio più accurate, in grado di evidenziare i processi di ricolonizzazione avvenuti in un intervallo temporale di soli 16 anni. Anche in questo caso, attraverso procedure diverse da quelle esposte in questo contributo, applicate ad immagini con risoluzione metrica e sub-metrica, le potenzialità del paradigma *object oriented* hanno consentito di spazializzare i processi e di produrre precise stime quantitative sulla loro consistenza, validate, con esito positivo, attraverso i classici metodi di natura inventariale [Savio, 2011].

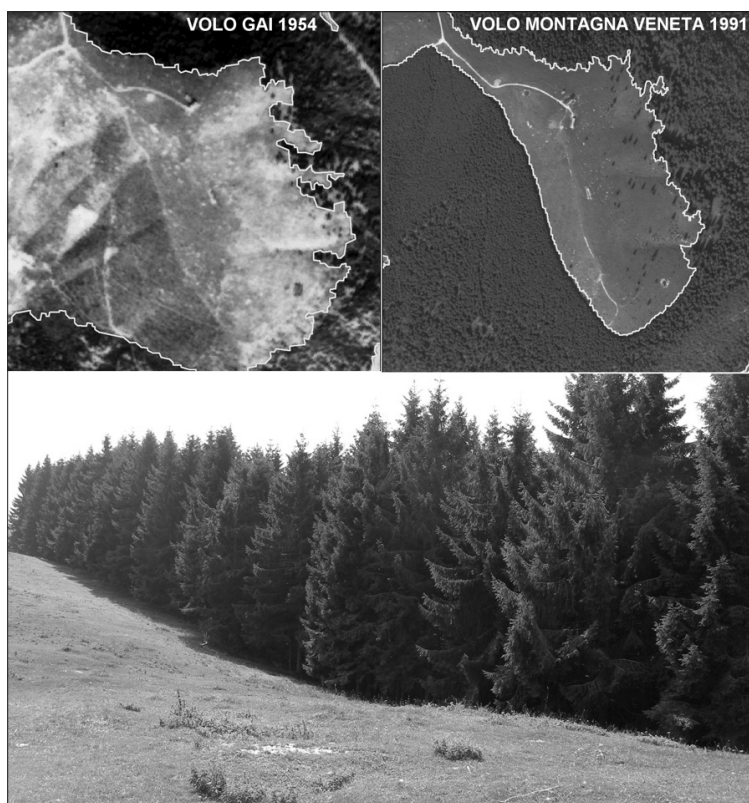


Figura 6 - Rimboschimenti monospecifici di abete rosso eseguiti tra Piana della Futa e Malga Xomo, Comune di Foza (VI).

Conclusioni

L'esperienza condotta dimostra che alcuni descrittori statistici della tessitura basati sulla costruzione delle matrici di co-occorrenza spaziale, implementati nel classificatore *standard nearest neighbor* disponibile nel software Definens Professional, si rivelano efficaci strumenti di analisi del contenuto semantico di fotogrammi storici pancromatici ed, in particolare, contribuiscono in misura significativa a discriminare le coperture forestali dalle altre classi di uso del suolo.

I test eseguiti utilizzando il *tool FSO*, oltre ad indirizzare la scelta dei tre indicatori statistici di tessitura più adeguati a differenziare le classi di interesse, hanno evidenziato che il contributo delle singole statistiche tessiturali nel determinare la massima distanza di separazione tra le classi cambia al variare dei parametri di segmentazione. In particolare si è osservato che il peso dell'entropia decresce all'aumentare della dimensione media degli oggetti, mentre tende ad assumere maggiore importanza il contributo della media e della dissomiglianza.

Le prestazioni dell'algoritmo di classificazione che integra questi tre descrittori statistici di tessitura sono significativamente correlate con la scala di segmentazione. Si assiste, infatti, ad un tendenziale incremento della separazione tra le classi e dell'accuratezza tematica della classificazione in rapporto all'aumento delle dimensioni medie degli oggetti, relazione che vale fintantoché l'elevazione del fattore di scala non determina un deterioramento dell'accuratezza geometrica.

Questa relazione suggerisce di orientare la calibrazione dei parametri di segmentazione verso una minor frammentazione dell'immagine, pur sempre entro limiti che garantiscano il requisito della coerenza degli oggetti generati con la rappresentatività delle classi di interesse. La riduzione del numero degli oggetti, assieme al miglioramento dell'accuratezza tematica della classificazione semi-automatica, consente di contenere sensibilmente i tempi della successiva revisione manuale e di rendere l'intera procedura scalabile su ampi comprensori.

Ringraziamenti

Ritengo doveroso menzionare l'importante contributo dei revisori, i cui commenti hanno consentito un sostanziale miglioramento dei contenuti del manoscritto.

Bibliografia

- Amadesi E. (1977) - *Fotointerpretazione e aerofotogrammetria*. Pitagora Editrice, Bologna.
- Chirici G., Corona P. (2006) - *Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali*. Aracne Editrice, Roma.
- Chirici G., Barbati A., Corona P., Lamonaca A., Marchetti M., Travaglini D. (2006) - *Segmentazione di immagini telerilevate multirisoluzione per la derivazione di cartografie di uso/copertura del suolo multiscala*. Rivista Italiana di Telerilevamento, n. 37: 113-136.
- Baatz M., Benz U., Deghani S., Heynen M., Höltje A., Hofmann P., Lingenfelder I., Mimler M., Sohlbach M., Weber M., Willhauck G. (2001) - *eCognition user guide*. Definiens Imaging GmbH, Monaco.
- Congalton R. G. (1991) - *A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, vol. 37: 35-46. doi:10.1016/0034-4257(91)90048-B
- Corona P., Carraro G., Portoghesi L., Bertani R., Disegna M., Ferrari B., Marchetti M., Fincati G., Alivernini A. (2010) - *Pianificazione forestale di indirizzo territoriale, metodologia e applicazione sperimentale all'altopiano di Asiago*. Regione del Veneto, Università degli Studi della Tuscia, Piccoli Giganti Edizioni, Castrovillari.
- Gennaretti F., Pelorosso R., Ripa M. N., Recanatesi F., Leone A. (2009) - *Mappe di copertura delle terre da foto aeree: metodologia object-oriented per lo studio delle dinamiche del paesaggio*. Memorie del IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria.
- Giuliarelli D, Corona P, Lamonaca A (2007) - *Sperimentazione di tecniche object oriented per la classificazione di uso/copertura del suolo Corine Land Cover da immagini satellitari a media*

- risoluzione. *Forest@*. 4 (3): 272-282. doi:10.3832/efor0471-0040272
- Gomarasca M.A. (2004) - *Elementi di geomatica*. Associazione Italiana di Telerilevamento, Milano.
- Grignetti A., Coaloa D., Niccolini G. (2009) - *Classificazioni delle superfici coltivate a pioppo mediante immagini satellitari ad elevata risoluzione spaziale*. *Forest@*, 6: 299-311. doi:10.3832/efor0590-006
- Hall-Beyer M. (2007) - *GLCM tutorial home page*. [online] url: www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm.
- Halounová L. (2003) - *Textural classification of B&W aerial photos for the forest classification*. Remote sensing laboratory, CTU Prague, Czech Republic.
- Halounová L. (2004) - *The automatic classification of B&W aerial photos*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX.
- Haralik R.M., Shanmugam K., Dinstein I. (1973) - *Textural features for images classification*. IEEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. 6.
- Keller J.M., Chen S., Crownover R.M. (1989). *Texture Description and Segmentation through Fractal Geometry*. Computer Vision, Graphics and Image Processing. 45:150-166. doi:10.1016/0734-189X(89)90130-8
- Laliberte A., Rango A. (2009) - *Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 47: 761-770. doi:10.1109/TGRS.2008.2009355
- Lamonaca A. (2006) - *Utilizzo di immagini Quickbird per il monitoraggio annuale della superficie forestale*. L'Italia Forestale e Montana. 61 (2): 119-132. doi:10.4129/IFM.2006.2.02
- Mancini F., De Giglio M., Nurra M. (2008) - *Indagini di carattere ambientale attraverso l'analisi di dati multispettrali Landsat e Terra-ASTER*. Rivista Italiana di Telerilevamento. 40(3): 39-53.
- Navulur K. (2007) - *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Peddle D. R., Franklin S. E. (1989). *High resolution satellite image texture for moderate relief terrain analysis*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symp., Vancouver, Canada, vol. 2.
- Preto G. (1994) - *Problematiche connesse alla qualità della foto-interpretazione forestale*. Associazione Italiana di Telerilevamento. Atti del Convegno: Il telerilevamento per lo studio e la pianificazione forestale, Bressanone.
- Savio D. (2011) - *Integrazione di immagini telerilevate e di altre basi informative per l'analisi delle dinamiche spaziali dei soprassuoli forestali. Applicazione al caso studio dell'Altopiano dei Sette Comuni*. Tesi di Dottorato in Nuove Tecnologie e Informazione Territorio & Ambiente, Ciclo XXIII, Università IUAV di Venezia.
- Trianni G. (2005) - *Definizione automatica della scala spaziale per la segmentazione di immagini SAR in ambiente urbano*. Atti della Scuola di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Napoli.

Received 08/02/2011, accepted 22/05/2011