

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA



DIPARTIMENTO di SCIENZE dell'AMBIENTE FORESTALE e delle sue RISORSE

DOTTORATO DI RICERCA IN ECOLOGIA FORESTALE XXI CICLO

UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE PER IL MONITORAGGIO DELLE SUPERFICI TAGLIATE A RASO IN BOSCHI CEDUI

SSD "AGR/05 Assestamento forestale e Selvicoltura"

Coordinatore: Prof. Paolo De Angelis

Tutor: Prof. Piermaria Corona

Dottorando: Dott. Diego Giuliarelli

Dicembre 2008

Alla mia famiglia

Ringraziamenti

Per l'assistenza durante l'esecuzione dei rilievi desidero ringraziare la dr.ssa Iris Biondi, la dr.ssa Maria Vincenza Chiriaco, il dr. Alessandro Alivernini e il dr. Walter Mattioli.

Per i preziosi suggerimenti e osservazioni ringrazio il prof. Piermaria Corona, il prof. Gherardo Chirici e il dr. Andrea Lamonaca.

Per il supporto e la collaborazione prestata ringrazio il dr. Livio Rossi e il dr. Daniele Biscontini di Telespazio S.p.A.

INDICE

1. Introduzione
 - 1.1. Rilevamento statistico per il monitoraggio delle utilizzazioni forestali
 - 1.2. Telerilevamento quale strumento di monitoraggio
 - 1.3. Motivazioni dello studio
 - 1.4. Struttura della tesi
2. Sperimentazioni preliminari
 - 2.1. Sperimentazione di tecniche object-oriented per la classificazione di uso/copertura del suolo
Corine Land Cover da immagini satellitari a media risoluzione
 - 2.1.1. Metodologia
 - 2.1.1.1. Segmentazione automatica
 - 2.1.1.2. Classificazione object-oriented
 - 2.1.1.3. Tesi sperimentali
 - 2.1.2. Risultati
 - 2.1.2.1. Accuratezza tematica
 - 2.1.2.2. Tempi e costi di lavoro
 - 2.1.3. Considerazioni
 - 2.2. Utilizzo di immagini VHR con tecniche object-oriented per il monitoraggio della superficie forestale
 - 2.2.1. Metodologia
 - 2.2.2. Risultati
 - 2.2.3. Considerazioni
3. Aspetti generali
 - 3.1. Area di studio
 - 3.2. Gestione forestale
 - 3.3. Normativa sulle utilizzazioni forestali
 - 3.3.1. Procedura amministrativa dei tagli boschivi
4. Materiali
 - 4.1. Sensore SPOT5
 - 4.2. Pre-elaborazioni
 - 4.2.1. Correzione geometrica
 - 4.3. Dati ancillari
5. Metodi
 - 5.1. Mappatura delle superfici tagliate a raso mediante interpretazione a video
 - 5.1.1. Validazione
 - 5.2. Acquisizione delle statistiche ufficiali delle dichiarazioni di taglio dei cedui

- 5.3. Confronto tra superfici tagliate a raso mappate mediante immagini SPOT5 e statistiche amministrative ufficiali
- 5.4. Classificazione semi-automatica delle tagliate a raso
 - 5.4.1. Processamento delle immagini
 - 5.4.1.1. Indici normalizzati
 - 5.4.1.2. Analisi delle componenti principali
 - 5.4.2. Tecniche object-oriented
 - 5.4.3. Tecniche pixel-oriented
 - 5.4.4. Protocollo sperimentale
- 6. Risultati
 - 6.1. Confronto tra superfici tagliate a raso mappate mediante immagini SPOT5 e statistiche amministrative ufficiali
 - 6.2. Classificazione semi-automatica delle superfici tagliate a raso
 - 6.2.1. Classificazioni pixel-oriented
 - 6.2.2. Classificazioni object-oriented
- 7. Discussione
 - 7.1. Confronto tra superfici tagliate a raso mappate mediante immagini SPOT5 e statistiche amministrative ufficiali
 - 7.1.1. Proposta di procedura di calibrazione statistica del rilievo amministrativo delle utilizzazioni dei cedui attraverso l'impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione
 - 7.2. Classificazione semi-automatica delle tagliate a raso
 - 7.2.1. Comparazione di algoritmi di classificazione pixel-oriented
 - 7.2.2. Object-oriented vs pixel-oriented
 - 7.2.3. Importanza della normalizzazione radiometrica
 - 7.2.4. Effetti generati dall'integrazione del dato multitemporale SPOT5 con l'indice NDVI
 - 7.2.5. Effetti generati dalla sostituzione del dato multitemporale SPOT5 con bande sintetiche
- 8. Considerazioni conclusive
 - 8.1. Principali criticità riscontrate
 - 8.2. Proposte operative

Bibliografia

1. INTRODUZIONE

1.1 RILEVAMENTO STATISTICO PER IL MONITORAGGIO DELLE UTILIZZAZIONI FORESTALI

La grande attenzione dell'opinione pubblica e gli accordi internazionali stipulati nel corso dell'ultimo ventennio in materia di tutela ambientale conferiscono alle statistiche forestali, nonostante la loro specificità, una importanza crescente all'interno delle politiche nazionali e internazionali.

In questo contesto assumono particolare rilevanza le statistiche sui tagli boschivi quali strumento per il monitoraggio della sostenibilità dell'utilizzo delle risorse, la valutazione delle politiche di settore e la contabilità del carbonio atmosferico fissato negli ecosistemi forestali.

In Italia la rilevazione delle superfici boschive utilizzate fa parte di un programma di indagine di statistica forestale avviato sin dalla prima metà del secolo scorso e più volte revisionato per adattarlo alle esigenze e caratteristiche di un settore in continua trasformazione sotto l'impulso dello sviluppo economico, dei cambiamenti negli indirizzi di politica di settore e del trasferimento delle competenze dallo Stato alle Regioni, da un lato, e dallo Stato all'Unione Europea e alle Nazioni Unite dall'altro.

Fino ai primi anni 70 l'utilizzo delle risorse forestali era monitorato e regolamentato dallo Stato tramite il Corpo Forestale dello Stato (CFS) che di fatto rappresentava l'unico depositario di tutte le informazioni necessarie all'elaborazione delle statistiche forestali nazionali.

Successivamente il decentramento delle competenze dallo Stato alle Regioni, avvenuto con DPR n. 11/1972, DPR n. 616/1977 e ribadito dalle recenti modifiche all'art. 117 della Carta Costituzionale, ha determinato una diversificazione sul territorio delle procedure di autorizzazione del taglio e della qualità del controllo ad opera delle Autorità competenti per effetto di una differente distribuzione delle risorse.

Attualmente, in base a consuetudine o tramite apposite convenzioni, la registrazione a fini statistici dei prelievi legnosi dai soprassuoli forestali è dalle Regioni in genere affidata al CFS e ai Corpi Forestali delle Regioni/Province Autonome. A tal fine, i Comandi Stazione di questi Corpi compilano trimestralmente un apposito modello denominato ISTAT_FOR in cui riportano i dati dei tagli boschivi per il territorio di loro giurisdizione, sulla base delle dichiarazioni e autorizzazioni al taglio loro trasmesse dagli enti competenti. I modelli ISTAT_FOR sono poi conglobati a livello provinciale e trasmessi all'ISTAT per alimentare le annuali statistiche del Sistema Statistico Nazionale (SISTAN) sulle utilizzazioni forestali.

Le dichiarazioni di taglio e le autorizzazioni al taglio hanno dunque anche una peculiare funzione di registrazione statistica dei dati sui tagli boschivi: la fonte di informazione risulta così collegata non a un'indagine campionaria sugli operatori economici e sulle superfici forestali, ma a un rilievo censuario che coincide appunto con il processo amministrativo di autorizzazione al taglio (Pettenella & Speziali 2004).

1.2 TELERILEVAMENTO QUALE STRUMENTO DI MONITORAGGIO

Con il termine telerilevamento viene indicata l'acquisizione di dati della superficie terrestre dall'atmosfera o dallo spazio e l'insieme dei metodi e delle tecniche per la successiva elaborazione ed interpretazione (Gomarasca, 2004).

Il telerilevamento rappresenta quindi uno strumento di notevole supporto alle attività di monitoraggio, permettendo di disporre di dati anche su vaste superfici a intervalli di tempo regolari, evidenziando, a costi relativamente contenuti e nel modo più sicuro, processi in atto anche in aree difficilmente accessibili.

Il telerilevamento opera con sensori che captano la radiazione elettromagnetica e la convertono in segnali elettrici interpretabili: i sensori passivi misurano la radiazione solare riflessa dagli oggetti presenti al suolo, mentre quelli attivi agiscono con una propria sorgente di segnale la cui intensità di ritorno dopo l'impatto con l'oggetto al suolo viene misurata da un detector a bordo della medesima piattaforma o di altra piattaforma remota. I sensori passivi attualmente godono di una più ampia diffusione; tuttavia negli ultimi anni si riscontra un crescente interesse anche per applicazioni di tipo forestale dei sistemi attivi e in particolare di quelli LIDAR e RADAR.

Nel presente studio l'attenzione si focalizza sul telerilevamento ottico (passivo). Questo si fonda sulla possibilità di differenziare e analizzare alcune caratteristiche chimico fisiche degli elementi che compongono il paesaggio in base alla diversa intensità di riflessione mostrata da ciascuna superficie in funzione della lunghezza d'onda della radiazione solare incidente.

L'energia del sole riflessa dalle aree investigate viene acquisita dal sensoreradiometro e trasformata in un segnale elettrico che viene poi convertito, attraverso un processo di discretizzazione, in matrici digitali. Il dato matriciale digitale viene quindi ancora riconvertito via software, per ricreare l'immagine della porzione territoriale di interesse acquisita.

Nell'ambito dello studio delle risorse forestali, un particolare contributo informativo è apportato dalle lunghezze d'onda del verde, del rosso e del vicino infrarosso: in questi intervalli la vegetazione presenta un forte assorbimento nel rosso, riflette mediamente la radiazione del verde e intensamente quella dell'infrarosso vicino (Gomarasca, 2004). Ciò è dovuto dai meccanismi di scambio fotosintetico a livello fogliare dove la presenza di clorofilla condiziona fortemente la curva di riflettività. La firma spettrale della vegetazione, ossia la sua risposta alle differenti lunghezze d'onda di radiazione incidente, è tipica per ogni specie e le variazioni che si riscontrano dipendono essenzialmente dallo stato di salute, dalla fenologia e dal tipo di suolo; tuttavia a parità di condizioni sono riscontrabili per una stessa specie vegetale risposte alla luce solare differenti nei diversi punti della terra, entrando in gioco fattori climatici, geografici e atmosferici. In genere la riflettanza della vegetazione nella porzione del visibile dello spettro elettromagnetico è più alta in primavera e in autunno rispetto che in estate. Tali variazioni nel tempo sono meno significative considerando l'infrarosso vicino.

La gamma di immagini telerilevate utilizzabili per il monitoraggio della vegetazione forestale è molto ampia. Fino a tempi recenti il riferimento primario è stato rappresentato dalle foto aeree. Nel caso del monitoraggio

periodico di aree molto vaste, esse sono però in genere di acquisizione più complessa rispetto alle immagini satellitari. Di conseguenza nel settore delle applicazioni forestali è rapidamente cresciuto negli ultimi anni anche l'impiego di immagini satellitari, per la possibilità di supportare, a costi compatibili, una restituzione multitemporale sufficientemente affidabile di attributi sia qualitativi, quali la composizione specifica o lo stadio di sviluppo delle cenosi boschive, che quantitativi, quali la massa legnosa o la densità di copertura.

I sistemi di osservazione ottica dallo spazio oggi sono configurati su modalità operative in grado di fornire informazioni di elevata qualità anche a media e grande scala (Chirici & Corona, 2006). Le principali applicazioni operative nel settore forestale si basano appunto su immagini satellitari con risoluzione geometrica media e alta (es.: 15 m per Landsat 7; 6 m per IRS-1C e Spot4; 2,5 m per Spot5; 1-4 m per Quickbird e Ikonos2), caratterizzate da un sensibile miglioramento sia del rapporto segnale/rumore, sia del contenuto informativo del segnale stesso, raggiungendo in alcuni casi una profondità di memoria pari a 11 bit per ogni pixel dell'immagine (es. Quickbird e Ikonos 2).

La produzione di cartografia di uso e copertura del suolo è il settore forestale maggiormente interessato alla disponibilità di immagini satellitari per l'osservazione della Terra. Orientativamente, i dati satellitari a più alta risoluzione quali quelli di QuickBird e Ikonos2 sono indicati per la realizzazione di cartografie a grande scala (1:5.000, 1:10.000), mentre per scale di medio dettaglio (1:25.000, 1:50.000) il dato Spot5 rappresenta un buon compromesso in termini di rapporto qualità-costi. Il satellite Landsat è stato operativamente utilizzato soprattutto per la produzione di cartografie a scale comprese tra 1:50.000 e 1:250.000; a questo livello di scala operano oggi i satelliti IRS-1C e -1D. I satelliti a bassa e bassissima risoluzione geometrica (es.: 180 m per IRS-WiFS; 250 m per Modis Terra e Aqua; 1 km per NOAA AVHRR e Spot Vegetation) sono impiegati per la produzione di cartografia a scala inferiore o uguale a 1:500.000, cioè per cartografie delle coperture forestali a livello continentale o globale.

Oltre al suddetto utilizzo le possibilità offerte dal telerilevamento in risposta alle esigenze informative sorte in seguito ai recenti accordi internazionali sono molteplici.

Il ricorso a tale tecnologia è ormai pratica affermata nell'inventario delle risorse forestali su piccola e vasta scala. Mentre in altri paesi (es. Canada, Svezia, Russia ecc.) è consolidato l'utilizzo di immagini satellitari negli inventari forestali nazionali, nel nostro paese è più frequente l'impiego di ortofoto digitali aeree in bianco e nero e a colori, utilizzate ad esempio per la classificazione delle categorie tipologiche di prima fase dell'Inventario Nazionale italiano delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC; <http://www.infc.it>). Recenti sperimentazioni evidenziano tuttavia come a fini inventariali l'interpretazione a video di immagini satellitari ad alta risoluzione possa sostituirsi efficacemente al tradizionale impiego di ortofoto aeree (Travaglini *et al.*, 2003).

Immagini ad alta e altissima risoluzione trovano altresì impiego nella pianificazione di dettaglio, essendo di supporto alla valutazione dello stato delle risorse, alla spazializzazione di attributi dendroauxometrici rilevati all'interno di aree di saggio, alla definizione degli orientamenti culturali e al controllo degli interventi.

Progetti quali Kyoto-Inventory e GSE-Forest Monitoring (GSE-FM), finanziati dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), dimostrano l'importanza attribuita al telerilevamento per il monitoraggio dei cambiamenti di

uso del suolo che possono contribuire al bilancio delle emissioni. Fenomeni di afforestazione, riforestazione e deforestazione possono essere utilmente valutati mediante l'utilizzo di immagini satellitari a media e alta risoluzione (Hayashi M. *et al.*, 2007). Di peculiare interesse è la possibilità di stimare attraverso i suddetti dati l'efficienza funzionale dei soprassuoli forestali attraverso l'analisi della loro produttività primaria, anche ai fini della stima del carbonio atmosferico da questi fissato. A ciò si può aggiungere l'importante ruolo svolto dalle immagini telerilevate in relazione alla prevenzione e monitoraggio degli incendi boschivi. Le applicazioni in questo caso vanno dalla perimetrazione delle aree bruciate, al monitoraggio della variazione nel tempo della struttura della vegetazione post-incendio (Chirici *et al.*, 2008), fino alla derivazione di mappe del rischio di incendio basate sulla stima della quantità e tipologia di combustibile presente al suolo (Chuvieco *et al.*, 2002).

Quanto riportato rappresenta solo una sintesi dei principali impieghi che il telerilevamento satellitare attualmente trova in ambito forestale. Grazie alla profonda e continua innovazione tecnologica registrata negli ultimi anni, il telerilevamento si presenta oggi come uno strumento destinato a giocare un ruolo fondamentale per il soddisfacimento della domanda informativa, sorta in seguito ai recenti accordi internazionali, connessa all'ecosistema forestale.

1.3 MOTIVAZIONI DELLO STUDIO

Negli ultimi anni si registra un crescente interesse verso un miglioramento delle conoscenze sui patrimoni forestali in termini qualitativi e quantitativi. I punti di riferimento, per ciò che concerne le esigenze informative sono molteplici, in particolare le tre grandi convenzioni sull'ambiente globale scaturite dalla Conferenza di Rio de Janeiro del 1992 "Ambiente e Sviluppo": Convenzione sulla diversità biologica (CBD); Convenzione sui cambiamenti climatici (UNFCCC), da cui successivamente è scaturito il Protocollo di Kyoto; Convenzione per la lotta alla desertificazione (UNCCD). Inoltre particolare rilevanza assume il processo paneuropeo relativo alla gestione sostenibile delle foreste, ratificato nella Conferenza Ministeriale per la Protezione delle Foreste in Europa (MPCFE). Nell'ambito di queste tre convenzioni e del processo MPCFE, le foreste rappresentano un elemento primario di comune interesse, verso cui tutti gli Stati sono obbligati ad una esauriente attività di monitoraggio nel tempo.

A livello comunitario la necessità di disporre di informazioni aggiornate e accurate sul patrimonio forestale è ribadito anche dall'istituzione di un Centro Dati Forestali Europeo, finalizzato al monitoraggio di questi ecosistemi sia per gli aspetti ambientali che di funzione sociale e di sfruttamento economico.

Le azioni comunitarie, attraverso le misure sullo sviluppo rurale, generano a loro volta una articolata domanda informativa sullo stato e sfruttamento attuale e futuro del patrimonio forestale.

L'attuale sistema statistico forestale nazionale tuttavia non risponde ancora in termini di accuratezza al fabbisogno informativo descritto. Le stime derivano infatti per lo più da fonti amministrative che non

consentono di fornire una valutazione quantitativa della loro precisione. Tra le statistiche forestali ufficiali quelle relative al prelievo legnoso appaiono affette da maggiore incertezza.

Di fatto, da vari anni viene segnalata l'inadeguatezza dei dati nazionali sui prelievi legnosi, che appaiono sottostimati soprattutto per quanto concerne il legname da combustibile (Cutolo 2000, Hellrigl 2002, Corona *et al.*, 2004). Questo assortimento è prevalentemente prodotto da boschi governati a ceduo, quasi esclusivamente rappresentati da soprassuoli coetanei la cui utilizzazione a fine turno avviene a taglio raso (Ciancio & Nocentini 2004), con o, molto meno frequentemente, senza rilascio di matricine.

Esiste quindi l'esigenza di una profonda innovazione dell'approccio investigativo al fine di renderlo adeguato a soddisfare le esigenze conoscitive.

Scaturisce pertanto l'opportunità di sperimentare tecniche di monitoraggio delle superfici tagliate che consentano di ottenere dati oggettivi, raggiungendo il grado di precisione richiesto, individuando procedure che siano agevolmente replicabili a livello operativo.

Per le intrinseche caratteristiche, un valido strumento di supporto a tal fine è rappresentato dal telerilevamento, e in particolare dalle immagini satellitari ad alta risoluzione (Chirici & Corona 2006).

Questo tipo di immagini permettono di condurre analisi multitemporali e multispettrali ai fini della mappatura dei cambiamenti occorsi alla copertura forestale, inclusi i tagli a raso (Coppin & Bauer, 1996).

Numerose sono le prove sperimentali riportate in bibliografia relative al monitoraggio delle superfici utilizzate mediante l'applicazione, a differenti tipi di immagini e ambienti forestali, di processi di interpretazione o di tecniche di *change detection* e analisi delle serie temporali (Heikkonen & Varjo, 2004; Hayes & Sader, 2001; Jin & Sader, 2005; Saksa *et al.*, 2003; Wilson & Sader, 2002; Wulder *et al.*, 2004). Nessuna di queste prove tuttavia è stata sviluppata in ambiente mediterraneo dove la principale forma di governo forestale è il ceduo.

Scopo della presente tesi è di sperimentare l'impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica per il monitoraggio dei tagli a raso condotti in boschi cedui dell'Italia centro-meridionale, dove sono particolarmente diffusi (INFC, 2007) e dove localmente da alcuni anni le utilizzazioni forestali sono ritornate intense.

In particolare l'attività sviluppata nell'ambito del progetto *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), *Service Element* (SE): *Forest Monitoring* è finalizzata a: (i) valutare le potenzialità operative di immagini satellitari ad alta risoluzione per la mappatura mediante interpretazione a video dei tagli a raso condotti all'interno di boschi cedui; (ii) confrontare i risultati della mappatura prodotta con le statistiche ufficiali sui prelievi legnosi; (iii) metter a punto un sistema di correzione (calibrazione) dei dati delle statistiche ufficiali; (iiii) testare l'accuratezza di differenti metodi di classificazione semi-automatica di immagini satellitari per la delineazione delle superfici boschive tagliate a raso.

1.4 STRUTTURA DELLA TESI

Il presente elaborato è stato impostato in modo da illustrare le diverse fasi della sperimentazione condotta, secondo un ordine logico-procedurale.

In primo luogo vengono riportati i risultati di sperimentazioni preliminari volte a testare l'efficacia di tecniche di pre-elaborazione e classificazione semi-automatica di immagini satellitari a media e alta risoluzione.

Segue la presentazione del caso di studio oggetto della presente tesi. Inizialmente sono descritti i caratteri salienti dell'area esaminata, la gestione e la normativa forestale per essa vigente (vd. § 3) nonché i dati utilizzati per la sperimentazione (vd. § 4).

In particolare si è scelto di utilizzare immagini satellitari multispettrali SPOT5 in quanto attualmente presentano, nel segmento delle immagini ad alta risoluzione, il miglior rapporto qualità/prezzo tra quelle disponibili sul mercato, proponendosi quindi operativamente come l'alternativa più valida al tradizionale impiego delle ortofoto aeree.

Viene poi esposta la metodologia adottata per la mappatura delle superfici tagliate a raso mediante interpretazione a video del dato SPOT5 (vd. § 5.1) e la relativa validazione (vd. § 5.1.1) attraverso la quale è stato possibile accertare l'applicabilità della cartografia prodotta per: valutare le possibili discrepanze con la statistica amministrativa; verificare l'accuratezza raggiunta dalle differenti procedure di classificazione semi-automatica delle tagliate. Segue quindi la descrizione della metodologia adottata per: il confronto tra le superfici tagliate cartografate per interpretazione a video e le statistiche amministrative ufficiali (vd. § 5.3); la classificazione semi-automatica delle tagliate a raso (vd. § 5.4). Per quest'ultima procedura sono illustrate in dettaglio le elaborazioni applicate al dato multispettrale SPOT5 volte alla creazione di strati informativi di supporto per il corretto riconoscimento delle superfici utilizzate (vd. § 5.4.1), i processi di classificazione *object-oriented* e *pixel-oriented* (rispettivamente vd. § 5.4.2 e § 5.4.3) e il protocollo sperimentale impostato per testare l'efficienza delle tecniche esaminate (vd. § 5.4.4).

Successivamente sono presentati i risultati ottenuti dal confronto tra le superfici tagliate a raso mappate sulla base delle immagini multispettrali SPOT 5 e le statistiche ufficiali raccolte (vd. § 6.1) e i risultati dei differenti tipi di classificazione semi-automatica proposti (vd. § 6.2). Infine sono riportate le discussioni, con alcune indicazioni sul potenziale utilizzo operativo dei risultati (vd. § 7.1.1) e le considerazioni riepilogative e conclusive (vd. § 8).

2. SPERIMENTAZIONI PRELIMINARI

Nel seguente capitolo è descritta una sperimentazione preliminare finalizzata alla messa appunto di procedure di classificazione e monitoraggio dell'uso e copertura del suolo basate sull'applicazione di tecniche *object-oriented* ad immagini satellitari. L'introduzione relativamente recente di queste tecniche (Chirici *et al.*, 2003, Benz *et al.*, 2004) basate su poligoni generati dalla segmentazione automatica di immagini digitali ha aperto nuovi scenari sulle possibilità di derivare cartografie tematiche (vedi ad esempio: Dorren *et al.*, 2003, Mitri & Gitas 2006). Spostando l'analisi dal singolo pixel a insiemi di pixel, che assumono il significato di oggetti, l'approccio *object-oriented* permette di ampliare il contenuto informativo estraibile in modo automatico o semiautomatico dall'unità elementare di classificazione. La capacità di sfruttare informazioni come quelle di carattere tessiturale, statistico e soprattutto contestuale consente potenzialmente di generare prodotti cartografici competitivi per accuratezza tematica con quelli derivati per interpretazione visuale (Chirici *et al.*, 2006). La possibilità di ottenere un prodotto di tipo vettoriale, superando l'inevitabile soggettività dell'interprete per quanto concerne la delimitazione dei poligoni e la loro successiva attribuzione alle classi tematiche, rappresenta un ulteriore vantaggio offerto dall'approccio *object oriented*.

In particolare di seguito sono riportati due studi i cui risultati sono già stati pubblicati:

- nella prima sperimentazione l'approccio di classificazione *object-oriented* viene comparato con la tradizionale interpretazione a video per la derivazione di mappe di uso e copertura del suolo da dati satellitari a media risoluzione (Giuliarelli *et al.*, 2007);
- nella seconda sperimentazione la medesima tecnica di classificazione è applicata ad immagini satellitari ad alta risoluzione per l'individuazione dei cambiamenti occorsi alla superficie forestale esaminata nell'arco temporale di un anno (Giuliarelli *et al.*, 2007).

2.1 SPERIMENTAZIONE DI TECNICHE OBJECT-ORIENTED PER LA CLASSIFICAZIONE DI USO/COPERTURA DEL SUOLO CORINE LAND COVER DA IMMAGINI SATELLITARI A MEDIA RISOLUZIONE

Scopo del presente lavoro è valutare le potenzialità delle tecniche di segmentazione e classificazione *object oriented* per la produzione di cartografie di uso e copertura del suolo *Corine Land Cover* (CLC) in scala 1:100.000. Facendo riferimento, come caso di studio, a un'immagine Landsat 7 ETM+ vengono testate funzioni di classificazione implementate nel software *eCognition*, quali le *funzioni di appartenenza* e il classificatore *Standard Nearest Neighbour* (STD.N.N.). Le procedure proposte vengono confrontate con l'interpretazione visuale convenzionale sia in termini di accuratezza tematica che in termini di tempi per l'ottenimento del prodotto cartografico.

Lo studio interessa una superficie complessiva di circa 4000 km², principalmente nel territorio provinciale di Viterbo e Roma, e parzialmente in quello di Rieti e Terni. L'area di studio è stata scelta in modo da essere rappresentativa di gran parte delle classi di uso/copertura del suolo al 3° livello gerarchico CLC 2000 (EEA 2000). Al suo interno sono preponderanti le superfici agricole (70% dell'area esaminata) e i territori boscati e gli ambienti seminaturali (24% dell'area esaminata). La restante superficie è costituita da centri urbani, tra cui i principali sono quelli di Viterbo e Civitavecchia, e corpi idrici, quali il lago di Vico, il lago di Bracciano, un tratto del fiume Tevere e una piccola porzione del Mar Tirreno (Fig. 1). L'area di studio rappresenta un subset della scena Landsat 7 ETM+ 191-031 acquisita nel giugno 2001, come parte integrante del prodotto IMAGE2000, ortorettificato e ricampionato a 12,5 m per la banda pancromatica e a 25 m per le bande spettrali (Nunes de Lima 2005).

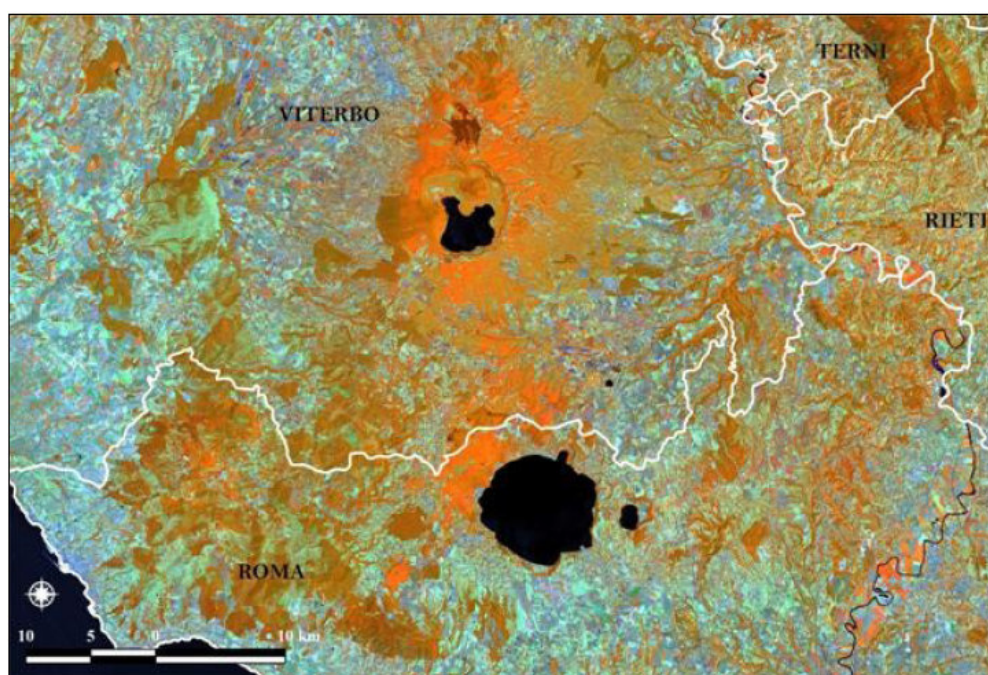


Figura 1 - Rappresentazione in falso colore dell'area di studio ottenuta per combinazione delle bande spettrali del vicino infrarosso, medio infrarosso e rosso del Landsat 7 ETM+ (RGB = 453).

2.1.1 Metodologia

2.1.1.1 Segmentazione automatica

Il processo di segmentazione automatica è stato calibrato in modo da ottenere oggetti conformi con il sistema di nomenclatura CLC 2000 (unità minima cartografabile: 25 ha). La scena Landsat è stata elaborata attraverso l'algoritmo *pan-sharpening* (Geomatica 2003) che fonde il dato pancromatico con il multispettrale, preservando le caratteristiche spettrali originali (Zhang 2002). La tecnica è basata sul metodo dei minimi quadrati per meglio approssimare le relazioni tra i valori di grigio delle immagini originali e

dell'immagine fusa. La procedura si è dimostrata utile soprattutto ai fini della successiva segmentazione in quanto incrementa la precisione di identificazione degli oggetti rispetto al medesimo processo basato solo su dati multispettrali (Lewinski 2006). L'algoritmo offre le migliori prestazioni quando vengono impiegate bande spettrali che per lunghezza d'onda ricadono nel *range* di acquisizione della banda pancromatica. In tal senso, le bande Landsat 7 ETM+ selezionate per l'elaborazione sono state quella del verde, del rosso e dell'infrarosso vicino. Dalla fusione sono scaturite tre nuove immagini con risoluzione geometrica della banda pancromatica e contenuto spettrale delle bande utilizzate. Utilizzando congiuntamente le tre immagini ottenute dal processo di *pan-sharpening* sono stati prodotti due livelli di segmentazione. Dapprima è stato realizzato un livello di segmentazione caratterizzato da un fattore di scala pari a 40 e da un peso attribuito all'eterogeneità geometrica e al fattore di compattezza pari rispettivamente a 0.2 e a 0.8. Successivamente è stato prodotto il secondo livello di segmentazione innalzando il fattore di scala a un valore di 60 e fissando il peso del fattore di compattezza a 0.6 (Fig. 2). Per entrambi i livelli di segmentazione è stato assegnato uno stesso peso relativo alle tre immagini *pansharpened*. Il primo livello ha generato 24103 poligoni di dimensione media pari a circa 16 ha (CV = 94%), accorpati nel secondo livello di segmentazione in 10906 poligoni di dimensione media pari a circa 36 ha (CV = 93%).

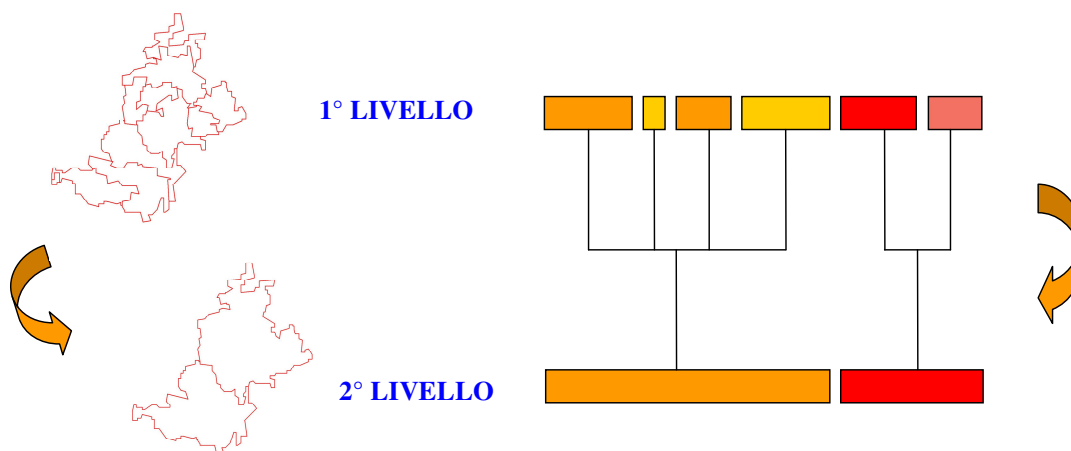


Figura 2 - Esempio di segmentazione multirisoluzione: i poligoni generati con il primo livello di segmentazione vengono successivamente accorpati per costituire un secondo livello gerarchico di segmentazione dell'immagine telerilevata.

2.1.1.2 Classificazione *object oriented*

La classificazione *object oriented* è stata condotta sulla base dei poligoni generati con il secondo livello di segmentazione adottando la nomenclatura di 3° livello gerarchico CLC (EEA 2000).

Dall'esame dell'area oggetto di studio si è stabilito di classificare quindici classi di uso/copertura del suolo (Tab. 1), tralasciando quelle che, pur presenti all'interno dell'area esaminata, erano tuttavia scarsamente rappresentate. È stato inoltre deciso di accorpare in una stessa classe i prati stabili (231) con i pascoli naturali

(321), le colture temporanee associate a colture permanenti (241) con sistemi colturali e particellari complessi (242) e le superfici cespugliate (322) con le aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione (324).

Tabella 1 - Nomenclatura Corine Land Cover (CLC) adottata per la classificazione dell'immagine Landsat 7 ETM+.

<i>Codice CLC</i>	<i>Classi CLC</i>
111	Zone residenziali a tessuto continuo
112	Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado
121	Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati
211	Seminativi
222	Frutteti
223	Oliveti
231 + 321	Prati stabili, aree a pascolo naturale e praterie di alta quota
241 + 242	Sistemi colturali e particellari complessi
243	Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
311	Boschi a prevalenza di latifoglie
312	Boschi a prevalenza di conifere
322 + 324	Brughiere, cespuglieti, aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione
511	Corsi d'acqua, canali e idrovie
512	Bacini d'acqua
523	Mari e oceani

La classificazione dell'immagine Landsat è avvenuta in ambiente *eCognition* applicando procedure *Nearest Neighbours* e funzioni di appartenenza con logica *fuzzy*, in maniera singola e combinata tra loro, per l'assegnazione delle classi ai singoli poligoni. La procedura STD.N.N. utilizza gli attributi di un set di poligoni interpretati a video (*training sites*) per sviluppare il classificatore e assegnare le classi ai rimanenti poligoni tramite approccio *nearest neighbours* (esempi applicativi in: Chirici *et al.* 2006, Lamonaca 2006). Ai fini dell'applicazione del classificatore STD.N.N. sono stati selezionati come *training sites* circa il 2% dei poligoni generati al 2° livello di segmentazione. La selezione degli attributi di classificazione è stata preceduta da analisi volte alla discriminazione delle classi: sulla base dei *training sites* selezionati, sono stati ottimizzati gli attributi estratti dalla banda pancromatica, dalle bande multispettrali e dalle immagini *pan-sharpened*. In tabella 2 sono riportati gli attributi utilizzati con il classificatore STD.N.N. Le funzioni di appartenenza adottate interessano attributi di carattere spettrale, geometrico e tessiturale. È stato fatto ricorso anche a funzioni che relazionano la classificazione degli oggetti considerati rispetto alla classificazione di altri oggetti.

Tabella 2 - Attributi utilizzati con il classificatore Standard Nearest Neighbour (STD.N.N.) per la classificazione dei poligoni generati con il secondo livello di segmentazione. Per la definizione dei singoli attributi si rimanda ai riferimenti bibliografici indicati.

<i>Attributo del poligono</i>	<i>Tipo</i>	<i>Banda / Canale</i>	<i>Riferimento</i>
Media spettrale	Spettrale	4 - 5	Chirici e Corona, 2006
Deviazione standard	Spettrale	1 - 4 - 7 - pancromatico	Chirici e Corona, 2006
Ratio	Spettrale	3 - 7	Baatz <i>et al.</i> , 2004
Massima differenza	Spettrale	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 7	Chirici e Corona, 2006
ZABUD1**	Spettrale	2 - 3 - 4 - 5 - 7 - pancromatico	Lewinski, 2006
Area	Geometrico		Chirici e Corona, 2006
Length / width	Geometrico		Baatz <i>et al.</i> , 2004
Border lenght	Geometrico		Baatz <i>et al.</i> , 2004
Rectangular fit	Geometrico		Baatz <i>et al.</i> , 2004
Density of sub-object: mean	Tessiturale		Baatz <i>et al.</i> , 2004
Asymmetry of sub-object: standard deviation	Tessiturale		Baatz <i>et al.</i> , 2004
GLCM: Homogeneity	Tessiturale	1 - pancromatico	Haralick, 1979
GLCM: Entropy	Tessiturale	2 - pancromatico	Haralick, 1979

** $ZABUD1 = \left[(ms2 - ms3)^2 + (ms3 - ms4)^2 + (ms4 - ms5)^2 + (ms5 - ms7)^2 + (ms7 - pan)^2 \right]^{0.5}$

dove: *ms2*, *ms3*, *ms4*, *ms5* e *ms7* rappresentano i valori medi dei Digital Number (DN) degli oggetti calcolati per i rispettivi canali Landsat; *pan* è il valore medio di DN degli oggetti calcolato per il canale pancromatico.

Le classi tematiche sono state organizzate secondo un'apposita struttura gerarchica (Fig. 3). In questo modo l'informazione associata alle classi di ordine superiore viene ereditata dalle classi figlie riducendo la ridondanza e la complessità delle informazioni necessarie per la descrizione delle classi stesse.

- Le zone urbane sono state classificate nel loro insieme sulla base di STD.N.N. e successivamente distinte al loro interno in *Zone residenziali a tessuto continuo* (111) e *Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado* (112) attraverso il parametro ZABUD1 (vd. Tab. 2). La ricerca delle aree urbane a tessuto continuo è stata inoltre limitata ai soli poligoni adiacenti a quelli classificati come tessuto urbano discontinuo e rado.
- *Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati* (121): classificate per mezzo di funzioni di appartenenza calcolate sulla media spettrale degli oggetti nella banda del blu.
- *Seminativi* (211): all'interno dell'immagine si riscontra la presenza sia di seminativi arati che di seminativi ricoperti da coltivazioni. La differenza di copertura rende difficile la contemporanea attribuzione di entrambe le realtà direttamente alla classe 211. Quindi per la classificazione si è

proceduto dapprima al riconoscimento di due sottoclassi applicando STD.N.N. e successivamente, tramite loro unione, alla definizione della classe seminativi.

- *Frutteti* (222), *Oliveti* (223) e *Prati, Pascoli e Praterie* (231+321): queste classi sono state definite sia con STD.N.N., sia limitandone la ricerca in uno spazio definito all'interno dell'immagine.
- *Sistemi colturali e particellari complessi* (241+242): classificati tramite STD.N.N.
- *Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti* (243): classificate tramite STD.N.N.
- Superfici boscate: le aree boscate sono state individuate nel loro complesso tramite STD.N.N. e solo successivamente suddivise, applicando funzioni di appartenenza, nelle classi *Boschi a prevalenza di latifoglie* (311) e *Boschi a prevalenza di conifere* (312). In particolare, nell'area esaminata è stato possibile ricondurre i boschi di conifere a un dato intervallo di valori assunti dal parametro *Ratio* calcolato per la banda 5; i boschi a prevalenza di latifoglie sono stati identificati come le aree boscate non classificate come conifere.
- *Brughiere, cespuglieti e aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione* (322+324): queste aree sono state classificate tramite STD.N.N. e limitando la ricerca alle aree circostanti a quelle boschive (EEA, 2000).
- *Corpi idrici* (5): la classificazione dei corpi idrici è avvenuta attraverso l'impiego di funzioni di appartenenza. Inizialmente è stato individuato l'insieme dei corpi idrici avvalendosi del parametro *Ratio* calcolato per la banda del blu. Successivamente da questa classe sono state derivate due sottoclassi: *Corsi d'acqua, canali e idrovie* (511), utilizzando parametri che prendessero in esame la forma dei sotto oggetti generati con il 1° livello di segmentazione, e la classe *Not Fiumi* ricorrendo all'inversione della funzione di similarità rispetto alla classe dei *Corsi d'acqua, canali e idrovie*. Quest'ultima classe racchiude al suo interno il tratto di mare e i laghi che ricadono nell'immagine. Le classi *Bacini d'acqua* (512) e *Mari e oceani* (523) sono state quindi estrapolate da essa sfruttando i diversi valori medi di DN che questi corpi assumono nel canale spettrale del blu.

Le classificazioni prodotte in automatico sono state successivamente sottoposte a una procedura di generalizzazione in ambito GIS (Jenness, 2006) tramite dissolvenza con i poligoni vicini, al fine di evitare la presenza di poligoni di superficie inferiore all'unità minima cartografabile, pari a 25 ha (con riferimento all'unità minima cartografabile del progetto CLC 2000, vd. EEA, 2000).

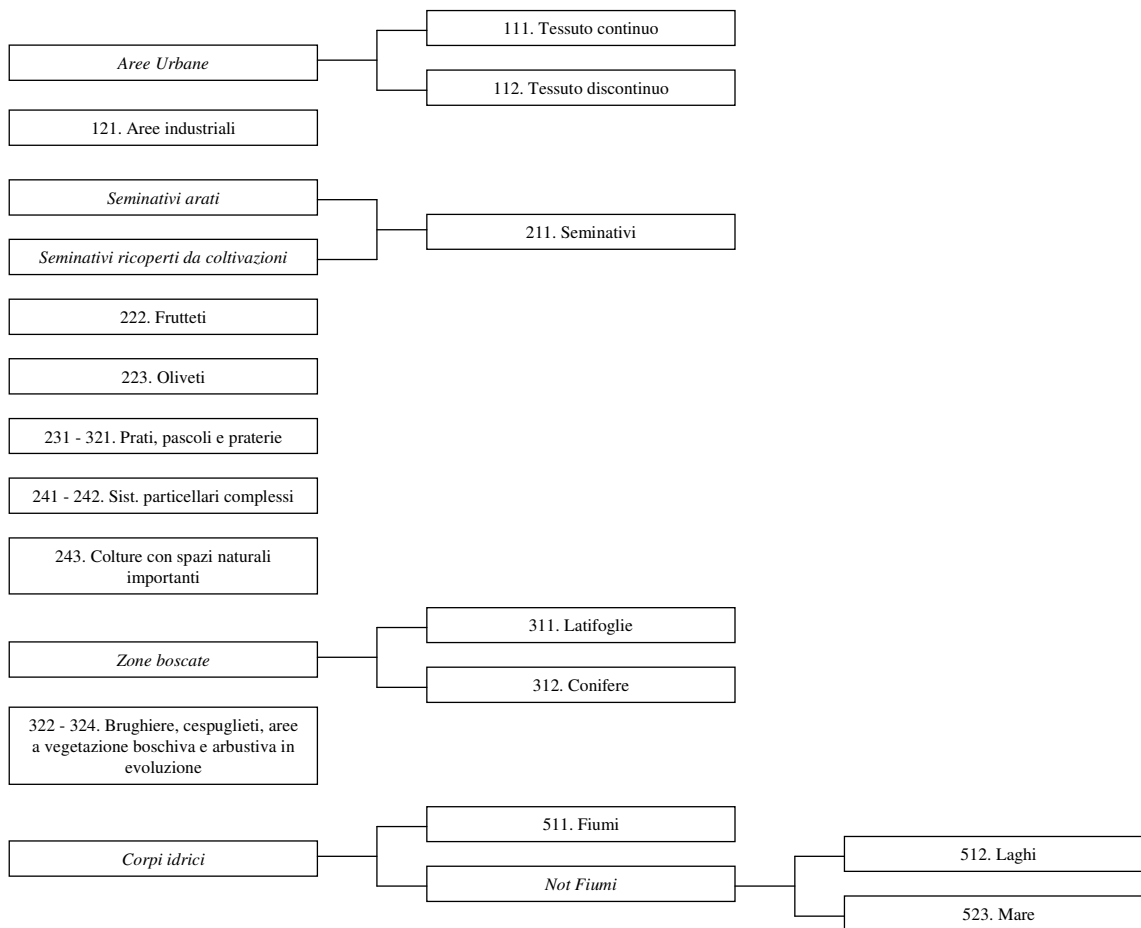


Figura 3 - Struttura gerarchica della nomenclatura CLC adottata per la classificazione *object oriented*.

2.1.1.3 Tesi sperimentali

La sperimentazione condotta ha previsto la realizzazione di un set di classificazioni, elaborate sulla base dell'immagine Landsat, per la valutazione comparativa delle *performances*, in termini di accuratezza tematica e tempi di lavoro, delle procedure di classificazione *object oriented* rispetto all'interpretazione a video, condotta in modo indipendente da un operatore esperto secondo lo standard convenzionale CLC (EEA, 2000). In entrambe le modalità di classificazione non sono stati utilizzati dati ancillari di supporto.

Sono state poste a confronto le seguenti tesi:

- I. classificazione con nomenclatura al 3° livello CLC;
- II. classificazione con nomenclatura al 2° livello CLC;
- III. classificazione con nomenclatura al 1° livello gerarchico CLC;
- IV. classificazione con nomenclatura mista, in cui, al 3° livello di approfondimento CLC adottato per le superfici boscate, è stato associato per tutte le restanti classi, il 2° livello CLC;
- V. classificazione con nomenclatura mista, in cui, al 3° livello di approfondimento CLC adottato per le superfici boscate, è stato associato per tutte le restanti classi il 1° livello CLC.

Le classificazioni con nomenclatura di ordine inferiore al terzo livello CLC sono state ottenute attraverso la generalizzazione della classificazione con legenda al terzo livello gerarchico.

La valutazione dell'accuratezza tematica di ciascuna modalità di classificazione è avvenuta tramite 150 fotoplot circolari, ciascuno di superficie pari a 50 ha, dislocati secondo uno schema di campionamento sistematico non allineato su una griglia di 5 km x 5 km (Bologna *et al.*, 2004). All'interno di ciascun fotoplot è stata definita la verità a terra per interpretazione a video della copertura ortofotografica digitale IT2000.

La concordanza delle classificazioni con la verità a terra è stata quantificata attraverso costruzione della matrice di classificazione degli errori e relativo calcolo degli indici *overall accuracy* (OA) e *Kappa index of agreement* (KIA):

$$OA = \frac{\sum_{j=1}^c n_j^*}{n}$$

con n_j^* uguale al numero di punti correttamente attribuiti alla j-esima classe tematica; n = numero totale di punti campione; c = numero di classi tematiche.

$$KIA = \frac{(OA - \theta)}{(1 - \theta)}$$

dove: $\theta = 1/n^2 \sum_{j=1}^c Tr_j Tc_j$; Tr_j = numero totale di punti sulla j-esima riga della matrice di classificazione degli errori; Tc_j = numero totale di punti sulla j-esima colonna della matrice di classificazione degli errori. L'indice KIA assume valore 1 nel caso di perfetta concordanza tra rappresentazione cartografica e verità a terra, valore 0 se la concordanza è di tipo casuale e valore negativo qualora la concordanza è inferiore a quella dovuta al caso.

La classificazione delle singole classi mappate è stata invece valutata mediante gli indici di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) (Chirici & Corona, 2006).

L'accuratezza per l'utilizzatore è data dal rapporto tra la somma dei pixel correttamente classificati in una classe e il numero totale di pixel attribuiti dalla carta a quella classe, corrispondenti rispettivamente al numero di pixel presenti sulla diagonale principale della matrice di classificazione degli errori e al numero totale dei pixel presenti sulla riga relativa alla classe stessa. L'accuratezza dell'utilizzatore è una stima della percentuale di elementi correttamente attribuiti dalla carta a una data classe tematica rispetto al totale degli elementi attribuiti dalla carta a quella classe. L'accuratezza per il produttore è data dal rapporto tra la somma dei pixel correttamente classificati in ciascuna classe e il numero totale di pixel sulla colonna di riferimento per quella classe. Tale rapporto rappresenta una stima della percentuale di elementi appartenenti a una data classe tematica che vengono correttamente codificati sulla carta.

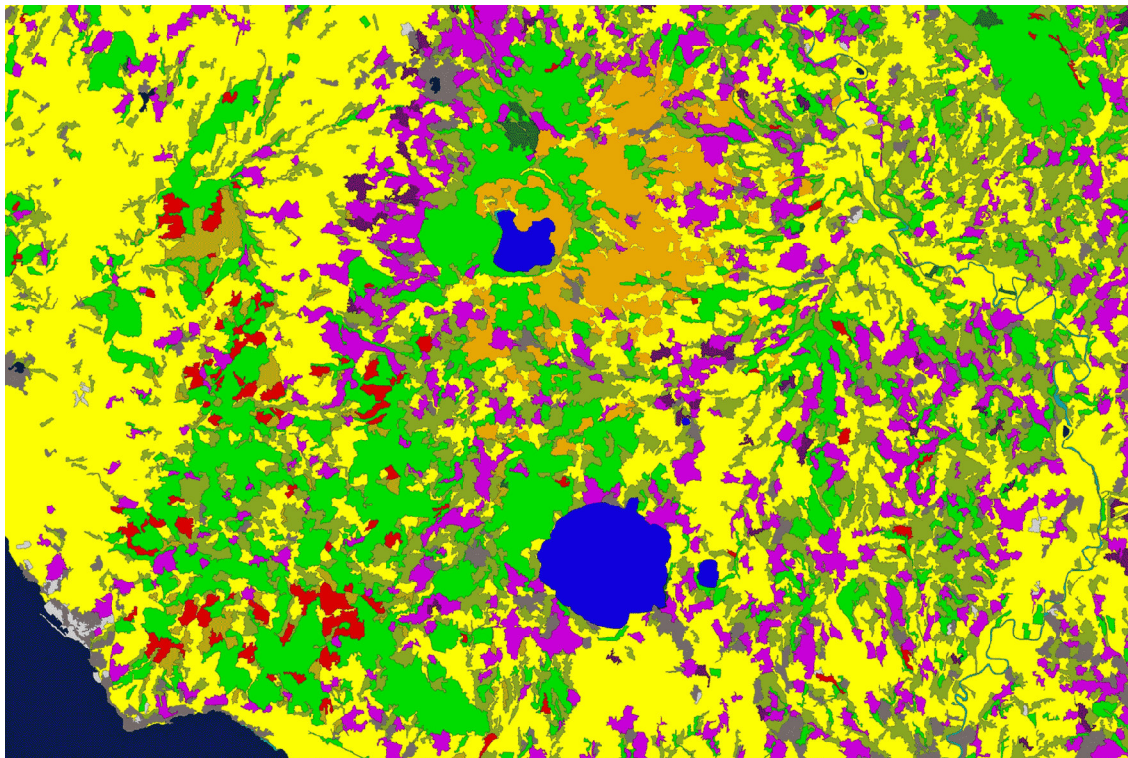
2.1.2 Risultati

2.1.2.1 Accuratezza tematica

Tra le modalità di classificazione sperimentate le migliori prestazioni sono state registrate per quelle *object oriented* generate sulla base del 1° livello CLC e sulla base della nomenclatura mista in cui le classi di 3° livello delle aree boscate sono combinate con le classi di 1° livello per le restanti superfici: in entrambi i casi sono stati riscontrati valori di OA pari a 0,93 (errore standard = 0,012) e valori di KIA pari a 0,84 (Tab. 3). Anche considerando il set di classificazioni generate per interpretazione visuale, i risultati migliori sono stati quelli ottenuti con la nomenclatura di 1° livello CLC (OA = 0,91 con errore standard = 0,012; KIA = 0,80). Per le classificazioni con nomenclatura CLC di 3° livello sono stati raggiunti valori di OA e KIA rispettivamente pari a 0,79 (errore standard = 0,019) e 0,74 con la procedura *object oriented* (Fig. 4), e pari a 0,67 (errore standard = 0,025) e 0,59 con la procedura per interpretazione visuale. Per quanto riguarda la nomenclatura CLC di 2° livello invece sono stati raggiunti valori di OA e KIA rispettivamente pari a 0,82 (errore standard = 0,019) e 0,76 con la procedura *object oriented*, e pari a 0,72 (errore standard = 0,023) e 0,64 con la procedura per interpretazione visuale.

Tabella 3 - Valori di *overall accuracy* (OA) e *Kappa index of agreement* (KIA) conseguiti per le singole tesi sperimentate.

Nomenclatura CLC	MODALITÀ DI CLASSIFICAZIONE			
	OBJECT-ORIENTED		INTERPRETAZIONE VISUALE	
	OA	KIA	OA	KIA
3° livello	0,79	0,74	0,67	0,59
2° livello	0,82	0,76	0,72	0,64
1° livello	0,93	0,84	0,91	0,80
3° bosco + 2° livello	0,82	0,76	0,72	0,64
3° bosco + 1° livello	0,93	0,84	0,89	0,77



Legenda

- 111. Zone residenziali a tessuto continuo
- 112. Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado
- 121. Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati
- 211. Seminativi
- 222. Frutteti e frutti minori
- 223. Oliveti
- 231+321. Prati, pascoli e praterie
- 241+242. Sistemi culturali e particellari complessi
- 243. Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
- 311. Boschi a prevalenza di latifoglie
- 312. Boschi a prevalenza di conifere
- 322+324. Brughiere, cespuglieti, aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione
- 511. Corsi d'acqua, canali e idrovie
- 512. Bacini d'acqua
- 523. Mari e oceani

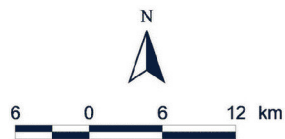


Figura 4 - Classificazione *object-oriented* dell'immagine Landsat 7 ETM+ sulla base della nomenclatura CLC di terzo livello.

Analizzando le singole classi, le procedure di classificazione testate hanno evidenziato difficoltà nell'identificare correttamente alcune categorie rappresentative di aree agricole e di aree di transizione al bosco (Tab. 4).

Considerando le classificazioni prodotte per il terzo livello CLC, la procedura *object oriented* offre livelli di accuratezza soddisfacenti per le classi rappresentative dei centri urbani a tessuto continuo (111), dei boschi di conifere (312) e dei corpi idrici (511, 512, 523) per le quali si sono riscontrati livelli di AP e AU pari o

prossimi a 1. Buoni sono anche i risultati di classificazione per i seminativi ($AP = 0,90$; $AU = 0,82$) e i boschi di latifoglie ($AP = 0,85$; $AU = 0,90$), mentre le peggiori prestazioni si registrano in termini di AP per le aree di transizione ($AP = 0,45$) e in termini di AU per gli oliveti ($AU = 0,50$). Tuttavia laddove il classificatore *object oriented* ha riscontrato difficoltà per la corretta identificazione delle classi anche l'interpretazione visuale si è dimostrata poco efficace.

Al 2° livello CLC le due modalità di classificazione hanno difficoltà nell'individuare le classi 22, 23 e 32, mentre la classificazione per interpretazione visuale confonde anche le classi 12 e 24. Al 1° livello CLC non si evidenziano particolari difficoltà.

Tabella 4 - Valori di accuratezza del produttore (AP) e dell'utilizzatore (AU) conseguiti nelle singole classi in funzione dei tre livelli gerarchici della nomenclatura CLC.

NOMENCLATURA	MODALITÀ DI CLASSIFICAZIONE			
	OBJECT ORIENTED		INTERPRETAZIONE VISUALE	
<i>3° livello CLC</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>
111	1.00	1.00	0.93	0.55
112	0.76	0.81	0.77	0.71
121	0.63	0.97	0.77	0.41
211	0.90	0.82	0.83	0.84
222	0.76	0.76	0.59	0.51
223	0.46	0.50	0.50	0.12
231 + 321	0.64	0.59	0.62	0.39
241 + 242	0.63	0.64	0.39	0.48
243	0.64	0.70	0.29	0.38
311	0.85	0.90	0.79	0.84
312	1.00	0.99	1.00	0.93
322 + 324	0.45	0.92	0.49	0.39
511	0.93	1.00	0.99	0.99
512	1.00	1.00	0.98	0.99
523	1.00	1.00	1.00	1.00
<i>2° livello CLC</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>
11	0.77	0.81	0.80	0.73
12	0.63	0.97	0.77	0.41
21	0.91	0.81	0.83	0.84
22	0.67	0.66	0.71	0.37
23	0.64	0.70	0.62	0.39
24	0.73	0.78	0.49	0.63
31	0.84	0.89	0.80	0.85
32	0.45	1.00	0.49	0.39
51	0.99	1.00	0.98	0.99
52	1.00	1.00	1.00	1.00
<i>1° livello CLC</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>
1	0.76	0.82	0.80	0.69
2	0.97	0.93	0.94	0.94
3	0.81	0.93	0.83	0.85
5	0.98	1.00	0.98	0.99

2.1.2.2 Tempi e costi di lavoro

I tempi richiesti per l'interpretazione visuale dell'area oggetto di studio sono risultati pari a circa 150 ore, mentre ai fini della classificazione *object oriented* sono state necessarie circa 200 ore di lavoro, di cui il 20% dedicato alla scelta dei parametri opportuni dell'algoritmo di segmentazione multirisoluzione, il 70% per la definizione delle funzioni di appartenenza e la selezione degli attributi ottimali da applicare al classificatore STD.N.N. e il 10% destinato alla realizzazione delle classificazioni e loro successiva validazione.

In tabella 5 sono riportati i costi per la realizzazione delle coperture CLC ricorrendo rispettivamente a procedure di classificazione automatiche e di interpretazione visuale dell'immagine.

Tabella 5 - Stima dei principali elementi di costo connessi alla realizzazione di classificazioni CLC tramite procedure automatiche di segmentazione e classificazione *object-oriented* nel caso di studio esaminato (valori aggiornati a gennaio 2007). ⁽¹⁾ Le immagini satellitari Landsat sono scaricabili gratuitamente presso il sito: <http://landsat.usgs.gov/index.php> (gennaio 2007). ⁽²⁾ Le ortofoto a colori sono visualizzabili online sul Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare: <http://www.pcn.minambiente.it/PCN/default.htm> (gennaio 2007). ⁽³⁾ Costo per utenti privati.

Tipologia	Descrizione	Costo <i>object oriented</i>	Costo interpretazione visuale
Materiale	Immagine satellitare multispettrale Landsat 7 ETM+	Scaricabile online ⁽¹⁾	
Materiale	Ortofoto a colori	Visualizzabili online ⁽²⁾	
Attrezzature	Software GIS per analisi di immagini con moduli per il preprocessamento dei dati	2000 €	
Attrezzature	Software per segmentazione e classificazione automatica <i>object-oriented</i>	12000 € ⁽³⁾	-
Personale	Classificazione per interpretazione visuale (1 € / km ²)	-	4000 €

2.1.3 Considerazioni

In termini di accuratezza tematica la modalità di classificazione *object oriented* tramite l'applicazione congiunta di STD.N.N. e di criteri parametrici ottiene risultati migliori rispetto alla classificazione realizzata per interpretazione visuale. Tale miglioramento è risultato tanto più accentuato quanto maggiore è il grado di dettaglio del sistema di nomenclatura.

A livello di singole classi, entrambe le procedure di classificazione evidenziano difficoltà nell'individuazione delle cosiddette classi "miste", ossia caratterizzate per definizione dalla presenza congiunta di più usi del suolo (ad esempio, la classe 243) e per quanto concerne altre superfici agricole utilizzate (ad esempio, la classe 223) e le aree cespugliate e arbustive in evoluzione (classe 322+324). Tuttavia, attraverso l'applicazione della classificazione *object oriented* si riscontrano per queste classi valori di AP e AU comunque superiori a quelli conseguiti per interpretazione visuale.

Generalmente il processo di segmentazione multirisoluzione permette di delimitare poligoni di superficie prossima all'unità minima cartografabile all'interno di macro-poligoni che presentano uso del suolo differente, al contrario dell'interpretazione visuale dove si osserva, invece, la tendenza ad accorpare, e quindi sovradimensionare, alcune classi. In alcuni casi, per rendere giustificabile l'esistenza di una classe, l'interprete tende ad accorpare usi del suolo differenti: esempi in tal senso sono le classi di codice 24* la cui delimitazione tramite interpretazione visuale appare comunque legata a scelte di tipo soggettivo.

Classi dal confine più netto, quali i centri urbani, le aree boschive e i corpi idrici, hanno limiti meno suscettibili di interpretazioni soggettive e la modalità di classificazione per interpretazione visuale è generalmente comparabile con quella *object oriented*.

L'utilizzo di procedure di *pan-sharpening* si è confermata utile al fine di incrementare la precisione delle operazioni automatiche di segmentazione preliminari alla classificazione *object oriented*. Al contrario, come atteso, il dato *pan-sharpened* non ha apportato in genere un significativo contributo nella fase di classificazione. L'utilizzo della banda pancromatica si è dimostrato di supporto alla classificazione automatica attraverso l'estrazione di caratteri tessiturali e statistici discriminanti delle classi adottate. Il dato pancromatico è stato inoltre utilizzato in combinazione con il dato multispettrale per il calcolo del parametro ZABUD1 (Lewinski, 2006), risultato particolarmente utile per l'identificazione delle classi urbane.

La combinazione di appropriate funzioni di appartenenza con il classificatore STD.N.N. ha permesso, rispetto alle classificazioni basate sull'utilizzo esclusivo di procedure *Nearest Neighbour* (Chirici e Corona, 2006), di ridurre al minimo il numero di poligoni di *training* da selezionare per la classificazione.

I tempi di realizzazione delle classificazioni di uso/copertura del suolo CLC sono risultati, nel caso in esame, superiori per le procedure di classificazione *object oriented* rispetto a quelle per interpretazione visuale. Tuttavia si tratta di tempi che tendono a ridursi, in termini relativi per unità di superficie, all'aumentare della dimensione dell'area cartografata, in quanto su di essi incide soprattutto la fase iniziale di individuazione degli attributi e parametri ottimali di classificazione.

In conclusione l'applicazione di procedure automatiche di segmentazione e classificazione *object oriented* rispetto all'interpretazione visuale risulta vantaggiosa in termini di maggiore accuratezza e oggettività di lavoro intesa come replicabilità dei risultati. A scapito dell'applicazione in ambito operativo rimane l'elevato grado di professionalità da parte degli operatori e l'investimento iniziale per l'acquisto di *software* dedicato, fattori che, di fatto, selezionano l'utenza.

2.2 UTILIZZO DI IMMAGINI VHR CON TECNICHE OBJECT-ORIENTED PER IL MONITORAGGIO DELLA SUPERFICIE FORESTALE

Obiettivo di questa sperimentazione è stata la valutazione delle potenzialità di procedure *object oriented* per la realizzazione di classificazioni di uso e copertura del suolo volte all'individuazione su immagini *QuickBird* degli eventi verificatisi a carico della superficie forestale.

Le classificazioni prodotte sono poi comparate tra loro per la produzione di un elaborato cartografico di sintesi (*cross-classification*) destinato a evidenziare unicamente i cambiamenti occorsi alla copertura forestale nell'arco temporale considerato.

La zona esaminata si estende su una superficie complessiva di circa 2215 ha nel comprensorio forestale dei Monti Cimini, nell'alto Lazio, in provincia di Viterbo (Fig. 5). L'area risulta coperta per circa un 80% da soprassuoli forestali, di cui oltre due terzi rappresentati da cedui semplici matricinati di castagno (*Castanea sativa* Mill.). La rimanente superficie boscata è costituita da cedui quercini di cerro (*Quercus cerris* L.) e roverella (*Quercus pubescens* Willd) e dalla fustaia di faggio (*Fagus sylvatica* L.) che riveste la sommità del Monte Cimino. Le aree non boscate sono costituite da castagneti da frutto (circa il 15% dell'area di studio), coltivazioni legnose agrarie, rappresentate da nocciuleti, oliveti e frutteti (1,5% dell'area di studio) e seminativi e superfici destinate a prato-pascolo (circa il 3% dell'area esaminata).

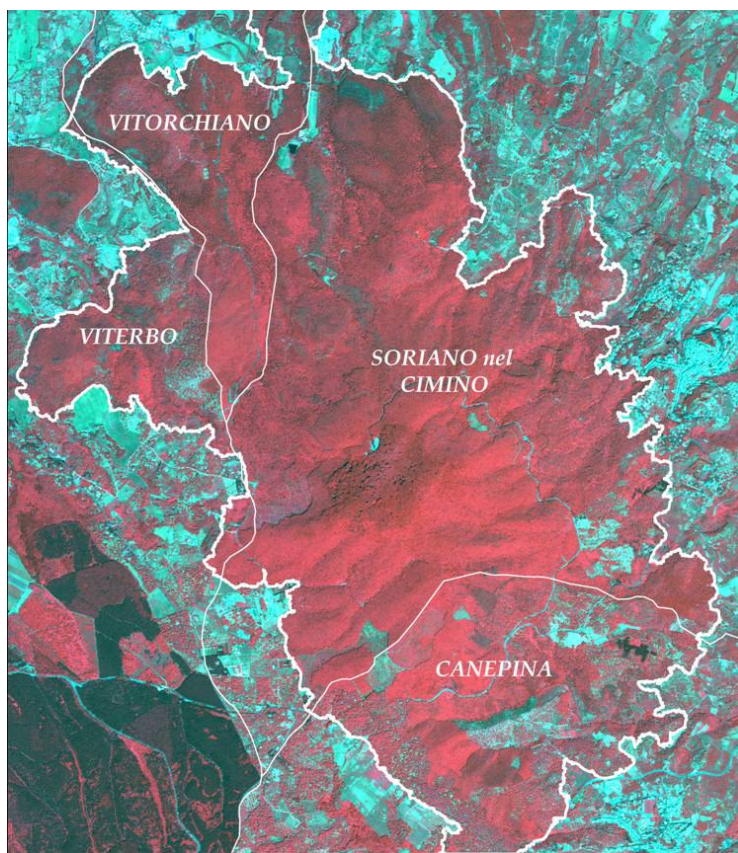


Figura 5 – Rappresentazione in falso colore dell'area di studio e confini comunali.

Lo studio ha per oggetto una coppia di immagini multitemporali telerilevate dal satellite *QuickBird* rispettivamente il 24 giugno 2003 e il 29 settembre 2004. Per la stessa area sono stati utilizzati come dati ancillari la copertura ortofotografica digitale a colori IT2000 con risoluzione geometrica nominale di 1 m e un modello digitale del terreno (DEM – *Digital Elevation Model*) con passo di 20 m. Il dato grezzo *QuickBird* è stato sottoposto ad ortorettifica e coregistrazione attraverso un modello matematico basato su

funzioni polinomiali razionali (RPF) raggiungendo valori di RMSE per le due immagini multispettrali di poco inferiori al metro.

Ogni immagine è stata segmentata indipendentemente, utilizzando in entrambi i casi tutte e quattro le bande spettrali disponibili, impiegando i parametri riportati in tabella 6.

Tabella 6 - Parametri impiegati per il processo di segmentazione multirisoluzione delle immagini QuickBird.

<i>QuickBird</i>	<i>Livelli di segmentazione</i>	<i>Peso relativo di tutte e quattro le bande</i>	<i>Fattore di scala</i>	<i>Eterogeneità geometrica</i>	<i>Fattore di compattezza</i>	<i>Numero poligoni</i>
2003	I	1	250	0,1	0,5	170
	II	1	100	0,1	0,5	2102
	III	1	40	0,1	0,5	7409
2004	I	1	250	0,1	0,5	166
	II	1	100	0,1	0,5	4384
	III	1	30	0,5	0,8	13193

2.2.1 Metodologia

Allo scopo di individuare gli eventi avvenuti nel periodo esaminato attraverso il confronto delle due classificazioni, entrambe le immagini sono state classificate utilizzando la medesima legenda articolata in nove distinte classi: 1. infrastrutture; 2. seminativi; 3. colture legnose agrarie; 4. boschi a prevalenza di querce caducifoglie; 5. boschi a prevalenza di castagno; 6. castagneti da frutto; 7. boschi di faggio; 8. prati e pascoli; 9. superfici forestali utilizzate o percorse da incendi. Il sistema di nomenclatura prescelto è concorde con lo standard *Corine Land Cover* (CLC) (EEA, 2000), anche se lievemente modificato per adattarlo al tipo di studio in esame. Tuttavia per le superfici boscate si è giunti al 4° livello *Corine* proposto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (2005). Per le aree forestali percorse da incendi e per quelle sottoposte a interventi di taglio, si è reso necessario l'accorpamento in un'unica classe per conservare la corrispondenza tra le due legende, in quanto non si riscontrano superfici bruciate nell'immagine del 2003.

La classificazione *object oriented* è avvenuta per ciascuna immagine sulla base dei poligoni generati dal terzo livello di segmentazione, utilizzando il classificatore STD.N.N. in maniera singola o combinata a funzioni di appartenenza con logica *fuzzy*. Ai fini dell'applicazione della procedura *Nearest Neighbours* sono stati selezionati come *training sites* rispettivamente circa il 26% e il 30% dei poligoni generati dalla segmentazione dell'immagine 2003 e 2004. Per entrambe le immagini la classificazione STD.N.N. è avvenuta mediante gli attributi riportati in tabella 7.

Tabella 7 - Attributi utilizzati per la classificazione Standard Nearest Neighbour (STD.N.N.) dei poligoni generati con il terzo livello di segmentazione. Per la definizione dei singoli attributi si rimanda ai riferimenti bibliografici indicati.

<i>Attributo del poligono</i>	<i>Tipo</i>	<i>Banda</i>	<i>Riferimento</i>
Media spettrale	Spettrale	1 – 2 – 3 – 4	Chirici & Corona, 2006
Deviazione standard	Spettrale	1 – 2 – 3 – 4	Chirici & Corona, 2006
Area	Geometrico		Chirici & Corona, 2006
Length / width	Geometrico		Baatz <i>et al.</i> , 2004
Numero di poligoni a contatto sullo stesso livello gerarchico	Gerarchico		Chirici & Corona, 2006

Mentre lo STD.N.N. è stato applicato a tutte le classi previste dal sistema di nomenclatura adottato, per migliorare la qualità delle classificazioni, appropriate funzioni di appartenenza sono state descritte unicamente per le classi di carattere forestale, i castagneti da frutto e le colture legnose agrarie. Nello specifico nell'area esaminata è stato possibile limitare, attraverso l'utilizzo del DEM, la ricerca dei soprassuoli forestali e dei castagneti da frutto a determinati *range* altitudinali. Ricorrendo ad informazioni di tipo contestuale è stato possibile inoltre migliorare la classificazione delle superfici forestali utilizzate escludendo la possibilità di riscontrare al loro interno classi rappresentanti boschi o coltivazioni arboree. In particolare, attraverso la sogliatura di parametri che definiscono il bordo relativo di una classe ad aree tagliate, è stato possibile classificare correttamente anche superfici che per intensità di matricinatura assumono una risposta spettrale simile a quella degli altri soprassuoli arborei presenti nell'area.

Mediante l'incrocio (*cross-classification*) delle classificazioni *object oriented* prodotte per le immagini *QuickBird* è stato possibile ottenere infine un'immagine in cui vengono evidenziati i cambiamenti occorsi alla copertura forestale nel periodo esaminato. In particolare vengono distinte tre classi: 1. superfici utilizzate o percorse da incendi; 2. ripresa vegetativa seguente al taglio; 3. superfici invariate.

La classe delle *superfici utilizzate o percorse da incendi* fa riferimento a quelle superfici che nell'immagine del 2003 appaiono rivestite da una copertura forestale continua, mentre nell'immagine dell'anno successivo risultano tagliate o percorse dal fuoco. La classe della *ripresa vegetativa seguente al taglio* è costituita da superfici boschive caratterizzate da un'età pari a un anno per effetto di tagli riscontrati nell'immagine del 2003. Le superfici invariate rappresentano tutte quelle aree che nel periodo di studio non mostrano alcun evento, né di origine antropica né di origine naturale, che potesse assegnarle alle classi precedenti.

Il collaudo delle classificazioni prodotte è avvenuto escludendo le superfici di *training*, definendo la verità a terra mediante interpretazione a video delle ortofoto e delle immagini *QuickBird*, e successiva validazione in campo. La corrispondenza tra le classificazioni e la verità a terra è stata poi quantificata attraverso la costruzione della matrice di confusione e conseguente calcolo dell'indice KIA (*Kappa Index of Agreement*) e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e di accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le varie classi cartografate.

2.2.2 Risultati

La classificazione *object-oriented* di uso e copertura del suolo dell'anno 2003 ha raggiunto un livello di accuratezza tematica superiore rispetto alla classificazione dell'immagine ripresa nell'anno successivo, registrando rispettivamente nel primo caso un valore di KIA pari a 0,74 e nel secondo un valore di KIA pari a 0,67.

A livello di singole classi mappate dei buoni risultati di classificazione si riscontrano per i soprassuoli forestali, soprattutto per i *Boschi a prevalenza di castagno* (Tab. 8). Unica eccezione è rappresentata dalla classe dei *Boschi a prevalenza di querce caducifoglie*, per la quale nella classificazione del dato 2004 si rilevano valori di accuratezza inferiori a 0,7. Risultati discreti sono stati ottenuti anche per l'identificazione automatica delle superfici forestali interessate nel periodo esaminato da eventi di taglio o incendio, raggiungendo livelli di accuratezza prossimi o superiori a 0,75. In entrambe le classificazioni le classi *Colture legnose agrarie* e *Prati-Pascoli* sono quelle per cui si riscontra una minore accuratezza tematica.

Tabella 8 - Valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi mappate, calcolati per le classificazioni automatiche delle immagini QuickBird.

<i>Classi mappate</i>	<i>Anno 2003</i>		<i>Anno 2004</i>	
	<i>AP</i>	<i>AU</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>
Boschi a prevalenza di querce caducifoglie	0.70	0.85	0.55	0.68
Boschi di faggio	0.70	0.89	0.81	0.90
Boschi a prevalenza di castagno	0.94	0.89	0.91	0.87
Aree percorse da incendi o interessate da utilizzazioni forestali	0.74	0.88	0.85	0.89
Castagneti da frutto	0.76	0.76	0.78	0.77
Colture legnose agrarie	0.44	0.48	0.21	0.22
Prati-Pascoli	0.45	0.54	0.35	0.52
Seminativi	0.71	0.53	0.76	0.83
Infrastrutture	0.84	0.76	0.42	0.44

La mappa generata dall'incrocio delle classificazioni di uso e copertura del suolo delle immagini *QuickBird* raggiunge un valore di KIA pari a 0,85. Il riconoscimento delle superfici forestali interessate nel periodo esaminato da interventi di taglio e dal passaggio del fuoco appare generalmente buono, registrando, ad eccezione del valore di AP della classe della *Ripresa vegetativa seguente il taglio*, valori di accuratezza superiori a 0,8 (Tab. 9).

Tabella 9 - Valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi mappate, calcolati per la classificazione dei cambiamenti occorsi al bosco.

<i>Classi mappate</i>	<i>AP</i>	<i>AU</i>
Superfici invariate	1.00	1.00
Ripresa vegetativa seguente il taglio	0.72	0.90
Superfici utilizzate o percorse da incendi	0.86	0.89

Le classificazioni prodotte per le singole immagini *QuickBird* e la mappa dei cambiamenti occorsi alla copertura forestale generata dall'incrocio delle stesse sono riportate in figura 6.

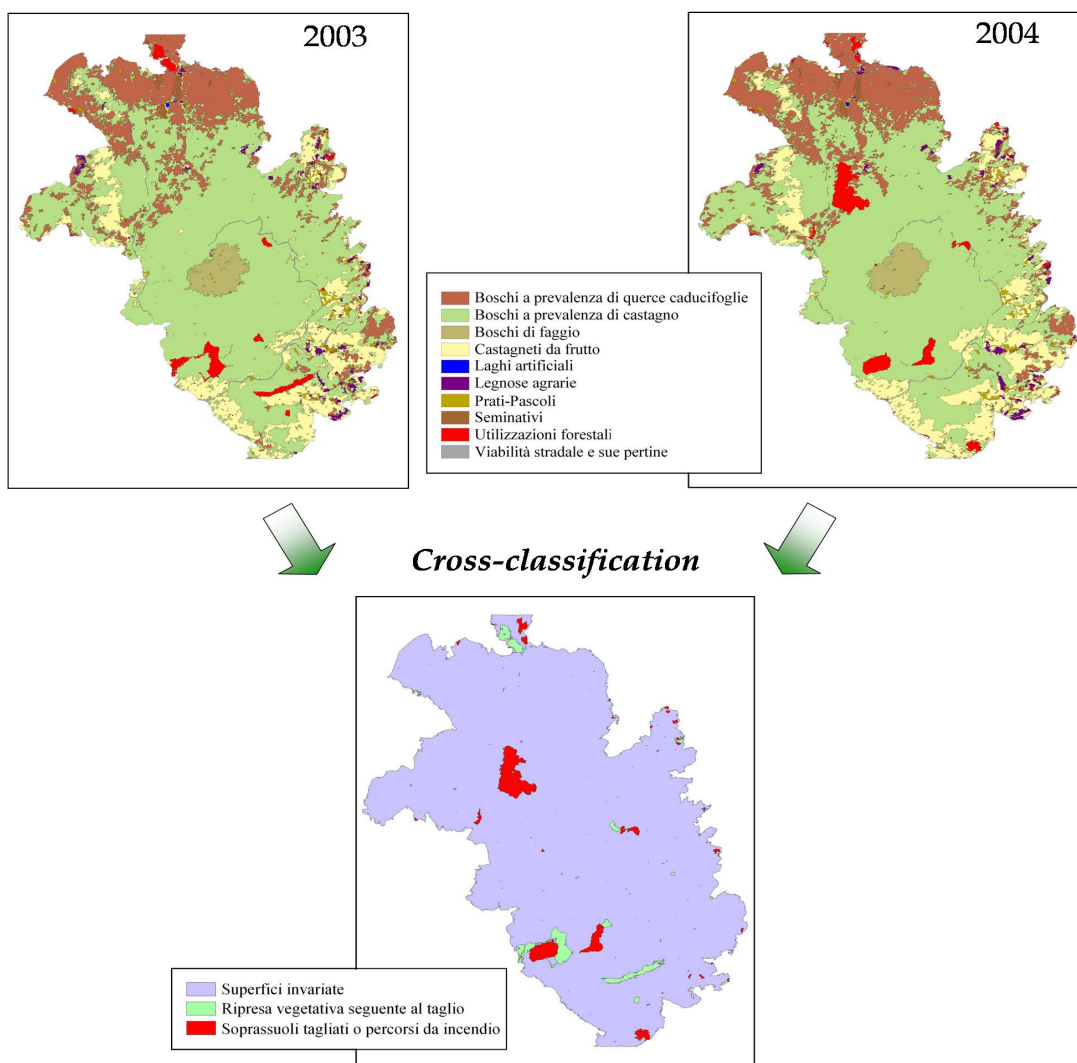


Figura 6 – Classificazione *object-oriented* dell'uso e copertura del suolo prodotta per il dato multitemporale *QuickBird* e relativa *cross-classification*.

2.2.3 Considerazioni

L'applicazione di procedure *object oriented* ad immagini satellitari ad alta risoluzione *QuickBird* si è dimostrata utile per l'individuazione degli eventi verificatisi a carico della superficie forestale esaminata. Durante la classificazione automatica di entrambe le immagini sono state riscontrate alcune difficoltà da parte del classificatore STD.N.N. nel distinguere tra loro i soprassuoli forestali. In particolare i cedui quercini e la faggeta tendono ad essere confusi con i cedui a prevalenza di castagno. In questo caso l'introduzione di funzioni di appartenenza, che sfruttano le informazioni estratte da un modello digitale del terreno, ha portato significativi vantaggi alla classificazione. Altresì problematica è apparsa l'attribuzione in automatico alla medesima classe di aree tagliate caratterizzate da un'intensità di matricinatura differente. Le superfici utilizzate per le quali si è avuta la maggiore difficoltà ad ottenere una corretta classificazione sono quelle caratterizzate dalla presenza di soprassuoli quercini, di fossi o di altre realtà per le quali la normativa forestale vigente al momento dello studio (Regione Lazio, 1999, 2002) prescrive un rilascio di matricine più intenso. Affiancare anche in questo caso al classificatore STD.N.N. apposite funzioni di appartenenza, elaborate sulla base di informazioni contestuali, ha permesso di risolvere per tali aree parte della sovrapposizione spettrale esistente con i restanti soprassuoli arborei presenti nell'immagine.

Tuttavia le maggiori difficoltà sono state riscontrate nel discernere le coltivazioni legnose agrarie dai castagneti da frutto. D'altra parte anche durante l'interpretazione a video spesso emergono dubbi nel riconoscere tra loro queste classi, specialmente se trattasi di giovani impianti di castagno da frutto che presentano chiome di dimensioni analoghe a quelle di altre essenze da frutto.

Il prodotto cartografico ottenuto dal confronto delle classificazioni, generate indipendentemente per ciascuna immagine della serie temporale, permette una sintesi immediata dei principali eventi occorsi al bosco durante le due stagioni silvane osservate. Le superfici forestali interessate da tagli o da incendi appaiono ben identificate soprattutto in riferimento all'ultima stagione silvana considerata ($AP = 0,86$; $AU = 0,89$), mentre si rileva una lieve sottostima delle superfici in ripresa vegetativa ($AP = 0,72$).

In conclusione, nelle condizioni esaminate (cedui a prevalenza di castagno), l'utilizzo di immagini VHR, associato con tecniche di analisi *object oriented*, si conferma efficace per l'individuazione degli eventi occorsi alla superficie forestale indagata, raggiungendo il grado di precisione (con riferimento a una scala 1:10.000) richiesta da coloro che operano in materia di pianificazione e gestione delle risorse forestali. Sarà comunque necessario estendere la sperimentazione ad un ambito territoriale più ampio, verificando la procedura proposta anche in differenti tipi di soprassuolo forestale (cedui quercini caducifoglie e sempreverdi, orno-ostrieti, cedui di faggio ecc.).

3. ASPETTI GENERALI

3.1 AREA DI STUDIO

Scopo della presente tesi è di sperimentare l'impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica per il monitoraggio dei tagli a raso condotti in boschi cedui dell'Italia centro-meridionale, dove sono particolarmente diffusi (INFC, 2007) e dove localmente da alcuni anni le utilizzazioni forestali sono ritornate intense.

La sperimentazione condotta, di durata triennale, ha previsto per ogni anno di attività una dimensione crescente dell'area di analisi, rispettivamente pari a circa: 16.000 km² per il primo anno, 28.000 km² per il secondo anno e 31.400 km² per il terzo anno (Fig. 7). Nel secondo e terzo anno l'area di indagine è stata selezionata in modo tale da inglobare interamente o parzialmente l'area esaminata nei precedenti anni.



Figura 7 - Area di studio considerata nei tre anni di sperimentazione.

Nel primo anno la sperimentazione ha interessato l'intera provincia di Isernia, gran parte del territorio di Frosinone, Caserta e Campobasso più una porzione della provincia di Roma, Latina, L'Aquila, Chieti, Benevento, Napoli e Foggia (Fig. 8). Nel secondo anno il monitoraggio si è esteso verso nord ricoprendo quasi interamente la provincia di Rieti, coinvolgendo parte della provincia di Viterbo, Terni, Perugia, Teramo e Pescara e aumentando la superficie investigata all'interno delle province di Latina, Roma e L'Aquila.

Infine nel terzo anno è aumentata la superficie investigata nelle province di Perugia, Terni, Roma, Pescara e Chieti, è stato inserito marginalmente il territorio di Macerata ed esclusa l'estremità nord delle province di Rieti e L'Aquila.

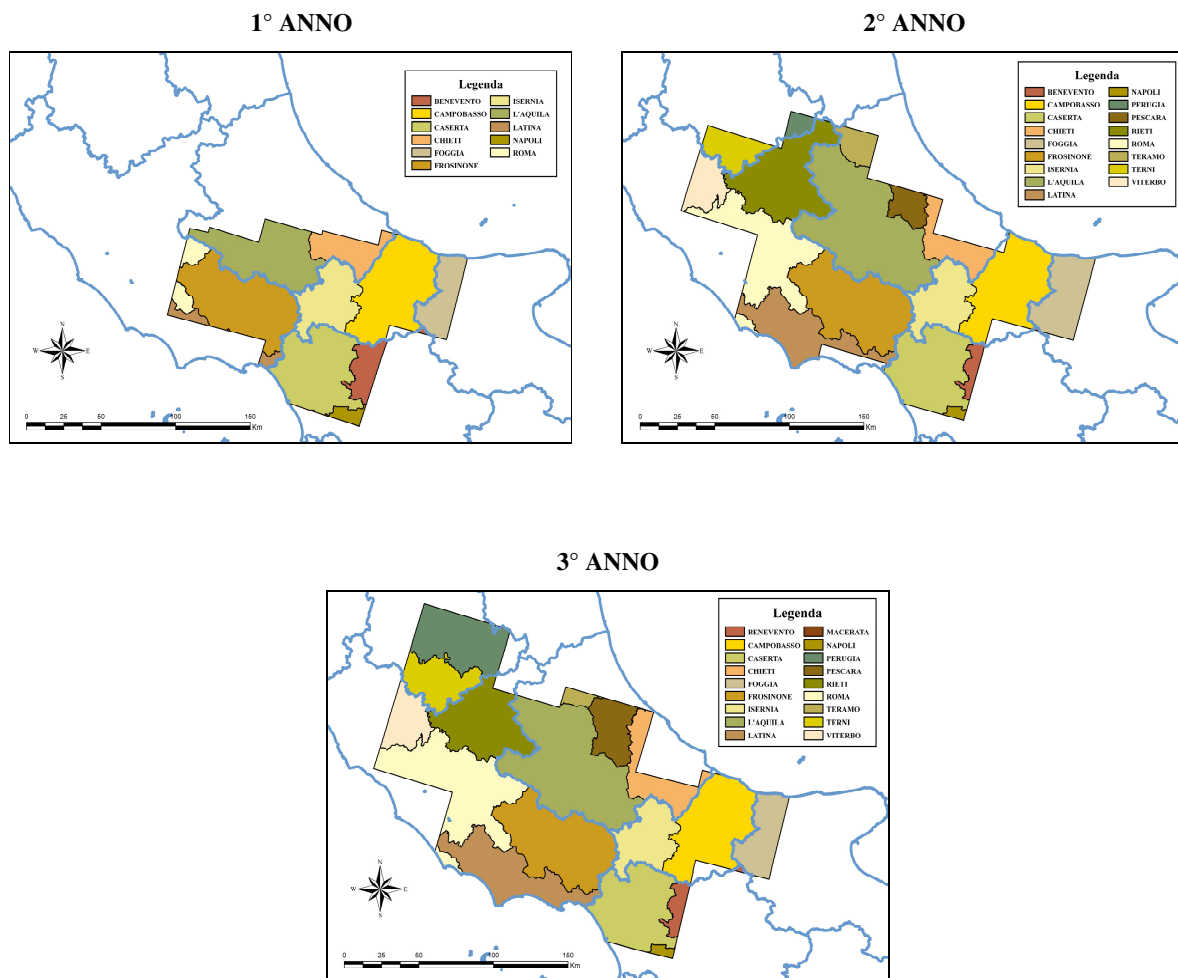


Figura 8 – Province oggetto di sperimentazione.

L'area complessivamente considerata si estende dal livello del mare fino a una quota massima di 2859 m s.l.m. (Fig. 9) e coinvolge l'insieme delle zone fitoclimatiche che vanno dal *Lauretum* all'*Alpinetum*. L'altitudine media è di 580 m s.l.m..

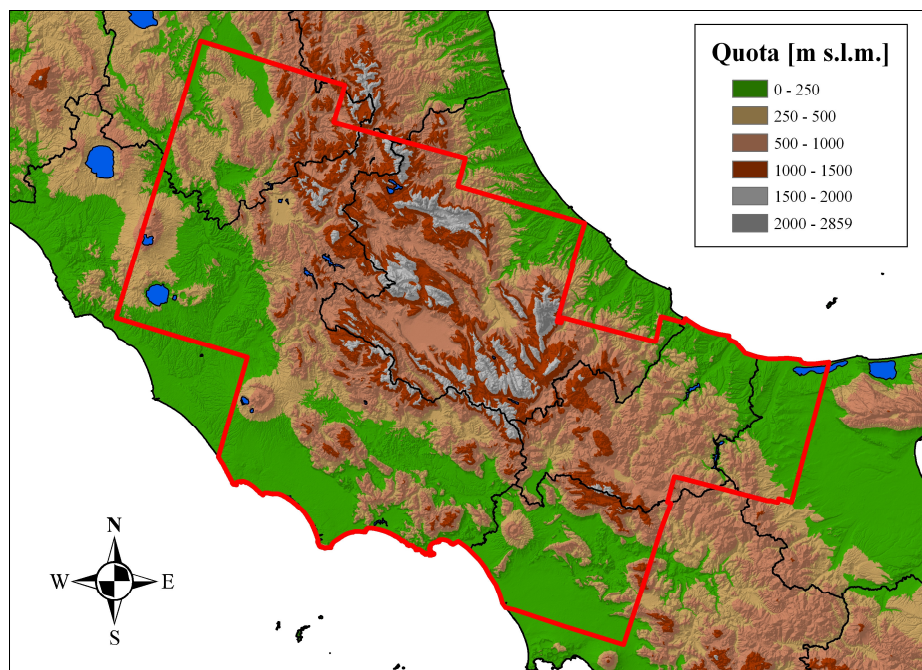


Figura 9 – Localizzazione dell’area di sperimentazione sulla base del modello digitale del terreno.

Secondo la classificazione di uso e copertura del suolo CLC 2000, circa un terzo della superficie investigata è ricoperta da soprassuoli forestali (Tab. 10, Fig. 10a, 10b e 10c). Complessivamente la superficie forestale monitorata nel corso dei tre anni di sperimentazione ammonta ad oltre 2 milioni di ha, di cui il 92% è costituito da boschi di latifoglie. I boschi di conifere e quelli misti di latifoglie e conifere ricoprono rispettivamente un’area pari al 3% e 5% del totale della superficie boscata monitorata.

Tabella 10 – Uso e copertura del suolo CLC 2000 all’interno dell’area di monitoraggio.

Codice CLC	Classi CLC	Superficie analizzata [ha]		
		1° anno	2° anno	3° anno
1	Aree urbane	45699	805723	102685
2	Usi agricoli e pascolivi	945720	1595166	1836221
3	Boschi	457086	840177	894560
4	Aree arbustive	147840	275097	293137
5	Acque superficiali	12542	16386	20400

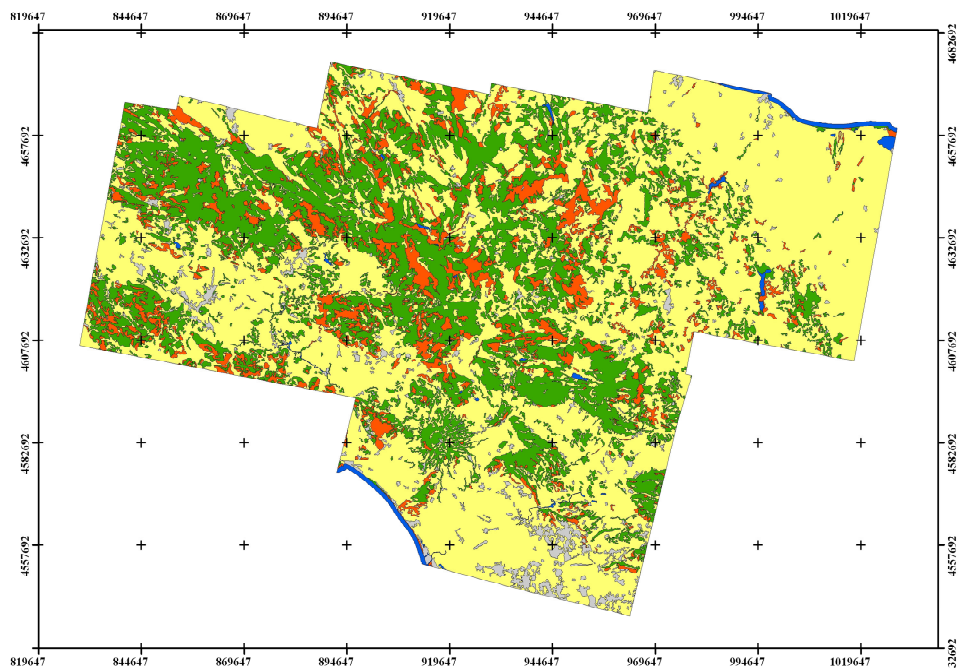


Figura 10a – Uso e copertura del suolo CLC 2000 dell’area esaminata durante il primo anno di sperimentazione. In giallo gli usi agricoli e pascolivi, in verde i boschi, in grigio le aree urbane, in arancio le aree arbustive e in azzurro le acque superficiali.

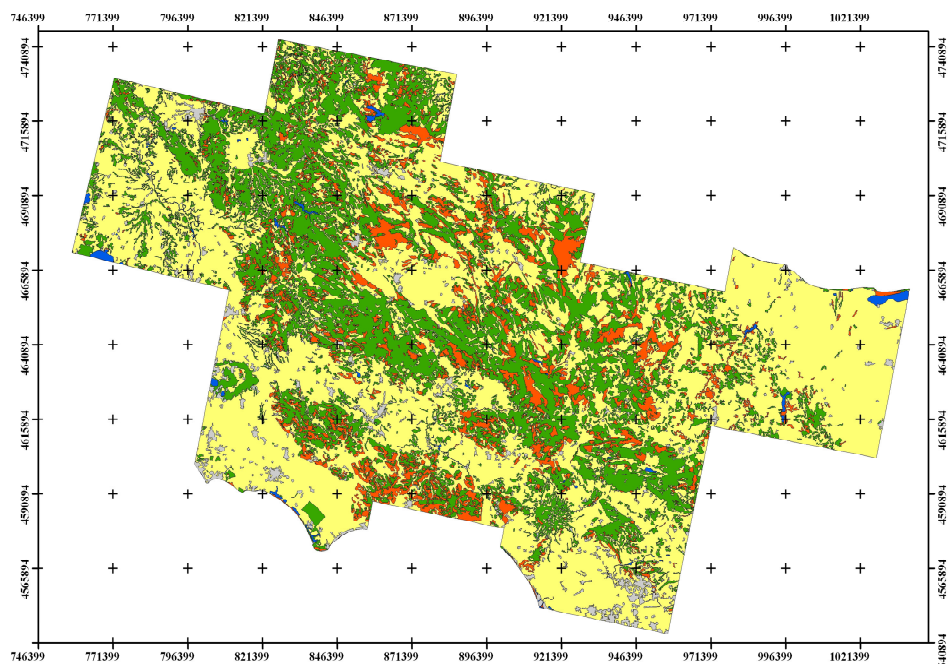


Figura 10b - Uso e copertura del suolo CLC 2000 dell’area esaminata durante il secondo anno di sperimentazione. In giallo gli usi agricoli e pascolivi, in verde i boschi, in grigio le aree urbane, in arancio le aree arbustive e in azzurro le acque superficiali.

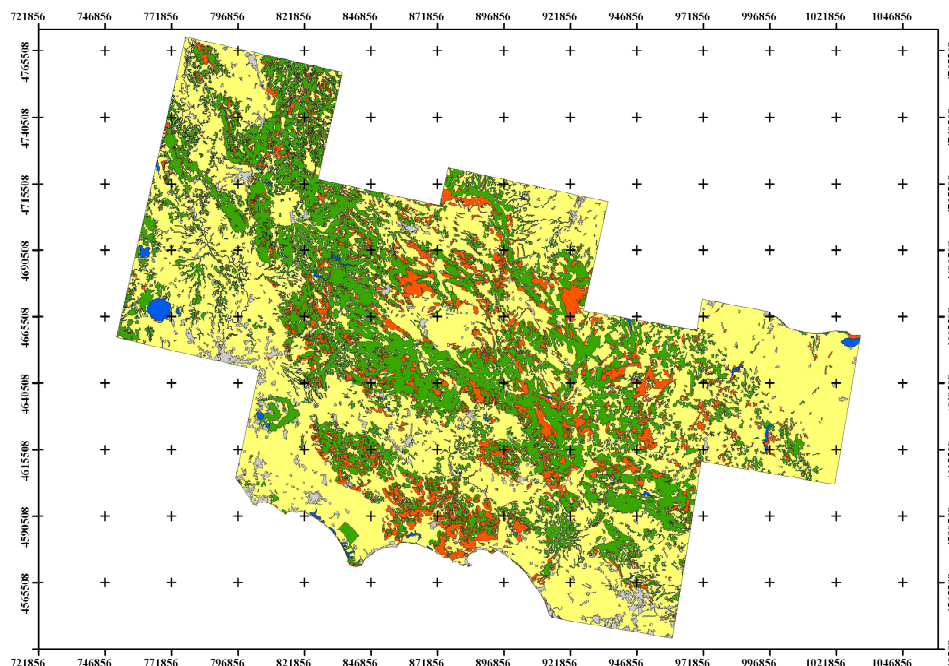


Figura 10c - Uso e copertura del suolo CLC 2000 dell'area esaminata durante il terzo anno di sperimentazione. In giallo gli usi agricoli e pascolivi, in verde i boschi, in grigio le aree urbane, in arancio le aree arbustive e in azzurro le acque superficiali.

Tra i boschi di latifoglie sono preponderanti le formazioni quercine di cerro e roverella, oltre il 40% dei boschi in questione, seguiti dai boschi a prevalenza di faggio, gli orno-ostrieti e i boschi a prevalenza di leccio, che rispettivamente rappresentano il 29%, 12% e 10%. I boschi a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani e quelli a prevalenza di pini mediterranei costituiscono rispettivamente il 57% e 30% dei boschi di conifere. Infine tra le formazioni miste i più frequenti sono i boschi a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani seguiti da quelli a prevalenza di querce caducifoglie, costituenti nell'ordine il 42% e 16%.

3.2 GESTIONE FORESTALE

All'interno delle Regioni esaminate il ceduo rappresenta la principale forma di governo applicata ai soprassuoli forestali. Secondo quanto riportato dal nuovo Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC, 2007) sono ascrivibili alla suddetta tipologia colturale 1051501 ha, corrispondenti a circa il 54% della superficie attribuita alla categoria inventariale dei "Boschi alti" (Tab. 11).

La rimanente superficie è costituita da fustaie (24% dei Boschi alti) e da soprassuoli per i quali in sede inventariale non è stato possibile definire il tipo colturale (22% dei Boschi alti).

Particolarmente diffusi sono i cedui in Umbria, Lazio e Molise dove costituiscono nell'ordine circa il 75%, 64% e 53% delle suddetta categoria inventariale. Una più equa ripartizione delle superfici tra ceduo e fustaia si osserva invece per l'Abruzzo (rispettivamente 34% e 36% dei "Boschi alti" Regionali) e per la Puglia

(rispettivamente 48% e 44% dei “Boschi alti” Regionali). Anche in Campania la superficie a ceduo supera quella a fustaia, tuttavia il 30% dei “Boschi alti” Regionali appare non classificato per tale parametro.

Tabella 11 – Ripartizione per forma di governo della superficie appartenente alla categoria inventariale dei Boschi alti (fonte: INFC, 2007).

Regione	Fustaia [ha]	Ceduo [ha]	Non classificato [ha]	<i>Totale Boschi alti [ha]</i>
Abruzzo	138273	131543	119346	<i>389162</i>
Campania	101229	163926	114847	<i>380002</i>
Lazio	101391	340657	92850	<i>534898</i>
Molise	28892	69884	32644	<i>131420</i>
Puglia	63582	69369	10099	<i>143050</i>
Umbria	41659	276122	50776	<i>368187</i>
<i>Totale</i>	<i>475026</i>	<i>1051501</i>	<i>420562</i>	<i>1946719</i>

Tra i cedui mostrano una netta prevalenza quelli matricinati, rappresentando complessivamente il 75% dei soprassuoli afferenti a tale forma di governo (Tab. 12). I cedui semplici appaiono particolarmente diffusi in Puglia (58% dei cedui), mentre il ceduo composto è scarsamente praticato in tutte le Regioni considerate.

Tabella 12 – Ripartizione percentuale della superficie a ceduo in funzione della forma di trattamento applicata (fonte: INFC, 2007).

Regione	Ceduo semplice	Ceduo semplice matricinato	Ceduo composto
Abruzzo	20%	76%	4%
Campania	27%	71%	2%
Lazio	14%	77%	9%
Molise	17%	82%	1%
Puglia	58%	36%	6%
Umbria	2%	83%	15%
<i>Totale</i>	<i>17%</i>	<i>75%</i>	<i>8%</i>

I cedui a sterzo, che in ambito inventariale non sono stati considerati come tipo colturale a sé ma come stadio evolutivo, sono presenti unicamente in Abruzzo su una superficie complessiva di 724 ha.

In termini di proprietà circa il 55% della superficie forestale presente nelle Regioni indagate risulta privata, il 42% pubblica e il 3% non classificata per tale carattere. La superficie forestale privata raggiunge le percentuali più elevate in Umbria (73%), Puglia (66%) e Molise (60%) (Tab. 13). In Abruzzo si riscontra invece l'unico caso in cui la proprietà pubblica supera quella privata, risultando rispettivamente pari al 56% e 41% della superficie forestale Regionale. Ad eccezione della Puglia e dell'Umbria, per le restanti Regioni

analizzate si riscontra tuttavia una superficie forestale pubblica superiore rispetto alla media nazionale attestata su un'aliquota del 32%.

Tabella 13 – Ripartizione percentuale della superficie forestale Regionale in funzione della tipologia di proprietà (fonte: INFC, 2007).

Regione	Proprietà		
	Privata	Pubblica	Non classificata
Abruzzo	41%	56%	3%
Campania	52%	43%	5%
Lazio	49%	48%	3%
Molise	60%	38%	2%
Puglia	66%	31%	3%
Umbria	73%	26%	1%

La diffusione della pianificazione di dettaglio appare variabile tra le Regioni, ma in ogni caso scarsa, raggiungendo un massimo del 21% della superficie forestale totale in Campania e un minimo dello 0% in Puglia (Tab. 14). Ad esclusione della Campania e del Molise, la superficie forestale gestita attraverso piani di gestione ed assestamento forestale appare inferiore rispetto alla media nazionale fornita dall'INFC, stimata pari al 14% della superficie forestale regionale.

Tabella 14 – Ripartizione percentuale della superficie forestale Regionale in funzione della presenza della pianificazione di dettaglio (fonte: INFC, 2007).

Regione	Pianificazione di dettaglio		
	Presente	Assente	Non classificata
Abruzzo	9%	88%	3%
Campania	21%	74%	5%
Lazio	6%	91%	3%
Molise	16%	82%	2%
Puglia	0%	97%	3%
Umbria	3%	96%	1%
<i>Totale</i>	9%	88%	3%

L'area monitorata coinvolge numerosi SIC e ZPS (Fig. 11), nonché parchi nazionali quali il parco del Gran Sasso e Monti della Laga, il parco della Maiella, il parco d'Abruzzo, Lazio e Molise, il parco del Circeo e, solo marginalmente, il parco dei Monti Sibillini, il parco del Gargano e il parco del Vesuvio (Fig. 12).

La percentuale di superficie analizzata investita a parco e quella rientrante all'interno della Rete Natura 2000 è riportata distinta per anno di sperimentazione in tabella 15.

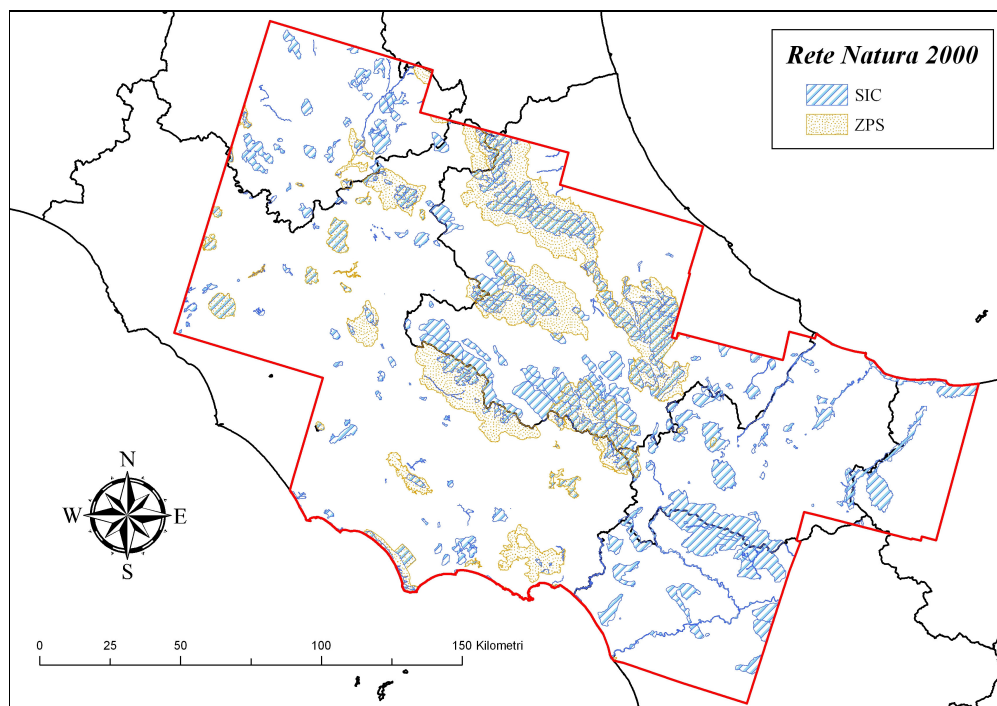


Figura 11 – Localizzazione della Rete Natura 2000 all'interno dell'area osservata nel corso dei tre anni di sperimentazione.

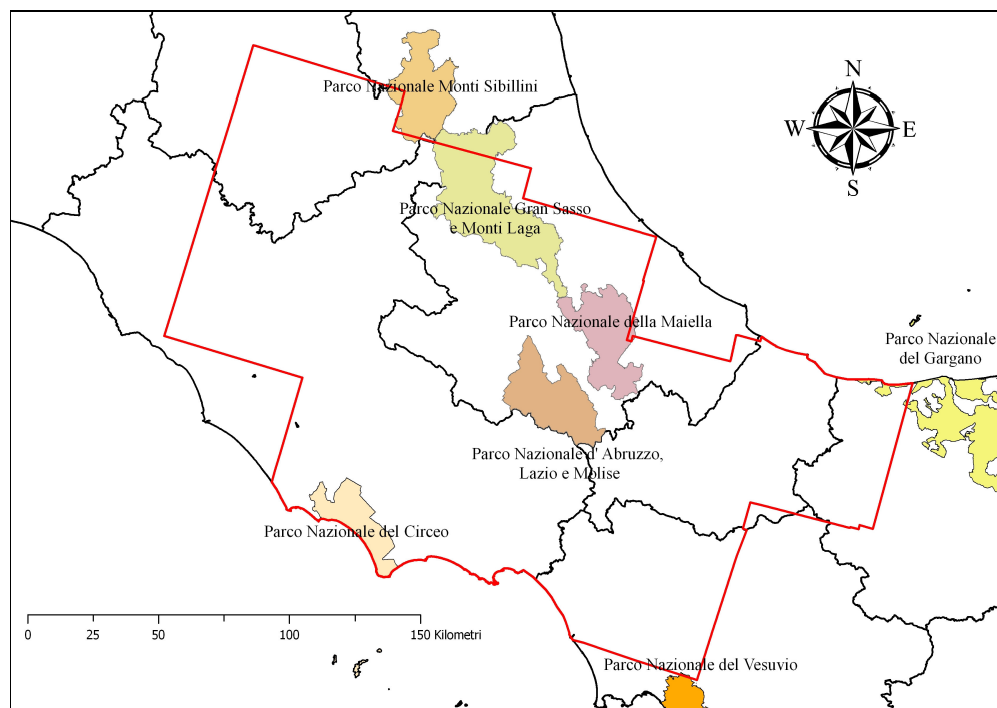


Figura 12 – Parchi nazionali presenti all'interno dell'area osservata nel corso dei tre anni di sperimentazione.

Tabella 15 – Percentuale di superficie monitorata ricadente all'interno di parchi nazionali, SIC e ZPS.

Anno di sperimentazione	Parco	SIC	ZPS
1°	6,8%	18,9%	9,8%
2°	10,6%	16,4%	15,6%
3°	8,2%	15,4%	13,1%

3.3 Normativa vigente sulle utilizzazioni forestali

Per effetto del DPR 11/1972 e del DPR 616/1977 le competenze tecniche e amministrative relative ai tagli boschivi sono state trasferite dall'Amministrazione centrale alle Regioni. Successivamente le recenti modifiche all'art. 117 della Costituzione hanno ribadito ed esteso l'esclusività della competenza regionale in materia. A seguito del processo descritto ciascuna Regione ha emanato una propria normativa forestale (Tab. 16) che, seppur riprendendo il Regio Decreto Legge 3267/1923 nei suoi principi generali (il concetto di vincolo, l'obbligo a richiedere all'amministrazione pubblica una autorizzazione al taglio), appare diversificata soprattutto per ciò che concerne la procedura di autorizzazione al taglio. Questa diversità è frutto di una differente ponderazione dell'importanza delle funzioni pubbliche delle foreste, dei limiti da imporre al diritto di proprietà privata, delle esigenze di semplificazione amministrativa, dell'equilibrio più opportuno tra misure di comando e controllo e interventi di liberalizzazione del mercato.

Tabella 16 – Normativa di riferimento per i tagli boschivi vigente nelle Regioni esaminate nel periodo di sperimentazione. (*) In parte modificato dal R.R. 26/04/2006, n.3.

Regione	Normativa	Titolo
Umbria	L.R. 19 novembre 2001, n. 28	Testo unico regionale per le foreste
	R.R. 17 dicembre 2002, n.7	Regolamento di attuazione della legge regionale 19 novembre 2001, n. 28
Lazio	L.R. 20/01/1999 n. 4	Adozione delle prescrizioni di massima e di polizia forestale di cui al R.D. 30 dicembre 1923, n. 3267
	L.R. 28/10/2002, n. 39	Norme in materia di gestione delle risorse forestali
	R.R. 18/04/2005, n. 7 *	Regolamento di attuazione dell'articolo 36 della legge regionale 28/10/2002, n. 39
Abruzzo	L.R. 08/02/2005, n. 6 (Art. 111)	Disposizioni finanziarie per la redazione del bilancio annuale 2005 e pluriennale 2005-2007 della regione Abruzzo (Legge finanziaria regionale 2005)
	L.R. 09/11/2005, n. 33 (Art. 46)	Modifiche ed integrazioni alla L.R. 8/02/2005, n. 6 (Legge finanziaria regionale 2005) e alla L.R. 8 febbraio 2005, n. 7 (Bilancio di previsione per l'esercizio finanziario 2005-Bilancio pluriennale 2005-2007 della regione Abruzzo) – 3° Provvedimento di variazione
Molise	L.R. 18/01/2000, n. 6	Disciplina regionale delle foreste della Regione - Valorizzazione economica - Tutela ambientale
Campania	L.R. 07/05/1996, n. 11	Modifiche ed integrazioni alla L.R. 28/02/1987, n. 13, concernente la delega in materia di economia, bonifica montana e difesa del suolo
	L.R. 05/08/1999, n. 5 (Art. 23)	Disposizioni di Finanza Regionale
	L.R. 24/07/2006, n. 14	Modifiche ed integrazioni alla L.R. 07/05/1996, n. 11 concernente la delega in materia di economia montana e difesa del suolo
Puglia	L.R. 31/05/2001, n. 14 (Art. 29)	Bilancio di previsione per l'esercizio finanziario 2001 e bilancio pluriennale 2001-2003
	R.R. 18/01/2002, n. 1	Tagli boschivi

3.3.1 Procedura amministrativa dei tagli boschivi

Dall'esame della normativa regionale vigente emerge che l'autorizzazione all'esercizio degli interventi di taglio nei boschi avviene generalmente seguendo tre distinti *iter* amministrativi:

1. Tagli liberamente esercitabili, eseguibili senza alcun obbligo di comunicazione all'ente competente per territorio.
2. Tagli soggetti a "Comunicazione di taglio" o a procedure assimilabili, per i quali il proprietario è tenuto a esprimere all'ente preposto l'intenzione di procedere all'utilizzazione del bosco.

3. Tagli soggetti a “Domanda di autorizzazione”, per la cui esecuzione l’interessato deve ottenere specifica autorizzazione da parte dell’ente competente.

Gli enti territoriali preposti al ricevimento della documentazione variano a livello regionale, coinvolgendo asseconda dei casi Comuni, Province, Comunità Montane e CFS. In particolare: in Abruzzo e Puglia le richieste di taglio devono essere presentate rispettivamente al Coordinamento Provinciale del CFS e all’Ispettorato Ripartimentale delle Foreste competente per Provincia; nel Lazio le funzioni amministrative in materia sono svolte dai Comuni per superfici di intervento inferiori a 3 ettari e dalle Province o Comunità Montane per superfici di taglio superiori o uguali a 3 ettari; in Umbria gli enti competenti per territorio sono le Comunità Montane e i Comuni non ricadenti in alcuna Comunità Montana, che tuttavia, attraverso apposita convenzione, esercitano le loro funzioni amministrative attraverso una Comunità Montana limitrofa; in Molise ogni privato che intende effettuare un taglio boschivo è tenuto ad inviarne comunicazione al Comune, alla Comunità montana e al CFS competente per territorio; in Campania, le comunicazioni e le domande di autorizzazione al taglio vanno presentate alla Comunità Montana e all’Amministrazione Provinciale.

I criteri secondo cui sono applicati all’interno dell’area sperimentale i tre *iter* amministrativi di autorizzazione al taglio sono riportati in tabella 17. In tutte le Regioni considerate qualsiasi intervento selvicolturale (ad eccezione di eventuali interventi di sfollo e diradamento in Campania, che sono liberamente esercitabili) deve essere segnalato all’ente pubblico territorialmente competente, incluse quindi le tagliate dei cedui a fine turno. Al di fuori del ceduo le tagliate a raso non sono di norma ammesse in nessuna Regione. D’altro canto, in tutte le Regioni esaminate (tranne la Puglia) le tagliate dei cedui risultano nella maggior parte dei casi soggette a un regime amministrativo semplificato, in cui il proprietario è tenuto unicamente a inviare una comunicazione all’ente competente con cui manifesta l’interesse all’utilizzazione del soprassuolo boschivo. Nel Lazio la soglia oltre la quale la dichiarazione di taglio va sostituita con la richiesta di autorizzazione dell’intervento è fissata sia in termini di superficie che di specie nonché di forma di governo e trattamento. Anche in Umbria, Abruzzo e Campania sono fissati limiti di superficie oltre i quali per l’esecuzione dell’intervento è necessaria la presentazione della domanda di autorizzazione. In Molise, per interventi condotti in soprassuoli governati a ceduo è sempre sufficiente la semplice comunicazione. Alla domanda di autorizzazione e nei casi previsti dalla legge per gli interventi soggetti a comunicazione va allegato il progetto di taglio elaborato da un dottore agronomo o forestale abilitato; unica eccezione è rappresentata dalla Campania in cui la richiesta di autorizzazione va integrata con il progetto di taglio solamente se l’intervento si estende su una superficie superiore a 10 ha. Va sottolineata la generale applicazione del regime di silenzio-assenso che può subentrare sia per gli interventi comunicati che per quelli soggetti ad autorizzazione: questa modalità si configura ogniqualevolta l’ente competente non esprime entro i termini previsti dalla legge alcun parere contrario all’esecuzione del taglio, che si considera in questo modo tacitamente approvato.

Tabella 17 - Criteri di applicazione delle procedure amministrative per i tagli boschivi (C = soprassuoli governati a ceduo; F = soprassuoli governati a fustaia).

Regione	Tagli liberamente esercitabili	Tagli soggetti a “Comunicazione” o procedure assimilabili	Tagli soggetti ad “Autorizzazione”
Umbria	Assenti	C < 5 ha; F (sfolli, diradamenti, taglio di preparazione e tagli secondari)	C ≥ 5 ha; F (taglio di sementazione, di sgombero, a buche, saltuario)
Lazio	Assenti	C (castanili) < 20 ha; C (altre specie) < 10 ha; F (taglio raso) < 2,5 ha; F (tagli successivi) < 5 ha; F (tagli intercalari); F (disetanee) < 25% della massa in piedi	C (castanili) ≥ 20 ha; C (altre specie) ≥ 10 ha; F (taglio raso) ≥ 2,5 ha; F (tagli successivi) ≥ 5 ha; F (disetanee) > 25% della massa in piedi
Abruzzo	Assenti	C, F < 1,5 ha	C, F ≥ 1,5 ha
Molise	Assenti	C	F
Campania	Sfolli e diradamenti	C, F < 2 ha	C, F ≥ 2 ha
Puglia	Assenti	Assenti	C, F, macchia mediterranea

4. MATERIALI

4.1 SENSORE SPOT5

Lo studio ha avuto per oggetto un set multitemporale di immagini multispettrali acquisite dal satellite SPOT5. Questo satellite, il più recente della serie SPOT, operativo da luglio 2002, è dotato di un sensore HRG (*High Resolution Geometry*) in grado di acquisire immagini con una risoluzione geometrica di 5 m nel pancromatico (2,5 m nella modalità *superpanmode*) e di 10 m nel multispettrale (CHIRICI e CORONA 2006).

La banda pancromatica ricopre l'intervallo spettrale compreso tra 0,48 e 0,71 μm . Il multispettrale è composto da quattro bande: verde (0,50-0,59 μm), rosso (0,61 e 0,68 μm), infrarosso vicino (0,78 e 0,89 μm) e infrarosso medio (1,58 e 1,75 μm).

Il dato registrato presenta una risoluzione radiometrica e temporale rispettivamente di 8 bit e 26 giorni. La dimensione minima di una scena satellitare completa è pari a 3600 km².

Il satellite ha la peculiarità di poter acquisire immagini anche *off-nadir* cioè con un angolo di ripresa rispetto alla superficie terrestre diverso dalla verticale. Tale caratteristica è anche utilizzata per combinare in via fotogrammetrica stereocoppie per la visualizzazione tridimensionale delle aree o per la generazione di modelli digitali del terreno.

Nel presente lavoro è stato utilizzato esclusivamente il dato multispettrale.



Figura 13 – Satellite SPOT5.

Le immagini SPOT5 utilizzate nel primo anno di sperimentazione sono complessivamente sette, con periodo di acquisizione compreso tra il 2003 e il 2005 (Tab. 18). Cinque immagini garantiscono la copertura completa dell'area, mentre le restanti due costituiscono il dato multitemporale per la *frame* 68-266 (Fig. 14).

Tabella 18 - immagini SPOT5 acquisite nel primo anno di attività.

Frame	Data acquisizione
68-266	30_06_2003 07_07_2004 21_05_2005
69-265	24_06_2003
70-266	29_05_2003
70-267	16_07_2005
71-266	19_06_2003

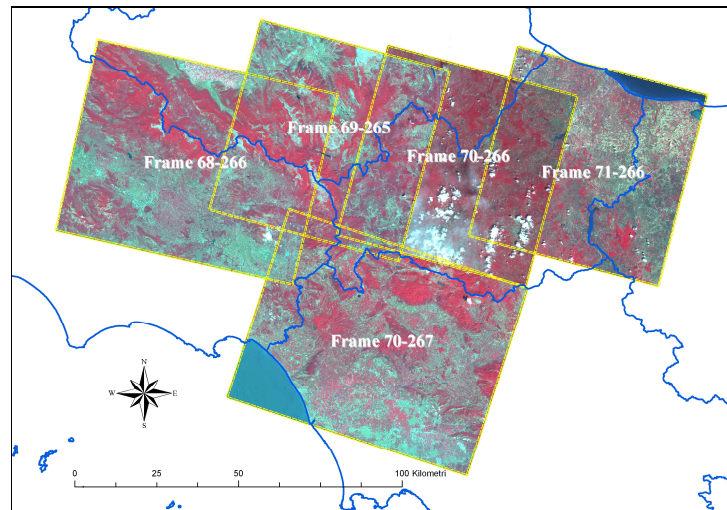


Figura 14 – Rappresentazione all’infrarosso falso colore delle *frame* SPOT5 utilizzate nel primo anno di sperimentazione.

Le analisi condotte nel secondo anno si basano su nove *frame* (Fig. 15), tutte rilevate nell’estate 2006 (Tab. 19).

Tabella 19 - immagini SPOT5 acquisite nel secondo anno di attività.

Frame	Data acquisizione
66-264	05_08_2006
67-264	06_09_2006
67-265	06_09_2006
67-266	06_09_2006
68-265	21_07_2006
68-266	21_07_2006
70-266	16_08_2006
70-267	16_08_2006
71-266	16_07_2006

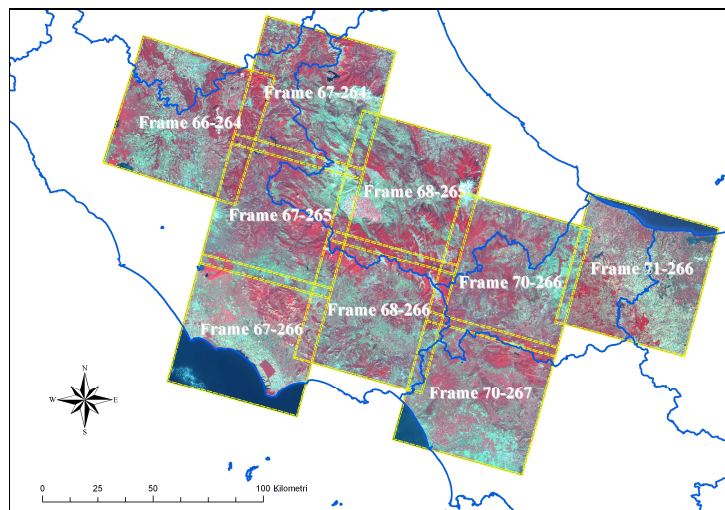


Figura 15 - Rappresentazione all'infrarosso falso colore delle *frame* SPOT5 utilizzate nel secondo anno di sperimentazione.

Infine nel terzo anno il dato SPOT 5 impiegato è costituito da tre scene singole e tre *stripes* (Fig. 16), registrate al termine dell'estate 2007 (Tab. 20).

Tabella 20 - immagini SPOT5 acquisite nel terzo anno di attività.

Frame	Data acquisizione
Strip 66	20_09_2007
Strip 67	15_09_2007
Strip 68	15_09_2007
70-266	21_09_2007
70-267	16_09_2007
71-266	17_10_2007

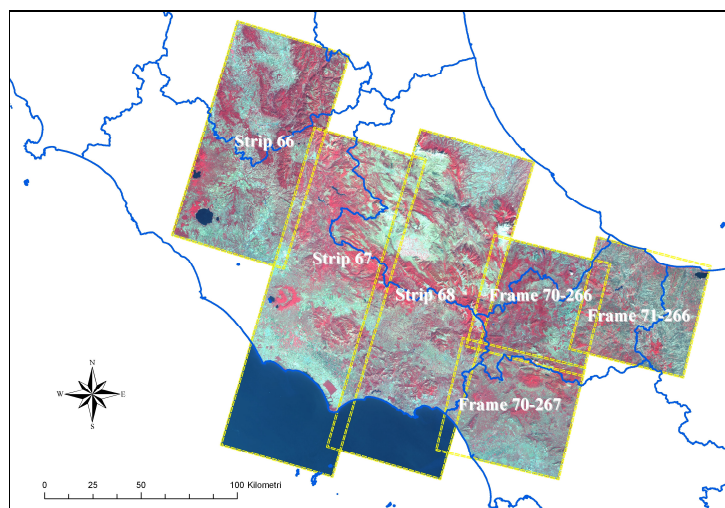


Figura 16 - Rappresentazione all'infrarosso falso colore delle *frame* SPOT5 utilizzate nel terzo anno di sperimentazione.

Il dato è stato scelto in modo da assicurare una copertura temporale che consenta di possedere informazioni comparabili per attività fotosintetica in ambiente mediterraneo e conoscenza dei tagli eseguiti in stagioni silvane successive. In generale il periodo selezionato per l'acquisizione delle immagini satellitari è quello estivo, considerato ottimale per condurre analisi di *change detection* per effetto della stabilità fenologica che caratterizza la vegetazione in questa stagione (Coppin e Bauer, 1996). Selezionando dati in questo periodo, si è in grado di ridurre, rispetto a dati registrati in primavera o autunno, le differenze osservabili in una serie diacronica a causa di variazioni locali nelle precipitazioni e temperature. In autunno inoltre possono essere osservati localmente dei cambiamenti collegati alla perdita delle foglie o all'assunzione di loro particolari colorazioni. Il periodo invernale è stato altresì escluso in quanto: ricade a cavallo della stagione silvana (ottobre-aprile); la sperimentazione ha per oggetto specie caducifoglie.

4.2 PRE-ELABORAZIONI

4.2.1 Correzione geometrica

Le immagini SPOT5 sono state geometricamente ortorettrizzate tramite procedura di ricostruzione del modello geometrico di presa del sensore, selezionando per ciascuna immagine un numero di *Ground Control Points* (GCPs) mediamente pari a 10. Complessivamente per tutta l'area di studio la procedura ha dato buoni risultati permettendo di ottenere un errore di posizionamento delle immagini (espresso in termini di *Root Mean Square Error*, RMSE) inferiore al *pixel* (10 m). Solamente per alcune immagini utilizzate durante il primo anno di attività sono stati rilevati errori di posizionamento geometrico superiori al suddetto limite di tolleranza (le *frames* 68-266 e 70-267 presentano un angolo di ripresa del sensore $>10^\circ$ e le procedure di ortorettifica non hanno permesso una coregistrazione di qualità).

4.3 DATI ANCILLARI

Per l'intera area di studio è stata utilizzata la seguente documentazione ancillare:

- copertura ortofotografica digitale in bianco e nero fornita da AGEA (Agenzia per le erogazioni in agricoltura), caratterizzata da una risoluzione nominale a terra di 1 m, disponibile per il periodo 2002-2006.
- copertura ortofotografica digitale a colori del progetto IT2000 con risoluzione geometrica nominale di 1m, acquisita nell'anno 1998.
- modelli digitali del terreno con passo da 75 a 30 m;
- classificazione dell'uso e copertura del suolo CLC 2000 con approfondimento al 4° livello gerarchico, in formato vettoriale, prodotta in scala 1: 100.000.

Limitatamente alla Regione Molise è stata inoltre reperita la carta dei tipi forestali, redatta in formato vettoriale in scala 1:10.000.

5. METODI

5.1 MAPPATURA DELLE SUPERFICI TAGLIATE A RASO MEDIANTE INTERPRETAZIONE A VIDEO

La perimetrazione delle superfici tagliate a raso all'interno di boschi cedui è avvenuta per interpretazione visuale delle immagini multispettrali SPOT5 e digitalizzazione a video in ambiente GIS. Per facilitare le suddette operazioni sono state prodotte immagini in falso colore combinando tra loro le bande spettrali del verde, del rosso e dell'infrarosso vicino.

In fase di interpretazione a video delle tagliate non sono stati riscontrati significativi disturbi dovuti alla presenza di matricine: sia la risoluzione spaziale delle immagini SPOT5, sia la modalità di confronto con le immagini antecedenti il taglio hanno permesso infatti di poter seguire sempre in modo adeguato il confine delle singole tagliate, anche nel caso di cedui intensamente matricinati con rilevante copertura da parte delle chiome. La discriminazione tra tagliate e eventuali aree percorse dal fuoco è stata basata su due criteri oggettivi di facile rilevamento sulle immagini SPOT5: (i) da un punto di vista geometrico, i confini delle tagliate tendono ad avere forma regolare (in genere, più o meno rettangolare/trapezoidale) a differenza di quelli delle aree percorse dal fuoco, che sono in genere complessi e frastagliati; (ii) da un punto di vista spettrale, i residui post incendio (cenere e materiale carbonizzato) hanno una risposta significativamente diversa da quella delle aree sottoposte a utilizzazione. Molto di rado le due componenti, geometrica e spettrale, lasciano dubbi in fase di interpretazione a video delle immagini SPOT5 ai fini della discriminazione tra i due tipi di eventi. Un esempio di area percorsa da incendio su immagine SPOT5 è mostrato in figura 17.

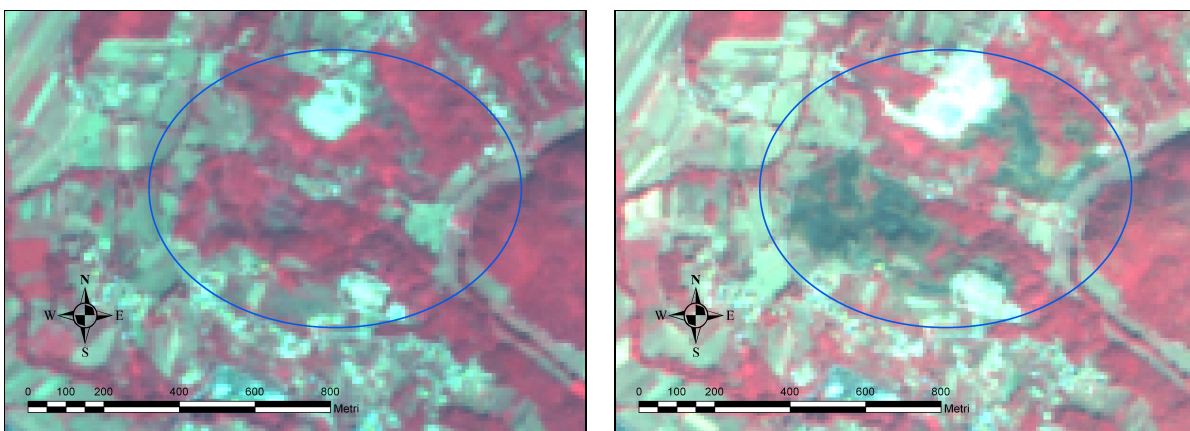


Figura 17 – Particolare del dato SPOT5 in composizione infrarosso falso colore in cui viene evidenziata un'area percorsa da incendio (tonalità grigio scuro): a sinistra, immagine del 2006; a destra, immagine del 2007.

Le tagliate cartografate sono state classificate sulla base dell'anno di utilizzazione definito tramite comparazione delle date di acquisizione del dato satellitare e delle ortofoto aeree. Laddove si dispone di una

copertura multitemporale SPOT5, l'individuazione delle superfici utilizzate a raso è avvenuta per confronto diretto del dato satellitare (Fig. 18).

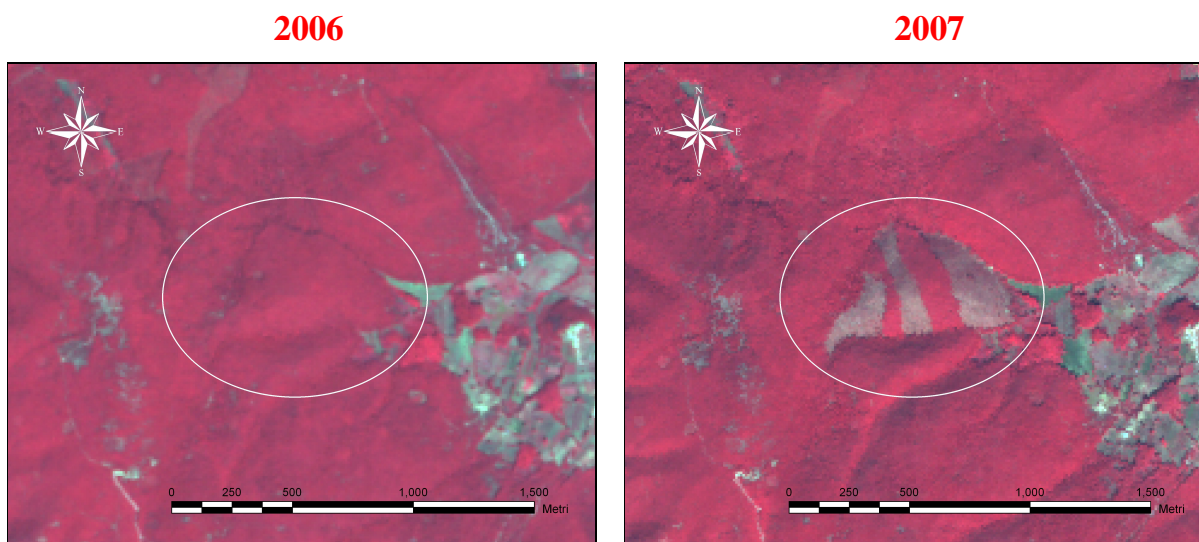


Fig. 18 – Esempio di superfici tagliate a raso delineate mediante confronto multitemporale di immagini SPOT5 in composizione infrarosso falso colore.

5.1.1 Validazione

L'accuratezza della cartografia generata per interpretazione del dato SPOT5 è stata valutata attraverso un approccio campionario. All'intera area di studio è stato sovrapposto un reticolato con maglie esagonali di superficie pari a 1 km² (Fig. 19) da cui sono state estratte in modo casuale 213 unità campionarie. All'interno di ciascuna di esse un interprete ha cartografato le tagliate individuate per mezzo della copertura ortofotografica digitale ad alta risoluzione. Il prodotto ottenuto è stato dapprima verificato in campo e successivamente comparato con l'interpretazione a video del dato SPOT5 per il calcolo degli errori di omissione (aree effettivamente tagliate non cartografate) e commissione (aree in realtà non tagliate ma cartografate come tali).

Delle 213 unità di campionamento selezionate 151 sono risultate boscate. All'interno di queste l'attività di interpretazione originaria su base SPOT5 ha individuato complessivamente 124,07 ha di superficie tagliata a raso contro i 123,09 ha riscontrati attraverso l'interpretazione a video di controllo, con una sovrastima pari quindi allo 0,8% del valore corretto.

Considerando il dominio dell'area complessivamente cartografata nella perimetrazione su base SPOT e su quella di controllo (pari a 133,34 ha), dall'analisi della matrice di confusione la superficie tagliata correttamente individuata è risultata pari a 113,82 ha, corrispondente a un valore di *overall accuracy* pari all'85,36%. Gli errori di omissione e commissione risultano rispettivamente pari al 6,95% e al 7,69%.

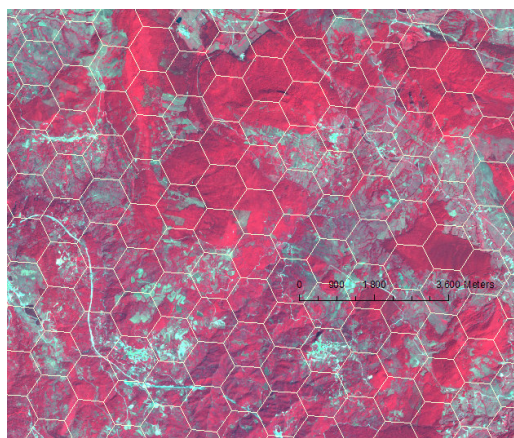


Figura 19 – Unità di campionamento sovrapposte al dato multispettrale SPOT5.

Questi errori sono principalmente ascrivibili a differenze nella delimitazione delle medesime superfici da parte degli interpreti. L'utilizzo delle immagini SPOT5 si è dimostrato infatti competitivo con quello delle ortofoto aeree sia per l'individuazione dei tagli (in alcuni casi è stato possibile individuare anche superfici utilizzate di 400-500 m²) sia per una corretta discriminazione dei fenomeni di disturbo verificatesi a carico del bosco.

In riferimento a quest'ultimo aspetto, interpreti non coinvolti nella realizzazione della mappatura delle tagliate hanno provveduto, sulla base delle immagini SPOT5 acquisite durante il terzo anno di sperimentazione, all'individuazione dei cambiamenti occorsi alle aree forestali differenti dagli interventi di taglio. In particolare sono stati individuati circa 205 ha di superficie incendiata, 13,2 ha convertiti in usi di tipo agricolo, 9 ha trasformati in aree estrattive, 1 ha e 0,2 ha disboscati rispettivamente per l'ampliamento di aree urbane e per la creazione di nuova viabilità. In figura 20 e 21 sono riportati alcuni esempi dei cambiamenti di uso del suolo riscontrati per le superfici boscate. Attraverso l'incrocio della mappa delle superfici tagliate a raso con quella relativa agli altri cambiamenti individuati è stato possibile accertare che in nessun caso si è avuta una sovrapposizione dei due strati informativi, ossia nessuna superficie interessata dalle suddette forme di cambiamento è stata erroneamente cartografata come superficie tagliata.

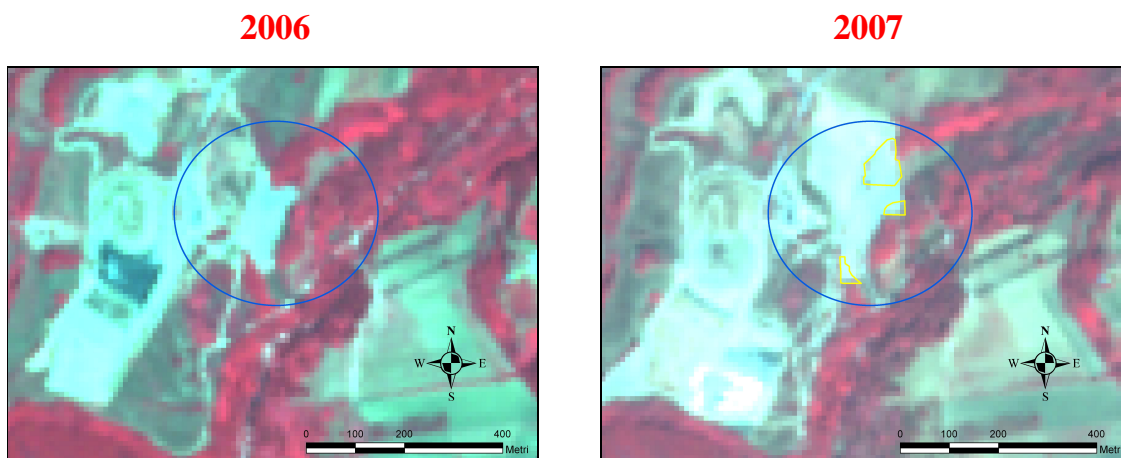


Fig. 20 – Esempio di cambiamento dell'uso del suolo di superfici boscate per effetto dell'ampliamento di una cava.

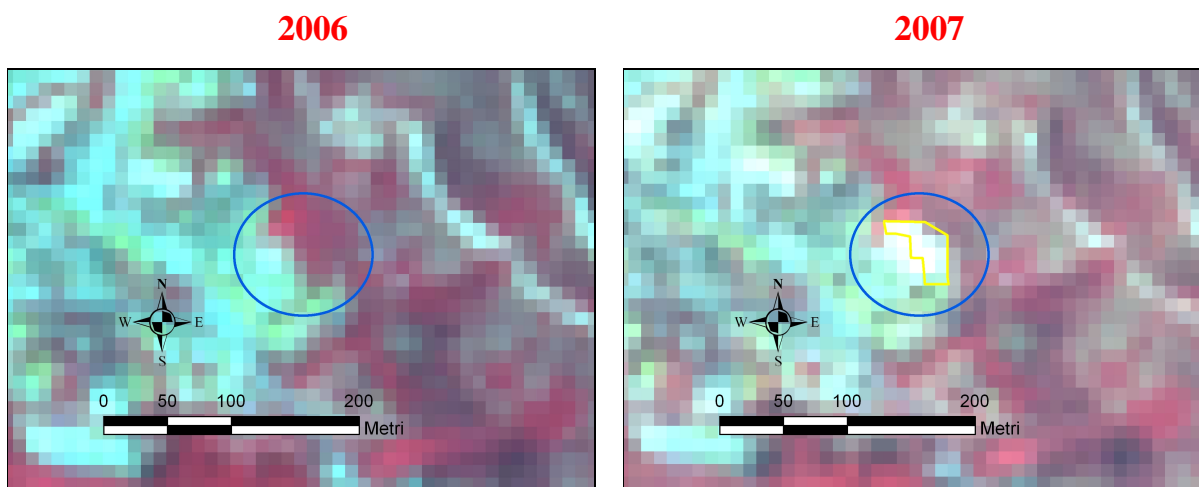


Fig. 21 – Esempio di area disboscata ai fini dell’espansione di un centro urbano.

È stata altresì verificata la geometria della perimetrazione delle tagliate prodotta sulla base del dato SPOT5 mediante rilievo a terra condotto su un campione di 35 tagliate scelto casualmente. Il campione esaminato ha compreso cedui quercini caducifoglie (a prevalenza di cerro e roverella) e sempreverdi (a prevalenza di leccio), cedui castanili e cedui misti con orniello e ostraia. Per ciascuna tagliata selezionata sono stati rilevati in campo punti notevoli del perimetro con strumentazione GPS a precisione submetrica (Fig. 22), per una misurazione complessiva di 626 punti sottoposti successivamente a correzione post-differenziale.

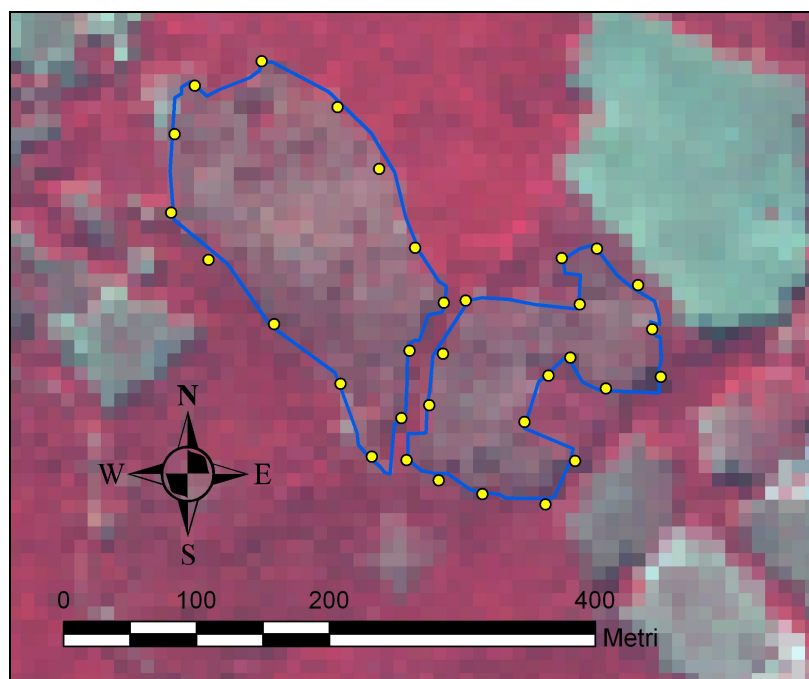


Figura 22 - Esempio di verifica della perimetrazione delle tagliate. In giallo i punti GPS acquisiti a terra sul margine delle tagliate, in blu il confine perimetrato a video sulla base dell’immagine SPOT5.

L'errore di perimetrazione delle tagliate è stato valutato attraverso il calcolo dello scostamento (distanza euclidea) tra il limite dei tagli individuati a video per interpretazione del dato SPOT5 e le posizioni a terra rilevate con GPS. Per convenzione, agli scostamenti corrispondenti a posizioni rilevate in campagna che ricadono all'interno e all'esterno del confine interpretato è stato associato rispettivamente segno negativo e segno positivo (Fig. 23).

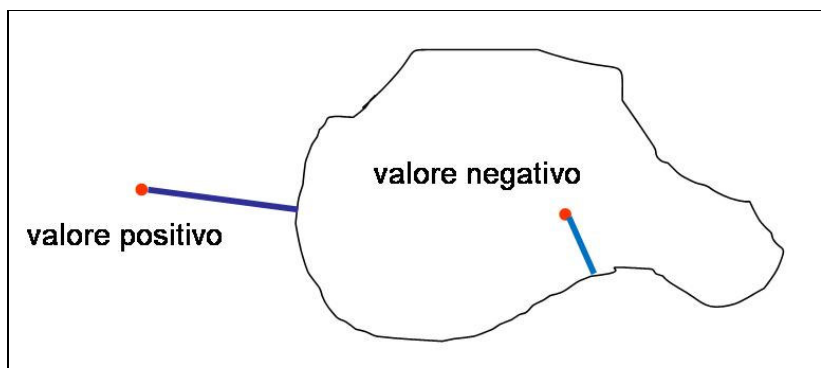


Figura 23 – Esempio di errore di perimetrazione. In rosso la posizione GPS rilevata in campo sul margine della tagliata, in nero il perimetro della stessa delineato a video per interpretazione del dato SPOT5 e in blu la distanza euclidea che intercorre tra loro.

La distribuzione degli scostamenti per i 626 rilievi GPS è riportata in figura 24: la media è pari a -0,42 m e l'errore standard è pari a 0,21 m.

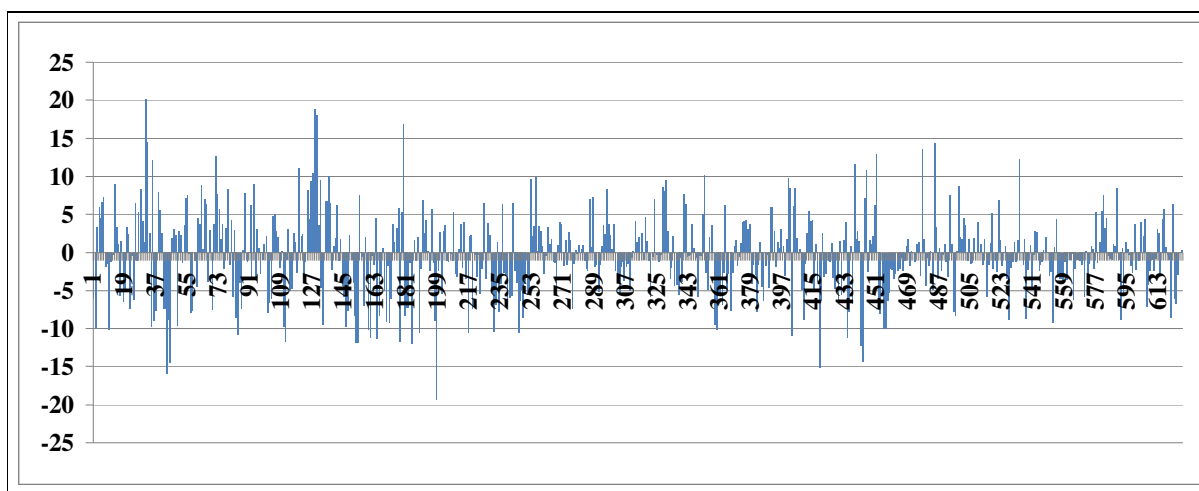


Figura 24 - Distribuzione degli errori di posizionamento (espressi in metri) del margine delle tagliate per ognuna delle 626 posizioni GPS misurate a terra.

I risultati conseguiti confermano l'attendibilità dei dati ottenuti per interpretazione a video delle immagini SPOT5 e quindi di fatto l'applicabilità degli stessi per:

1. stimare le possibili discrepanze con le statistiche ufficiali riportate a livello di singola UA;

2. validare procedure di classificazione semi-automatica delle tagliate a raso applicate ad immagini satellitari ad alta risoluzione.

5.2 ACQUISIZIONE DELLE STATISTICHE UFFICIALI DELLE DICHIARAZIONI DI TAGLIO DEI CEDUI

Per l'intera area investigata e per gli stessi anni di acquisizione delle immagini SPOT5 sono state reperite, presso i Comandi Stazione del CFS, le statistiche concernenti le dichiarazioni di taglio dei cedui. Le informazioni sono state raccolte laddove possibile con dettaglio comunale e negli altri casi a livello di giurisdizione di Comando Stazione del CFS. Di seguito questi ambiti di reperimento dei dati sono indicati come Unità Amministrative (UA).

Per gli anni 2002, 2003, 2004 e 2005 sono state ottenute statistiche distinte per comune, ad eccezione della provincia di Caserta per la quale è stato raccolto un dato aggregato per giurisdizione di Comando Stazione del CFS (Fig. 25). Successivamente, oltre che per la suddetta provincia, il dato è stato acquisito accorpato per Comando Stazione del CFS anche per le province dell'Aquila e Terni nel 2006, e per le province dell'Aquila e Perugia nel 2007.

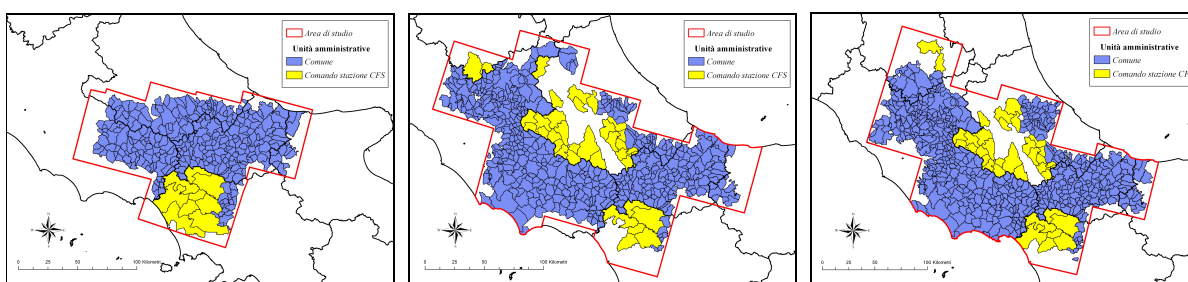


Figura 25 – Livello di aggregazione dei dati amministrativi delle dichiarazioni di taglio raccolti per il primo, secondo e terzo anno di sperimentazione (riportati nell'ordine da sinistra a destra).

L'insieme dei dati amministrativi raccolti per i sei anni esaminati è stato riversato all'interno di un geodatabase appoggiato ai limiti amministrativi (Fig. 26 e Tab. 21), escludendo le UA non interamente ricoperte dalle immagini satellitari. Nel secondo e terzo anno di sperimentazione è stato necessario inoltre escludere dalle analisi anche alcuni Comandi Stazione del CFS della provincia dell'Aquila, per i quali non è stato possibile definire con certezza il territorio di competenza ai fini della rilevazione in oggetto.

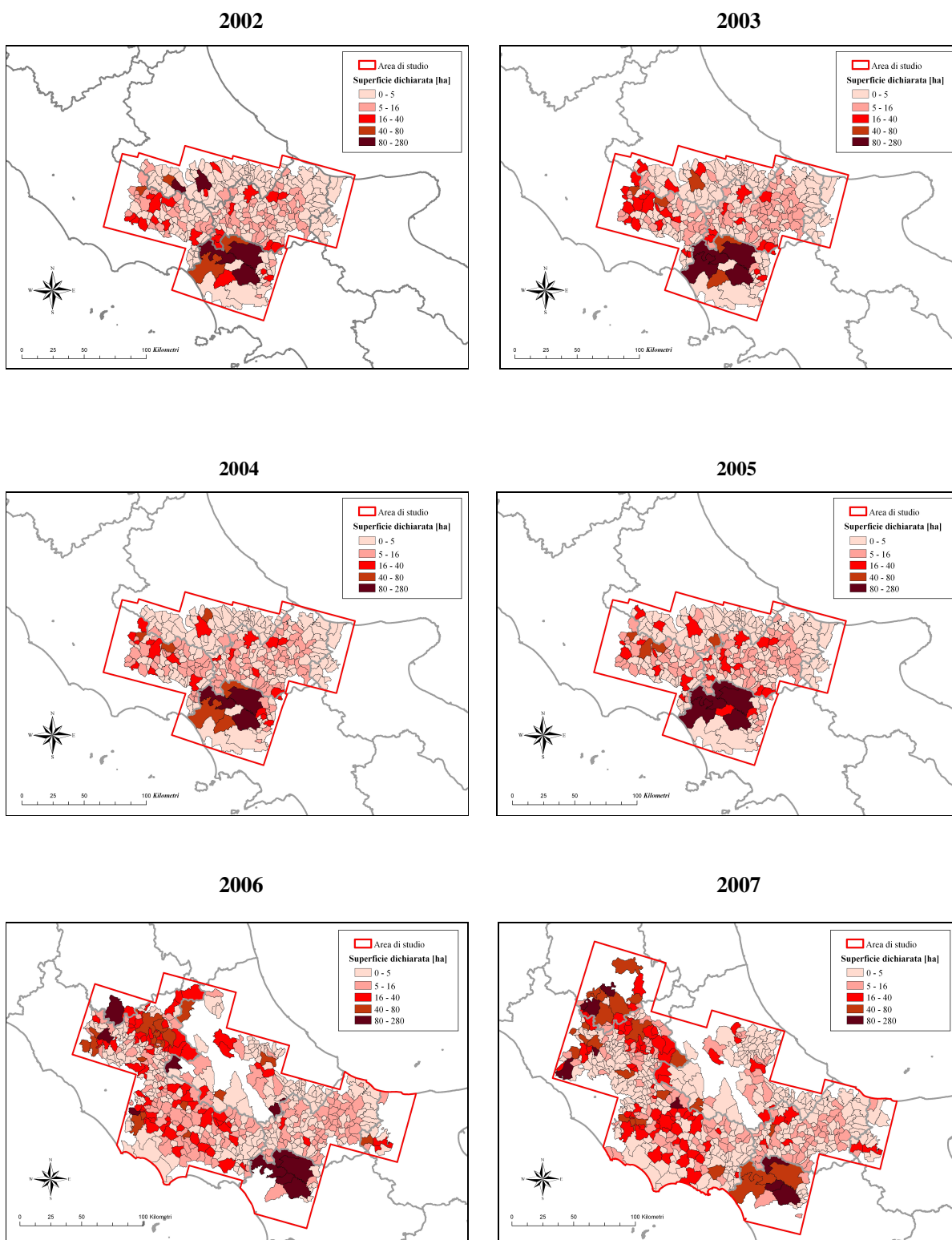


Figura 26 – Superficie di taglio annualmente dichiarata distinta per UA.

Tabella 21 - Superficie annuale delle dichiarazioni di taglio aggregata per Provincia.

Provincia	2002 [ha]	2003 [ha]	2004 [ha]	2005 [ha]	2006 [ha]	2007 [ha]
BENEVENTO	116,5	119,1	158,5	120,7	16,5	20
CAMPOBASSO	436	534	496	446	373	332
CASERTA	522,5	734	563	633	683,6	575
CHIETI	0	0	0	0	23,8	23,7
FOGGIA	0	0	0	0	124,7	77,9
FROSINONE	569,1	736,6	640,6	596,4	907,1	910,9
ISERNIA	330	364	367	408	225	340
L'AQUILA	353,4	159	142,5	162,5	768,9	225,2
LATINA	0	0	1,7	3,7	163,3	182,3
PERUGIA	-	-	-	-	-	65,8
PESCARA	-	-	-	-	60,7	134,5
RIETI	-	-	-	-	956,2	689,4
ROMA	-	-	-	-	899	908,3
TERAMO	-	-	-	-	17,5	-
TERNI	-	-	-	-	152,2	921,6
VITERBO	-	-	-	-	394,1	420,9
Totale	2327,5	2646,7	2369,2	2370,4	5765,5	5827,5

5.3 CONFRONTO TRA SUPERFICI TAGLIE A RASO MAPPATE MEDIANTE IMMAGINI SPOT5 E STATISTICHE AMMINISTRATIVE UFFICIALI

Ai fini del confronto con le statistiche ufficiali disponibili aggregate per UA, le superfici tagliate a raso delineate per interpretazione a video delle immagini SPOT5 sono state accorpate allo stesso livello territoriale intersecando in ambiente GIS la mappa delle tagliate con i confini amministrativi.

Il confronto è avvenuto utilizzando un sottoinsieme del database delle dichiarazioni di taglio. Sono state infatti escluse le UA che al momento dell'acquisizione del dato satellitare fossero interessate da nuvole ed ombre.

Complessivamente per i tre anni di sperimentazione le UA per le quali sono risultate disponibili in modo completo per lo stesso anno sia la perimetrazione delle tagliate da SPOT5 sia le informazioni amministrative sull'ampiezza delle tagliate stesse sono state pari a 1127, ricadenti nelle Province di Benevento, Campobasso, Caserta, Chieti, Foggia, Frosinone, Isernia, L'Aquila, Latina, Perugia, Pescara, Rieti, Roma, Teramo, Terni e Viterbo. Il campione analizzato per ogni anno è riportato in figura 27 e in tabella 22. La superficie utilizzata per il confronto è pari a 43987 km²: trattasi di 41 UA (1259 km²) per l'anno 2002, 118 UA (4001 km²) per l'anno 2003, 46 UA (2278 km²) per l'anno 2004, 25 UA (2490 km²) per l'anno 2005, 391 UA (13969 km²) per l'anno 2006 e 506 UA per l'anno 2007 (19990 km²).

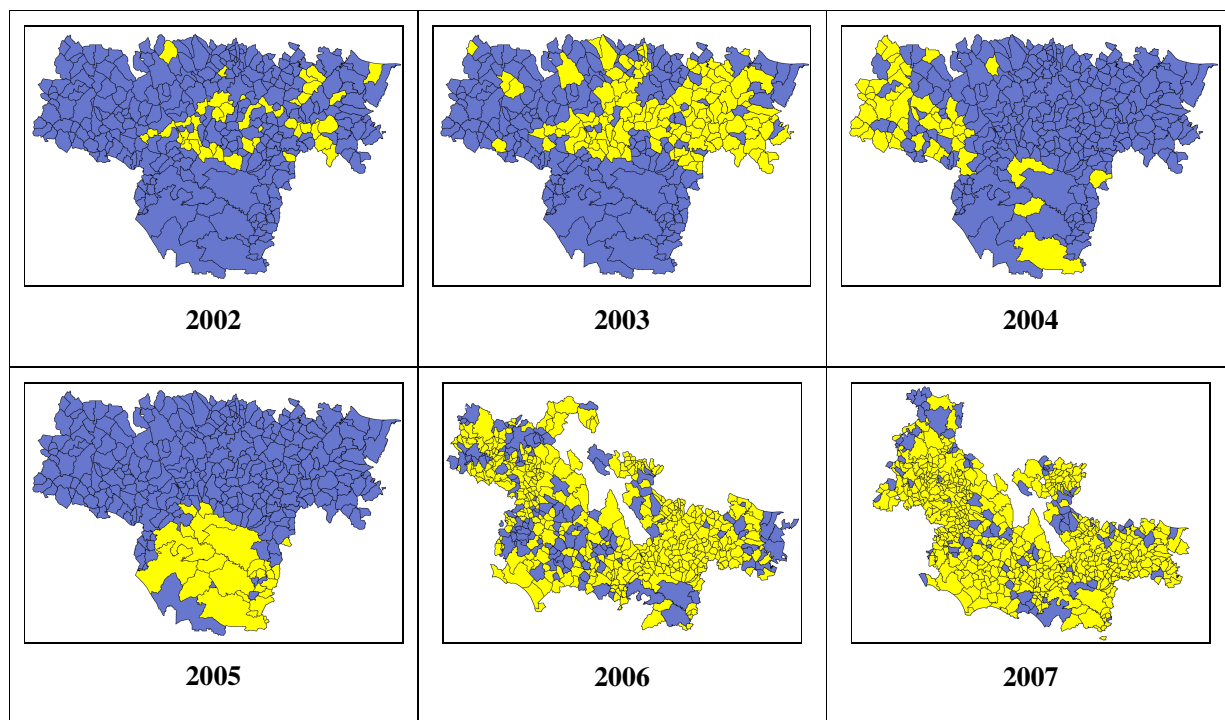


Figura 27 – Localizzazione delle unità amministrative utilizzate per l’analisi della relazione tra tagliate dichiarate e tagliate monitorate.

Tabella 22 - Percentuale di superficie analizzata nella relazione tra tagliate dichiarate e tagliate monitorate distinta per Provincia e anno.

PROVINCIA	Superficie analizzata					
	2002	2003	2004	2005	2006	2007
BENEVENTO	-	-	-	15%	6%	10%
CAMPOBASSO	18%	60%	2%	-	68%	73%
CASERTA	-	-	24%	65%	15%	43%
CHIETI	-	9%	-	-	23%	21%
FOGGIA	1%	4%	-	-	3%	8%
FROSINONE	2%	10%	39%	-	60%	82%
ISERNIA	37%	65%	-	7%	100%	94%
L'AQUILA	1%	8%	6%	-	40%	49%
LATINA	-	-	-	-	48%	82%
PERUGIA	-	-	-	-	-	5%
PESCARA	-	-	-	-	28%	55%
RIETI	-	-	-	-	62%	71%
ROMA	-	-	-	-	25%	51%
TERAMO	-	-	-	-	10%	-
TERNI	-	-	-	-	13%	39%
VITERBO	-	-	-	-	7%	13%

5.4 CLASSIFICAZIONE SEMI-AUTOMATICA DELLE TAGLIATE A RASO

In un subset (ampiezza complessiva pari a 2148 km²) multitemporale, estratto dalle immagini SPOT5 acquisite durante i primi due anni di sperimentazione, sono state valutate le potenzialità di differenti approcci di classificazione semi-automatica delle superfici tagliate a raso. In particolare sono stati condotti una serie di test finalizzati a: (i) comparare classificazioni *pixel-oriented* con quelle *object-oriented*; (ii) valutare l'importanza della normalizzazione radiometrica all'interno di analisi di *change detection*; (iii) valutare l'efficacia di differenti algoritmi di classificazione *pixel-oriented*.

La sperimentazione si fonda sull'ipotesi che le aree tagliate a raso abbiano nel tempo un comportamento spettrale diverso dalle superfici forestali non utilizzate. L'ipotesi trova conferma in un'analisi condotta sull'andamento dell'indice NDVI nel periodo esaminato, i cui risultati evidenziano una sostanziale stabilità dell'attività fotosintetica per le aree non utilizzate, un aumento dell'attività fotosintetica per le superfici tagliate prima del 2004 e una diminuzione dell'attività fotosintetica per le superfici utilizzate dal 2004 al 2006 (Fig. 28). Questo comportamento è simile a quanto osservabile in aree percorse da incendio, tuttavia la presenza di matricine e l'assenza di materiale combusto determina nel tempo nelle aree tagliate differenze spettrali meno nette.

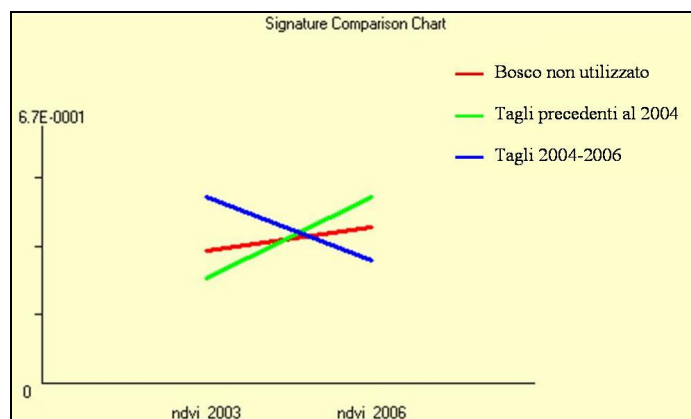


Figura 28 - Valori medi assunti dall'indice NDVI nelle superfici tagliate a raso sulla base delle immagini SPOT5 2003 e 2006 (*frame* 71-266).

Al fine di rimuovere tutte le cause di cambiamento irreali e di stabilire quindi un più corretto collegamento tra dato e processo osservato si è proceduto in sequenza:

1. all'individuazione di un'area per la quale si dispone di una copertura diacronica SPOT5 caratterizzata da un alto livello di coregistrazione del dato;
2. alla normalizzazione radiometrica del dato selezionato;
3. alla creazione di una maschera volta a limitare le analisi alle sole superfici boscate.

L'area selezionata per la sperimentazione ricade interamente nella provincia di Campobasso, all'interno della *frame* 71-266 per la quale si dispone di una coppia di immagini SPOT5 caratterizzate da un errore di coregistrazione inferiore al *pixel*, rilevate rispettivamente il 19 Giugno 2003 e il 16 Luglio 2006.

Le immagini della *frame* 71-266 sono state sottoposte a normalizzazione radiometrica al fine di poter confidare che il cambiamento osservato nel tempo e nello spazio sia reale e non frutto di differenze temporali nella calibrazione del sensore, nelle condizioni atmosferiche e nella posizione del sole.

Non disponendo di dati relativi alle proprietà ottiche dell'atmosfera al momento della ripresa delle immagini satellitari, necessari per condurre una correzione radiometrica assoluta, è stata applicata una normalizzazione relativa che non necessita di informazioni aggiuntive, correggendo i valori di radianza rispetto a un'immagine di riferimento (Jensen *et al.*, 1995). In particolare la procedura adottata si basa sulla selezione di strutture pseudoinvarianti (*PseudoInvariant Features*, PIF), cioè di oggetti di cui si suppone che la radianza non sia variata nel tempo (Schott *et al.*, 1998), attraverso le quali viene definita una regressione lineare tra la radianza registrata dal sensore in due o più rivisitazioni della stessa area. Nel caso in questione, selezionando come PIF aree di acqua profonda e utilizzando come riferimento radiometrico l'immagine SPOT5 acquisita nell'anno 2006, è stato possibile ricavare i coefficienti del modello lineare da applicare a ciascun pixel dell'immagine 2003 per il calcolo di 4 nuove bande spettrali normalizzate.

Al fine di escludere dall'analisi di *change detection* tutti i numerosi cambiamenti spettrali osservabili all'interno di aree agricole, dovuti alla rotazione delle colture e alla differente fase fenologica in cui le stesse si trovano alle date di acquisizione del dato satellitare (Fig. 29), si è provveduto alla preventiva delimitazione delle superfici boscate, avvalendosi della carta dei tipi forestali realizzata per la Regione Molise in scala 1:10.000.

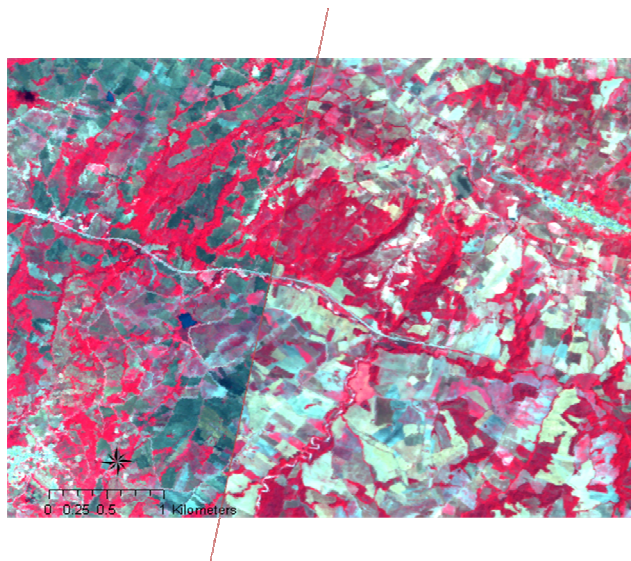


Figura 29 - Particolare della frame 71 266 selezionata per il test. La linea rossa demarca il passaggio tra le due immagini SPOT5: a sinistra l'immagine acquisita il 19/06/2003, a destra quella acquisita il 16/07/2006. La rappresentazione all'infrarosso falso colore evidenzia la differente risposta spettrale delle aree agricole sulle due immagini.

Attraverso l'interpretazione manuale a video sono state infine rimosse le aree interessate da copertura nuvolosa, ottenendo un'area test delle classificazioni semi-automatiche delle tagliate a raso di complessivi 23915 ha (Fig. 30).

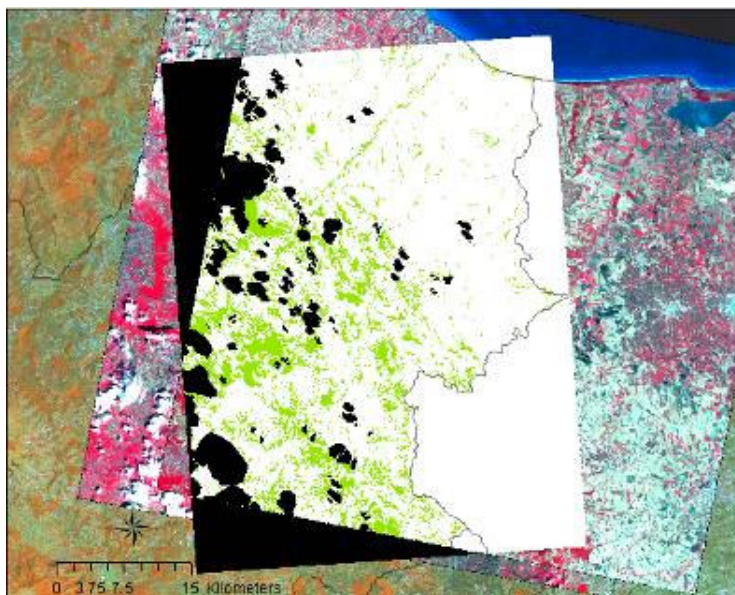


Figura 30 - Area di studio impiegata per i test di classificazione semi-automatica delle tagliate. In verde la superficie boscata oggetto della sperimentazione, in nero le aree escluse per assenza di una copertura diacronica SPOT5 o per la presenza di nuvole, in bianco le aree escluse perché non ricoperte da bosco o esterne alla Regione Molise.

La superficie tagliata a raso individuata per interpretazione a video del dato multitemporale SPOT5 all'interno della suddetta area è riportata distinta per anno in tabella 23. La definizione dell'epoca di taglio delle superfici utilizzate a cavallo delle due immagini SPOT5 è avvenuta per confronto con la data di acquisizione delle ortofoto aeree.

Tabella 23 – Superficie tagliata a raso all'interno dell'area test, individuata per interpretazione a video del dato multitemporale SPOT5.

Anno	2002	2003	2004	2005	2006
Tagliate cartografate [ha]	189,07	250,33	72,76	117,96	165,91

5.4.1 Processamento delle immagini

5.4.1.1 Indici normalizzati

Il *subset* multitemporale SPOT5 è stato utilizzato per il calcolo di indici che permettono di ridurre notevolmente il volume di dati da analizzare e al contempo di disporre di informazioni non desumibili dalle singole bande. In particolare sono stati prodotti una serie di indici consistenti in differenze standardizzate che hanno la capacità di minimizzare l'occorrenza di valori di cambiamento identici per differenti tipi di eventi. Gli indici prodotti sono i seguenti:

- I) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), determinato per gli anni 2003 e 2006;

II) *Multitemporal Normalized Index* (T_I)

$$T_I = \frac{I_n - I_{n-1}}{I_n + I_{n-1}}$$

dove I indica la riflettanza di una data banda spettrale dell'immagine SPOT5 (o una combinazione delle riflettanze in bande diverse) e n l'anno di acquisizione dell'immagine stessa. Si tratta di un indice già proposto con successo per la perimetrazione degli incendi boschivi (Chirici e Corona, 2005) e delle superfici sottoposte al taglio a raso con rilascio di matricine (Lamonaca, 2006). L'indice è stato elaborato per ognuno dei quattro canali spettrali SPOT5 ottenendo in questo modo gli indici T_{green} , T_{red} , T_{nir} e T_{swee} .

5.4.1.2 *Analisi delle componenti principali*

Attraverso l'applicazione dell'analisi delle componenti principali (PCA) al subset multitemporale SPOT5 sono state create tre bande sintetiche caratterizzate da un grado di correlazione inferiore rispetto a quello esistente tra le bande originali. Questa tecnica di pre-classificazione ha permesso infatti, mediante combinazione lineare dei dati originali, di rimuovere o ridurre la ridondanza spettrale esistente tra le singole bande, sintetizzando circa il 95% della varianza riscontrata all'interno del subset multitemporale SPOT5 nelle prime tre componenti estratte.

5.4.2 *Tecniche object-oriented*

Le classificazioni *object-oriented* sono state sviluppate previo processo automatico di segmentazione multitemporale attraverso il quale è stato possibile generare oggetti immagine che raggruppano pixel spazialmente, spettralmente e temporalmente simili. Applicando la segmentazione all'indice multitemporale T è stato possibile infatti delineare con successo, in un'unica soluzione, l'insieme dei tagli a raso praticati durante l'intero periodo osservato (Fig. 31). Tutte le classificazioni avvengono sulla base di un unico livello di segmentazione, prodotto utilizzando congiuntamente l'indice T calcolato per le quattro bande spettrali SPOT5 (T_{green} , T_{red} , T_{nir} , T_{swee}) e adottando i parametri guida riportati in tabella 24. Per garantire la delimitazione di tagliate a raso di estensione inferiore a 0,5 ha è stato necessario impostare il fattore di scala a 9. Nel complesso sono stati prodotti 26834 oggetti caratterizzati da una dimensione media di 0,9 ha (con deviazione standard di 0,85 ha).

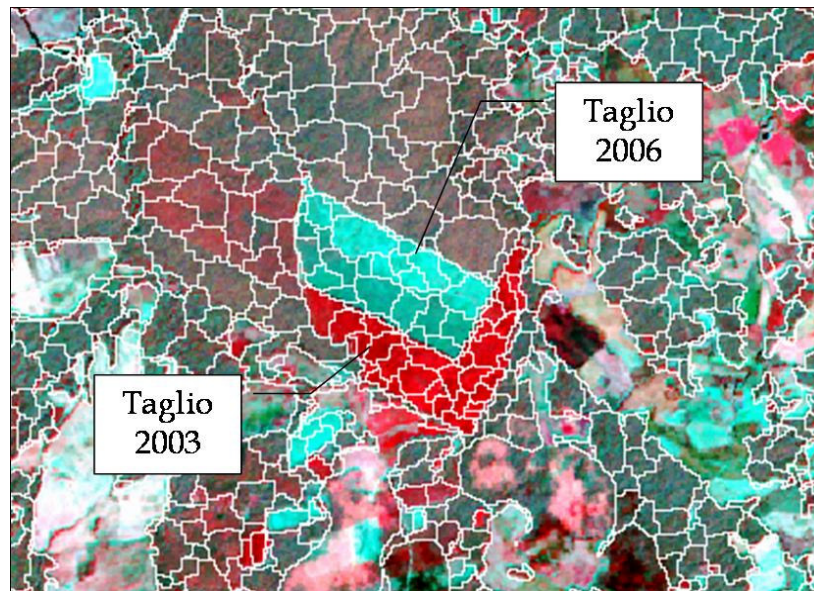


Figura 31 - Combinazione in falso colore dell'indice T calcolato per le bande dell'infrarosso vicino (T_{nir}), del rosso (T_{red}) e del verde (T_{green}), con sovrapposti i poligoni prodotti dalla segmentazione delle superfici boscate. Vengono indicate una superficie tagliata a raso nell'anno 2003 (di colore rosso brillante) e una tagliata condotta nell'anno 2006 (di colore verde smeraldo).

Tabella 24 - Parametri impiegati per il processo di segmentazione multirisoluzione dell'indice T , volto all'individuazione delle superfici tagliate a raso nell'intero periodo esaminato.

Peso relativo di tutti e quattro gli indici	Fattore di scala	Eterogeneità geometrica	Fattore di compattezza
1	9	0,3	0,7

I poligoni generati dalla segmentazione sono stati classificati mediante l'applicazione dell'algoritmo STD.N.N. (descritto al § 2.1.1.2) a parametri di carattere spettrale, geometrico e gerarchico testati con successo nel corso delle sperimentazioni preliminari (Tab. 25). Rispetto a quest'ultime è stato aggiunto, come attributo di classificazione, l'indice di Compattezza, calcolato come prodotto tra la larghezza e lunghezza del poligono diviso per il numero di pixel afferenti al poligono stesso (Chirici e Corona, 2006).

Tabella 25 – Attributi utilizzati per la classificazione *object-oriented* dei poligoni generati dal processo di segmentazione dell'indice T .

Attributo del poligono	Tipo
Media spettrale	Spettrale
Deviazione standard	Spettrale
Area	Geometrico
Length / width	Geometrico
Rectangular fit	Geometrico
Compattezza	Geometrico
Numero di poligoni a contatto sullo stesso livello gerarchico	Gerarchico

5.4.3 Tecniche pixel-oriented

Le classificazioni *pixel-oriented* sono state sviluppate sulla base di quattro differenti tipi di classificatori semi-automatici (*supervised*): *Minimum Distance* (MD), *Maximum Likelihood* (ML), *k-Nearest Neighbors* (k-NN), *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Questi metodi si basano sull'acquisizione di un certo numero di pixel di *training* per ciascuna classe del sistema di nomenclatura adottato al fine di creare una firma spettrale per ogni classe considerata. Le firme spettrali dei pixel da classificare vengono poi confrontate con quelle dei pixel di *training* e al pixel incognito viene attribuita la classe con firma spettrale più simile. In particolare:

- MD caratterizza ogni classe mediante la sua posizione media su ogni banda. Ciascun pixel viene attribuito alla classe per la quale la distanza tra esso e la media della classe stessa è minima.
- ML attraverso dati di media e varianza/covarianza delle firme spettrali è in grado di stimare la probabilità posteriore che un pixel appartenga a ogni classe. I pixel sono poi assegnati alla classe per cui è maggiore la probabilità di appartenenza. La differenza introdotta rispetto al precedente algoritmo è che Maxlike prende in esame l'intercorrelazione esistente tra le bande.
- k-NN opera assegnando i pixel alla classe con la più alta frequenza nei K pixel di *training* spettralmente più simili. In particolare è stato adottato un valore di k pari a 10.
- LDA si basa su combinazioni lineari volte a massimizzare le differenze tra le classi e minimizzare le differenze all'interno delle classi stesse (Klecka, 1980). Al termine del processo il pixel è assegnato alla classe con il più alto valore di S_i , calcolato per ogni i -esima classe del sistema di nomenclatura e per ogni i -esima banda come descritto nella seguente equazione:

$$S_i = c_i + \sum_{j=1}^m (w_{ij} \cdot x_j)$$

dove c_i è una costante, w_{ij} è il peso attribuito alla j -esima banda per la i -esima classe e x_j è il valore del pixel della j -esima banda.

I risultati delle classificazioni sono stati sottoposti a un filtro a finestra mobile di 3 x 3 pixel di tipo *passa basso* volto a limitare il rumore delle immagini.

5.4.4 Protocollo sperimentale

Il protocollo sperimentale è stato configurato al fine di valutare comparativamente le *performance* di classificazione delle superfici tagliate a raso delle tecniche *pixel-oriented* e *object-oriented* applicate a due

differenti sistemi di nomenclatura. Il primo sistema di nomenclatura (Tipo A), volto a distinguere le aree tagliate rispetto a quelle non tagliate, si compone di tre classi: bosco non utilizzato; tagli precedenti al 2004; tagli realizzati nel periodo 2004-2006. Il secondo sistema di nomenclatura (Tipo B), impostato per distinguere le tagliate a raso sulla base dell'anno di esecuzione, si articola in sei classi: bosco non utilizzato; tagli 2002; tagli 2003; tagli 2004; tagli 2005; tagli 2006.

Per ciascun sistema di nomenclatura gli approcci di classificazione considerati vengono posti a confronto attraverso sei distinti set di dati in input:

- I. subset multitemporale SPOT5;
- II. subset multitemporale SPOT5 normalizzato radiometricamente;
- III. dati riportati al punto I più l'indice NDVI calcolato per gli anni 2003 e 2006;
- IV. dati riportati al punto II più l'indice NDVI calcolato per gli anni 2003 e 2006;
- V. prime tre componenti principali derivate dal punto I;
- VI. indice multitemporale normalizzato T calcolato per le quattro bande spettrali SPOT5 (T_{green} , T_{red} , T_{nir} , T_{sweet}).

Un campione casuale degli oggetti generati dal processo di segmentazione, corrispondente al 50% delle superfici tagliate a raso individuate per interpretazione del subset SPOT5, è stato utilizzato come *training sites* per lo sviluppo del classificatore, mentre il rimanente 50% delle superfici è stato utilizzato come *test sites* per la valutazione dell'accuratezza delle classificazioni.

Sia nel sistema di nomenclatura a 3 classi che a maggior ragione in quello a 6 classi la categoria delle aree non utilizzate tende ad avere un'estensione estremamente maggiore delle altre, rappresentando circa il 97% del totale dell'area oggetto di classificazione. Poiché lo sviluppo delle firme spettrali per l'allenamento dei classificatori tende ad essere fortemente influenzata dalla numerosità dei pixel di *training*, se una classe presenta una numerosità molto superiore alle altre inevitabilmente tenderà a essere sovrastimata durante il processo di classificazione (Richards, 1993). Per questo motivo si è provveduto ad estrarre un campione delle superfici forestali non utilizzate che avesse dimensione paragonabile a quello delle aree tagliate, pari rispettivamente al 2% e 1,2% della superficie della classe per il sistema di nomenclatura di tipo A e B. In entrambi i casi, metà del campione è stato selezionato casualmente per la definizione della base di *training* mentre la restante metà è stata utilizzata come *test* per saggiare le classificazioni.

Per la realizzazione delle classificazioni *pixel-oriented* e la successiva validazione sono stati utilizzati i pixel afferenti ai poligoni di *training* e *test* selezionati per la procedura *object-oriented*.

La comparazione sintetica delle *performance* dei classificatori avviene tramite costruzione della matrice di contingenza tra singole classificazioni e *test sites* e conseguente calcolo dell'indice KIA (*Kappa Index of Agreement*), per la valutazione dell'accuratezza globale delle classificazioni, e dell'indice di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per la valutazione delle singole classi mappate.

6. RISULTATI

6.1 CONFRONTO TRA SUPERFICI TAGLIATE A RASO MAPPATE MEDIANTE IMMAGINI SPOT5 E STATISTICHE AMMINISTRATIVE UFFICIALI

Per tutti gli anni esaminati la superficie complessiva tagliata a raso misurata tramite immagini satellitari è risultata superiore alla superficie riportata nella statistica ufficiale (Tab. 26). Lo scostamento massimo si registra per l'anno 2006, per il quale sono stati individuati, sulla base di 391 UA impiegate per il confronto, oltre 1300 ha di superficie utilizzata non dichiarata. La differenza minima si riscontra invece per l'anno 2004, dove su un campione di 46 UA la superficie tagliata omessa a livello amministrativo è pari a circa 25 ha. Considerando le singole province la maggiore discrepanza si osserva, nell'anno 2006, per il territorio di Rieti, dove la superficie rilevata supera la statistica amministrativa di oltre 400 ha. Per i rimanenti anni le maggiori differenze si riscontrano: nel 2002, 2003 e 2007 per la provincia di Isernia, con una superficie monitorata maggiore di quella dichiarata rispettivamente di circa 120 ha, 279 ha e 342 ha; nel 2004 e 2005 per la provincia di Caserta, con una superficie tagliata in eccesso rispetto a quanto registrato a livello amministrativo rispettivamente pari a circa 70 e 82 ha.

Si riscontrano tuttavia casi in cui la superficie dichiarata appare superiore a quella individuata da satellite. In tal senso la maggiore differenza si rileva per la provincia di Frosinone, per la quale nell'anno 2004 sono stati registrati oltre 100 ha di tagliate poi in realtà non eseguite.

Tabella 26 – Superficie tagliata a raso, distinta per anno e provincia, rilevata tramite immagini SPOT5 e registrata a livello amministrativo sulla base delle istanze di taglio, e relativo confronto.

Provincia	2002			2003		
	Monitoraggio [ha]	Dichiarazioni [ha]	Differenza [ha]	Monitoraggio [ha]	Dichiarazioni [ha]	Differenza [ha]
Benevento	-	-	-	-	-	-
Campobasso	212,38	104	+108,38	534,62	375	+159,62
Caserta	-	-	-	-	-	-
Chieti	-	-	-	30,55	6,02	+24,53
Foggia	2,42	0	+2,42	59,18	94	-34,82
Frosinone	42,71	6	+36,71	191,32	79,92	+111,40
Isernia	194,10	74	+120,10	489,61	211	+278,61
L'Aquila	2,80	0	+2,80	54,28	52	+2,28
<i>Totale</i>	<i>454,41</i>	<i>184</i>	<i>+270,41</i>	<i>1359,56</i>	<i>817,94</i>	<i>+541,62</i>

Provincia	2004			2005		
	Monitoraggio [ha]	Dichiarazioni [ha]	Differenza [ha]	Monitoraggio [ha]	Dichiarazioni [ha]	Differenza [ha]
Benevento	-	-	-	184,20	109	+75,20
Campobasso	55,92	25	+30,92	-	-	-
Caserta	131,81	62	+69,81	714,95	633	+81,95
Chieti	-	-	-	-	-	-
Foggia	-	-	-	-	-	-
Frosinone	348,72	457,06	-108,34	-	-	-
Isernia	-	-	-	30,97	28	+2,97
L'Aquila	42,33	9,50	+32,83	-	-	-
<i>Totale</i>	<i>578,78</i>	<i>553,56</i>	<i>+25,22</i>	<i>930,12</i>	<i>770,00</i>	<i>+160,12</i>

Provincia	2006			2007		
	Monitoraggio [ha]	Dichiarazioni [ha]	Differenza [ha]	Monitoraggio [ha]	Dichiarazioni [ha]	Differenza [ha]
Benevento	20,48	13,92	+6,56	5,50	19,99	-14,49
Campobasso	362,72	327	+35,72	322,24	306	+16,24
Caserta	204,76	182,50	+22,26	427,27	422	+5,27
Chieti	16,86	8,30	+8,56	10,92	6,77	+4,15
Foggia	6,78	22,87	-16,09	49,84	46,17	+3,67
Frosinone	740,85	398,38	+342,47	676,21	529,51	+146,70
Isernia	609,14	225	+384,14	635,67	294	+341,67
L'Aquila	258,14	223,42	+34,72	287,20	114,71	+172,49
Latina	70,91	62,22	+8,69	149,78	123,92	+25,85
Perugia	-	-	-	70,77	65,80	+4,97
Pescara	20,31	8,19	+12,12	17,67	21,82	-4,14
Rieti	1007,86	569,35	+438,51	890,85	642,05	+248,80
Roma	233,96	214,29	+19,67	998,63	704,47	+294,15
Teramo	4,98	8,09	-3,12	-	-	-
Terni	148,32	120,50	+27,82	381,21	384,18	-2,97
Viterbo	39,39	53,21	-13,82	129,48	134,99	-5,51
<i>Totale</i>	<i>3745,44</i>	<i>2437,25</i>	<i>+1308,19</i>	<i>5053,25</i>	<i>3816,38</i>	<i>+1236,87</i>

La superficie media tagliata a raso per UA individuata attraverso l'interpretazione a video delle immagini multispettrali SPOT5 è pari a 10,76 ha (con una deviazione standard di 19,50 ha), mentre quella desunta dalle statistiche ufficiali è pari a 7,61 ha (con una deviazione standard di 15,81 ha).

La relazione tra tagliate monitorate e tagliate dichiarate per UA è sintetizzata, distinta per anno, nelle seguenti figure.

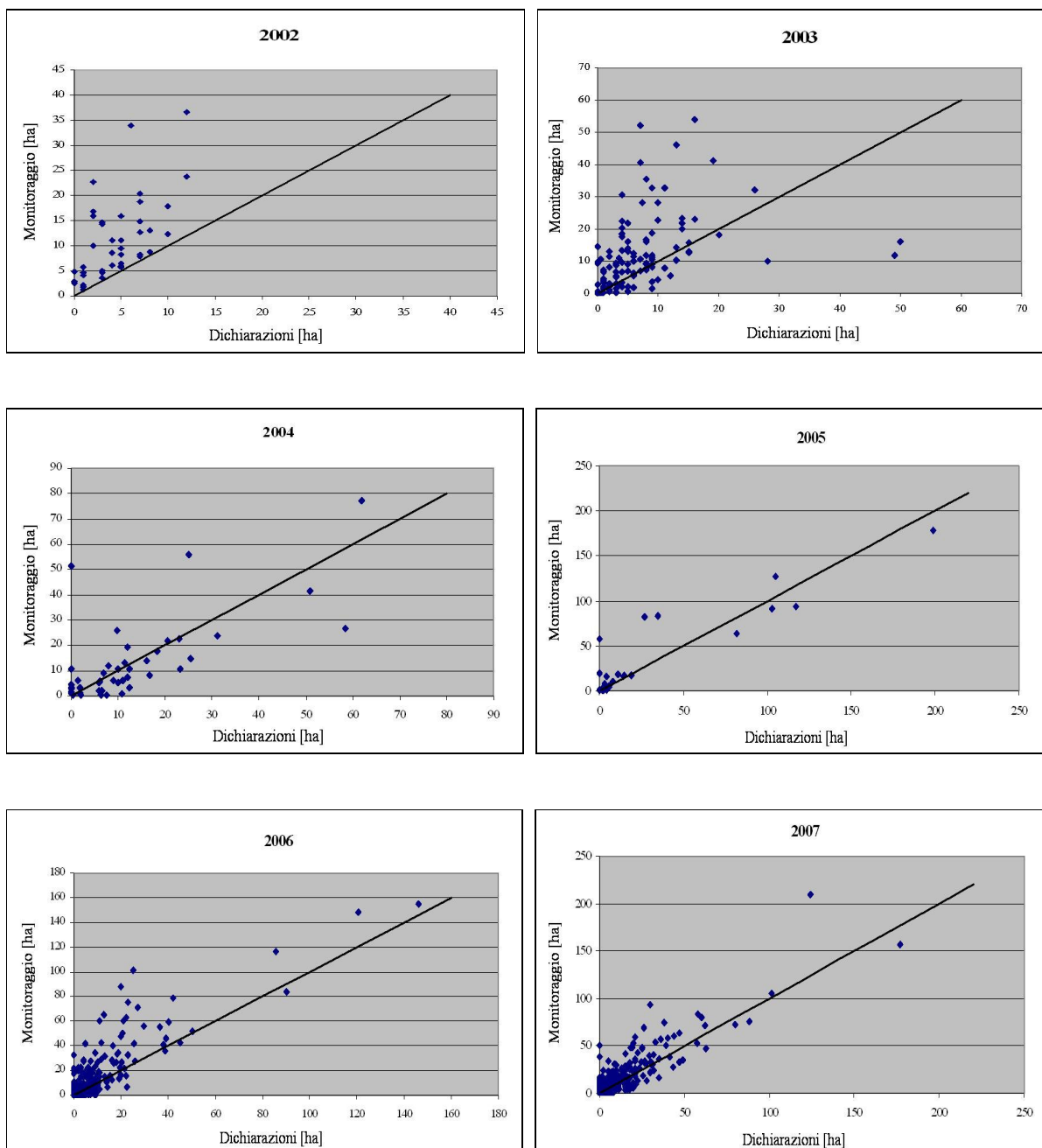


Figura 32 – Relazione per singolo anno di indagine tra superficie tagliata dichiarata e monitorata riscontrata per ciascuna UA (rappresentata con un punto) rispetto al teorico rapporto 1:1 riprodotto dalla retta.

Considerando l'insieme delle 1127 UA utilizzate per il confronto, le tagliate a raso osservate per il periodo 2002-2007 mediante SPOT5 (numerosità pari a 9557) ammontano ad una superficie di 12120 ha (Fig. 33), mentre quelle riscontrate amministrativamente assommano a 8579 ha, con uno scostamento medio per UA pari a circa 3,14 ha (Tab. 27).

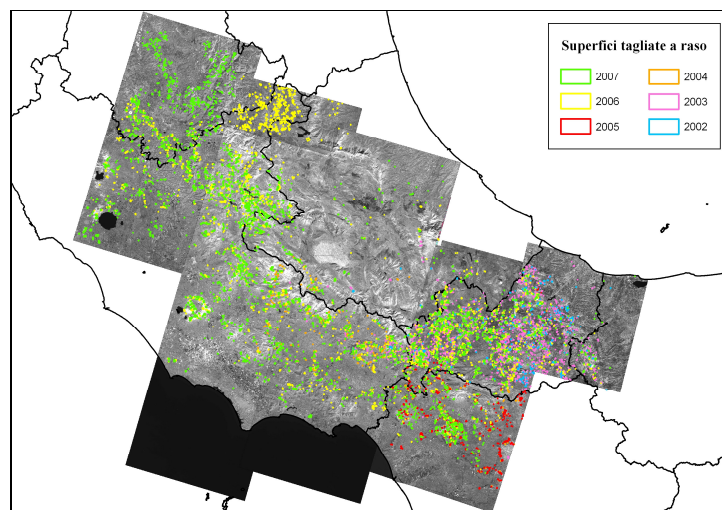


Figura 33 – Mappa delle superfici tagliate a raso individuate per i vari anni esaminati attraverso interpretazione a video del dato SPOT5.

Tabella 27 - Parametri statistici dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente a fini statistici in ciascuna UA.

	Media [ha]	Deviazione standard [ha]	Minimo [ha]	Massimo [ha]
Monitoraggio - Dichiarazioni	3,14	10,25	-37,21	84,99

Questo scostamento medio risulta altamente significativo sia secondo il test parametrico *t* che secondo quello non parametrico di *Wilcoxon* per dati appaiati (Tab. 28).

Tabella 28 - Significatività dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente a fini statistici in ciascuna UA, valutata mediante test *t* (t) e test di *Wilcoxon* (Z) per dati appaiati; *** = $P < 0,001$.

	t	Z
Monitoraggio - Dichiarazioni	10,29***	9,25***

Il database generato per le 1127 UA è stato quindi utilizzato al fine di evidenziare se lo scostamento esaminato presentasse differenze significative tra le Regioni e tra gli anni di esecuzione dei tagli.

Attraverso analisi della varianza univariata sono risultate differenze significative sia tra le Regioni (Tab. 29) che tra gli anni delle utilizzazioni (Tab 30).

Tabella 29 - Significatività delle differenze per Regione dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente.

	Somma dei quadrati	gl	Media dei quadrati	F	Sig.
Fra gruppi	1624,699	5	324,940	3,122	,008
Entro gruppi	116663,371	1121	104,071		
Totale	118288,070	1126			

Tabella 30 - Significatività delle differenze per anno di rilievo dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente.

	Somma dei quadrati	gl	Media dei quadrati	F	Sig.
Fra gruppi	1574,255	5	314,851	3,024	,010
Entro gruppi	116713,815	1121	104,116		
Totale	118288,070	1126			

Ricorrendo al test a posteriori HSD di Tukey sono state accertate in particolare differenze significative nello scostamento medio oggetto di analisi tra la Regione Puglia e la Regione Campania (Tab. 31), e tra l'anno 2004 e gli anni 2002 e 2005 (Tab 32).

Tabella 31 – Confronto tra Regioni per la stima delle differenze significative dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente.

Regione	N° osservazioni (UA)	Sottoinsieme per $\alpha = .05$	
		1	2
Puglia	23	-1,9483	
Abruzzo	176	1,6319	1,6319
Umbria	16	1,8639	1,8639
Lazio	513	3,0123	3,0123
Molise	351	4,2118	4,2118
Campania	48		5,1363

Tabella 32 – Confronto tra anni di rilievo per la stima delle differenze significative dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente.

ANNO	N° osservazioni (UA)	Sottoinsieme per $\alpha = .05$	
		1	2
2004	46	,5483	
2007	506	2,4444	2,4444
2006	391	3,3458	3,3458
2003	118	4,5900	4,5900
2005	25		6,4040
2002	41		6,5951

L'andamento dell'ampiezza complessiva osservata da telerilevamento in ciascuna UA rispetto al dato riscontrato amministrativamente è strettamente lineare (Fig. 34).

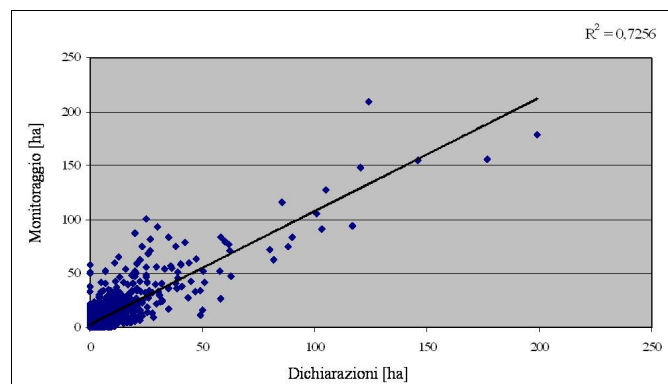


Figura 34 - Relazione tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente a fini statistici in ciascuna UA.

Lo scostamento tra i due valori non è influenzato dall'estensione della UA, né in termini assoluti (Fig. 35) né percentuali.

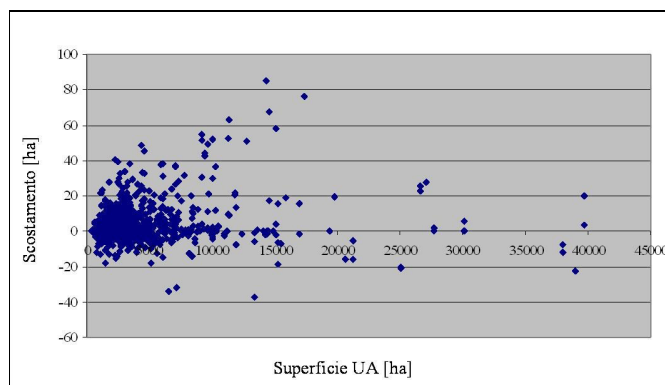


Figura 35 - Andamento dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente in ciascuna UA, riportato in funzione dell'estensione della UA.

Analogamente lo scostamento tra ampiezza misurata delle tagliate e ampiezza dichiarata non è influenzato dal totale della superficie tagliata monitorata, né in termini assoluti (Fig. 36) né percentuali.

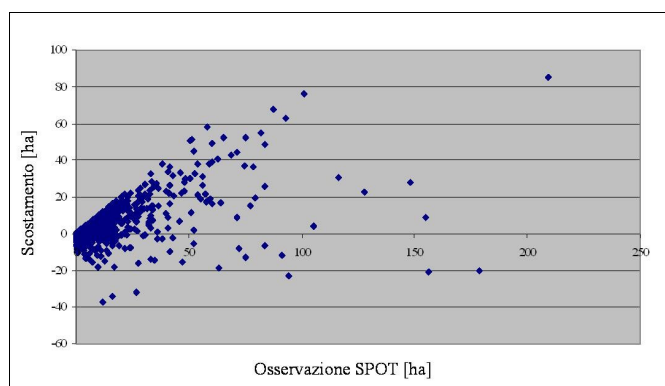


Figura 36 - Andamento dello scostamento tra estensione delle tagliate a raso osservata su immagini SPOT5 ed estensione riscontrata amministrativamente in ciascuna UA, riportato in funzione dell'estensione rilevata da satellite per UA.

6.2 CLASSIFICAZIONE SEMI-AUTOMATICA DELLE SUPERFICI TAGLIATE A RASO

6.2.1 Classificazioni pixel-oriented

Tra le classificazioni prodotte sulla base del sistema di nomenclatura a tre classi, la migliore prestazione in assoluto si registra applicando il classificatore di *Fisher* al III o al IV set di dati, raggiungendo in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,67 (Tab. 33 e Fig. 37).

Considerando le classificazioni elaborate sulla base del set multitemporale SPOT5 la maggiore accuratezza tematica si osserva per il classificatore ML, che in corrispondenza di tale input fornisce la sua migliore prestazione raggiungendo un valore di KIA pari a 0,66. Gli altri classificatori, ad eccezione di LDA (KIA=0,63), si attestano invece su valori di KIA inferiori a 0,50.

L'utilizzo delle bande normalizzate generalmente non apporta miglioramenti alla classificazione, ad eccezione del classificatore k-NN per il quale si riscontra invece un aumento dell'accuratezza tematica raggiunta (KIA=0,58). L'utilizzo combinato dell'indice NDVI con il dato multitemporale ha solitamente apportato miglioramenti contenuti alle classificazioni, ad eccezione del classificatore ML per il quale si riscontra invece una riduzione dell'accuratezza tematica (KIA=0,60).

I peggiori risultati di classificazione sono stati ottenuti applicando il classificatore k-NN alle bande originate dalla PCA (KIA=0,26). Tuttavia è ricorrendo a tale input che si rilevano le minori accuratezze anche per i restanti classificatori, registrando in ogni caso valori di KIA inferiori a 0,40.

Basando le classificazioni sull'indice multitemporale normalizzato *T*, risultati lievemente migliori si ottengono attraverso i classificatori LDA e ML, raggiungendo in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,65. Tuttavia è in corrispondenza di tale input che si osservano le migliori prestazioni dei classificatori k-NN e MD, registrando in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,63.

Per quanto concerne le singole classi mappate, i migliori risultati di classificazione si riscontrano per le superfici tagliate nel periodo 2004-2006, per le quali si raggiungono mediamente valori di AP e AU rispettivamente superiori a 0,70 e a 0,80 ricorrendo alle funzioni LDA e k-NN. Ad eccezione del III, IV e V input, per i quali a fronte di valori di AP elevati si riscontrano livelli insoddisfacenti di AU, ottimi risultati di classificazione sono stati ottenuti anche attraverso il classificatore ML, raggiungendo per entrambi gli indici di accuratezza valori superiori a 0,80. Attraverso il classificatore MD sono stati ottenuti invece risultati soddisfacenti per la suddetta classe limitatamente al VI input (AP=0,84; AU=0,84).

Per le superfici utilizzate precedentemente al 2004 sono stati ottenuti invece buoni risultati di classificazione soltanto mediante il classificatore LDA, adottando il III o il IV input (in entrambi i casi AP=0,70; AU=0,84), e il classificatore MD, impiegando il VI input (AP=0,73; AU=0,77). In tutti gli altri casi si riscontra una scarsa discriminazione tra la classe in questione e le superfici boscate non utilizzate. Per quest'ultime in particolare a fronte di valori di AP generalmente elevati si riscontrano valori di AU mediamente inferiori a 0,60 per i classificatori k-NN e MD e a 0,70 per i classificatori LDA e ML.

Tabella 33 – Valori di KIA e di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi previste dal sistema di nomenclatura di tipo A, calcolati per le classificazioni *pixel-oriented*.

Input	Classificatore	KIA	Classi mappate					
			Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
			AP	AU	AP	AU	AP	AU
I	ML	0,66	0,79	0,70	0,65	0,85	0,91	0,81
	MD	0,49	0,89	0,53	0,54	0,82	0,54	0,99
	LDA	0,63	0,83	0,65	0,65	0,84	0,81	0,88
	K-NN	0,49	0,85	0,54	0,41	0,86	0,73	0,81
II	ML	0,66	0,80	0,69	0,64	0,86	0,90	0,82
	MD	0,49	0,89	0,53	0,54	0,82	0,54	0,99
	LDA	0,63	0,81	0,65	0,65	0,82	0,81	0,88
	K-NN	0,58	0,84	0,59	0,54	0,81	0,79	0,91
III	ML	0,60	0,64	0,74	0,65	0,87	0,94	0,64
	MD	0,53	0,91	0,55	0,57	0,85	0,57	0,99
	LDA	0,67	0,84	0,68	0,70	0,84	0,82	0,90
	K-NN	0,53	0,86	0,56	0,41	0,90	0,80	0,81
IV	ML	0,60	0,63	0,74	0,66	0,86	0,94	0,67
	MD	0,53	0,91	0,55	0,57	0,85	0,58	0,99
	LDA	0,67	0,84	0,68	0,70	0,84	0,82	0,90
	K-NN	0,58	0,84	0,59	0,54	0,81	0,79	0,91
V	ML	0,39	0,45	0,61	0,48	0,73	0,89	0,51
	MD	0,33	0,76	0,45	0,49	0,69	0,40	0,85
	LDA	0,35	0,47	0,47	0,59	0,63	0,67	0,63
	K-NN	0,26	0,56	0,42	0,38	0,72	0,61	0,53
VI	ML	0,65	0,91	0,64	0,57	0,90	0,84	0,93
	MD	0,63	0,71	0,68	0,73	0,77	0,84	0,84
	LDA	0,65	0,87	0,64	0,62	0,86	0,81	0,92
	K-NN	0,63	0,85	0,64	0,58	0,89	0,84	0,81

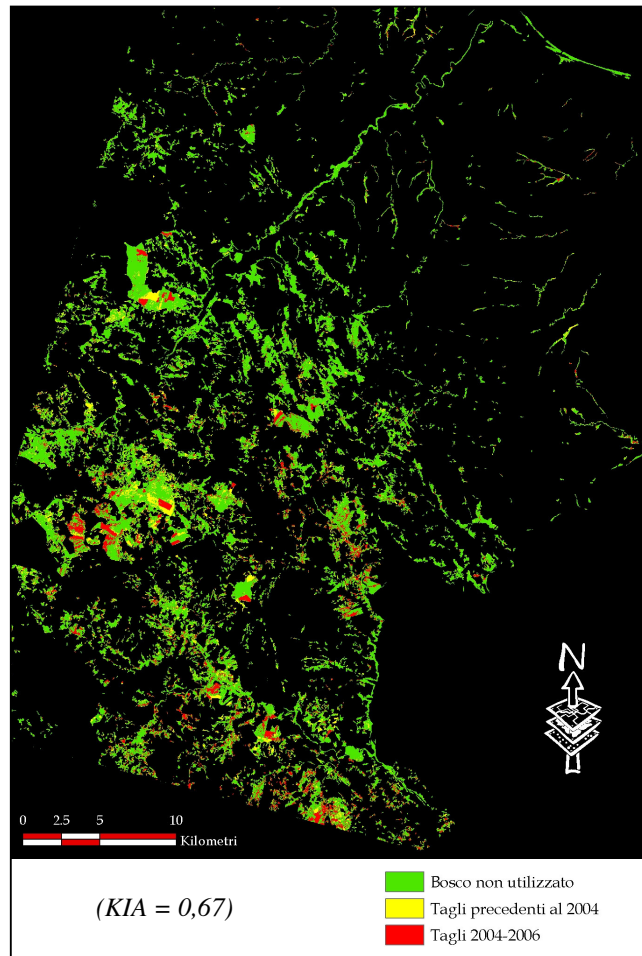


Figura 37 – Esempio di classificazione *pixel-oriented* elaborata per il sistema di nomenclatura di tipo A mediante applicazione della funzione LDA al III set di dati.

Adottando il sistema di nomenclatura articolato in 6 classi, l'utilizzo congiunto del classificatore LDA con il III o il IV set di dati si conferma la combinazione per la quale si riscontra la massima accuratezza di classificazione, raggiungendo in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,58 (Tab. 34 e Fig. 38). Relativamente alle classificazioni elaborate sulla base del set multitemporale SPOT5 le migliori prestazioni sono fornite da ML e LDA, sia utilizzando le bande originali che quelle normalizzate radiometricamente, ottenendo in ogni caso un valore di KIA pari a 0,55. Per lo stesso input si rilevano invece valori di KIA inferiori a 0,50 ricorrendo ai classificatori k-NN e MD.

Prendendo in esame le classificazioni prodotte sulla base delle bande generate attraverso l'analisi delle componenti principali, si confermano, per tutti i classificatori testati, i più bassi livelli di accuratezza tematica raggiunta, con valori di KIA in ogni caso inferiori a 0,40. In assoluto il peggiore risultato è stato ottenuto applicando il classificatore k-NN alle suddette bande (KIA=0,36). Laddove sono stati impiegati congiuntamente i quattro indici T (T_{green} , T_{red} , T_{nir} , T_{swee}) le migliori prestazioni sono state fornite dal classificatore MD, che in corrispondenza di tale input raggiunge la sua massima efficienza (KIA=0,53). Risultati lievemente inferiori sono stati ottenuti attraverso il classificatore LDA (KIA=0,52), mentre i

peggiori risultati si osservano per i classificatori ML e k-NN (in entrambi i casi KIA=0,49). Tuttavia è ancora per tale input che quest'ultimo classificatore raggiunge la maggiore accuratezza tematica.

Considerando le singole classi mappate tutti i classificatori *supervised* evidenziano discreti risultati ai fini dell'individuazione delle superfici sottoposte al taglio negli anni 2003 e 2006.

Per la classe *Tagli 2003* le migliori prestazioni sono offerte dai classificatori MD e LDA in corrispondenza dei quali si osservano valori di AP e AU mediamente superiori a 0,70. Buoni risultati si rilevano altresì applicando il classificatore k-NN al II e IV input (AP=0,70; AU=0,74).

L'individuazione dei tagli condotti nell'anno 2006 appare efficace per tutti i classificatori testati ricorrendo al VI set di dati, raggiungendo in ogni caso valori di AP e AU maggiori di 0,70. Prendendo in esame le classificazioni generate attraverso gli altri input, buoni risultati di classificazione si riscontrano per il classificatore LDA e, limitatamente al II e IV input, per il classificatore k-NN.

Le classi *Bosco non utilizzato* e *Tagli 2005* sono quelle invece per le quali è stata generalmente raggiunta la minore accuratezza tematica. Risultati insoddisfacenti si rilevano anche per la classificazione delle superfici tagliate nel 2002 e 2004 per le quali spesso si registrano forti discrepanze tra i valori di AP e AU raggiunti. Un esempio in tal senso è rappresentato dai classificatori k-NN e ML per i quali a fronte di valori di AP mediamente superiori a 0,7 per la classe dei Tagli 2002 e a 0,8 per la classe dei Tagli 2004, si riscontrano livelli di AU mediamente inferiori a 0,5 per la classe dei Tagli 2002 e a 0,4 per la classe dei Tagli 2004.

Tabella 34 – Valori di KIA, di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi previste dal sistema di nomenclatura di tipo B, calcolati per le classificazioni *pixel-oriented*.

Input	Classificatore	KIA	Classi mappate											
			Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
			AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
I	ML	0,55	0,39	0,70	0,85	0,52	0,67	0,82	0,89	0,39	0,44	0,49	0,68	0,87
	MD	0,49	0,76	0,42	0,38	0,84	0,74	0,72	0,44	0,62	0,27	0,58	0,68	0,88
	LDA	0,55	0,53	0,58	0,70	0,54	0,71	0,81	0,64	0,43	0,43	0,52	0,74	0,81
	k-NN	0,48	0,24	0,61	0,81	0,48	0,64	0,79	0,86	0,38	0,39	0,46	0,75	0,69
II	ML	0,55	0,39	0,70	0,85	0,52	0,68	0,82	0,89	0,39	0,45	0,50	0,69	0,87
	MD	0,49	0,76	0,42	0,38	0,84	0,74	0,72	0,45	0,62	0,27	0,57	0,68	0,89
	LDA	0,55	0,53	0,58	0,70	0,54	0,71	0,81	0,65	0,43	0,41	0,52	0,74	0,81
	k-NN	0,46	0,16	0,59	0,81	0,48	0,70	0,74	0,89	0,28	0,31	0,47	0,70	0,82
III	ML	0,49	0,28	0,71	0,82	0,49	0,63	0,84	0,94	0,30	0,37	0,45	0,68	0,88
	MD	0,52	0,74	0,45	0,45	0,80	0,75	0,72	0,50	0,62	0,33	0,60	0,69	0,88
	LDA	0,58	0,56	0,60	0,73	0,58	0,72	0,82	0,69	0,47	0,43	0,55	0,78	0,83
	k-NN	0,48	0,24	0,61	0,81	0,48	0,64	0,79	0,86	0,38	0,39	0,47	0,75	0,69
IV	ML	0,49	0,28	0,71	0,82	0,49	0,63	0,83	0,94	0,30	0,37	0,45	0,67	0,88
	MD	0,52	0,74	0,45	0,45	0,80	0,75	0,72	0,51	0,62	0,33	0,60	0,69	0,88
	LDA	0,58	0,56	0,60	0,73	0,58	0,72	0,82	0,69	0,46	0,42	0,55	0,78	0,83
	k-NN	0,46	0,16	0,59	0,81	0,48	0,70	0,74	0,88	0,28	0,31	0,47	0,70	0,82
V	ML	0,39	0,22	0,57	0,49	0,42	0,59	0,75	0,85	0,24	0,41	0,33	0,69	0,78
	MD	0,39	0,63	0,36	0,38	0,55	0,69	0,68	0,17	0,41	0,21	0,43	0,63	0,82
	LDA	0,38	0,19	0,42	0,52	0,46	0,64	0,72	0,55	0,24	0,38	0,28	0,73	0,65
	k-NN	0,36	0,07	0,46	0,47	0,43	0,60	0,75	0,84	0,23	0,29	0,32	0,80	0,55
VI	ML	0,49	0,35	0,59	0,78	0,45	0,64	0,85	0,77	0,33	0,28	0,49	0,75	0,81
	MD	0,53	0,70	0,59	0,29	0,60	0,80	0,67	0,38	0,50	0,47	0,50	0,82	0,74
	LDA	0,52	0,62	0,58	0,53	0,50	0,67	0,80	0,58	0,35	0,42	0,53	0,76	0,80
	k-NN	0,49	0,63	0,62	0,63	0,45	0,50	0,91	0,77	0,32	0,14	0,37	0,79	0,77

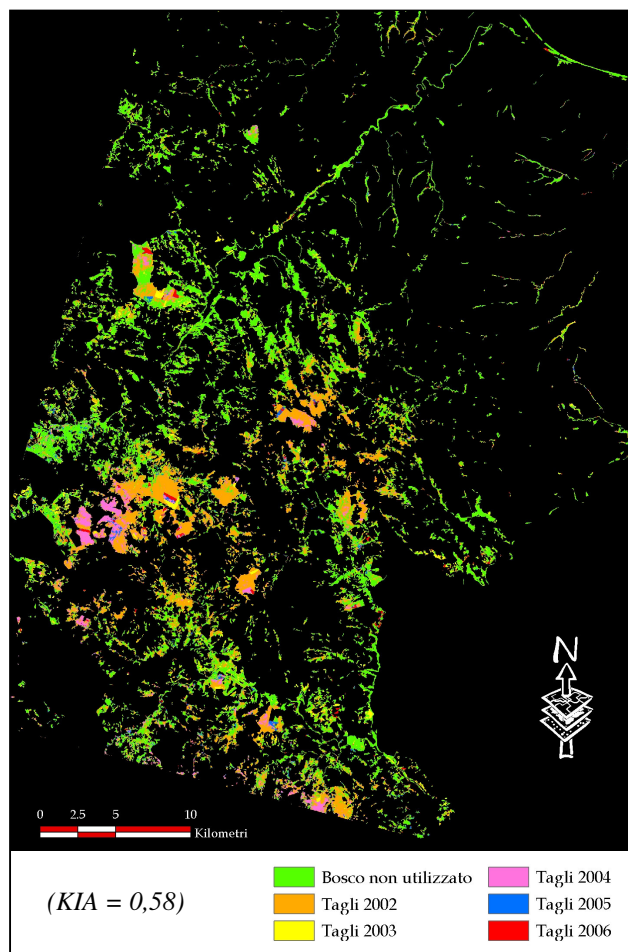


Figura 38 – Esempio di classificazione *pixel-oriented* elaborata per il sistema di nomenclatura di tipo B mediante applicazione della funzione LDA al III set di dati.

6.2.2 Classificazioni *object-oriented*

Adottando il sistema di nomenclatura di tipo A, il miglior risultato è stato conseguito applicando l'algoritmo STD.N.N. al III o al IV set di dati, raggiungendo in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,77 (Tab. 35 e Fig. 39).

Escludendo dall'input l'informazione apportata dall'indice NDVI si riducono lievemente le prestazioni del classificatore, raggiungendo rispettivamente valori di KIA pari a 0,75 e 0,74 a seconda che vengano impiegati o meno dati normalizzati radiometricamente.

I peggiori risultati si riscontrano limitando i dati per la classificazione alle sole tre bande generate attraverso PCA (KIA=0,59).

Sintetizzando mediante l'indice *T* l'informazione contenuta nel set multitemporale SPOT5 si osserva invece una modesta contrazione dell'accuratezza tematica (KIA=0,72).

Ad eccezione della classificazione sviluppata sulla base delle componenti principali, per la quale si rilevano valori di AP e AU pari rispettivamente a 0,69 e 0,74 per la classe *Bosco non utilizzato* e a 0,68 e 0,67 per la

classe dei *Tagli pre-2004*, tutte e tre le classi esaminate sono state classificate con buoni risultati. Particolarmente efficace appare l'individuazione delle superfici tagliate a raso nel periodo 2004-2006, per le quali il classificatore STD.N.N. fornisce, in corrispondenza delle migliori classificazioni, valori di AP e AU superiori a 0,90.

Tabella 35 – Valori di KIA, di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi previste dal sistema di nomenclatura di tipo A, calcolati per le classificazioni *object-oriented*.

Input	KIA	Classi mappate					
		Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU
I	0,74	0,80	0,82	0,80	0,78	0,91	0,90
II	0,75	0,79	0,83	0,82	0,78	0,92	0,90
III	0,77	0,82	0,83	0,81	0,79	0,92	0,92
IV	0,77	0,81	0,83	0,82	0,79	0,93	0,94
V	0,59	0,69	0,74	0,68	0,67	0,83	0,77
VI	0,72	0,73	0,82	0,78	0,83	0,96	0,79

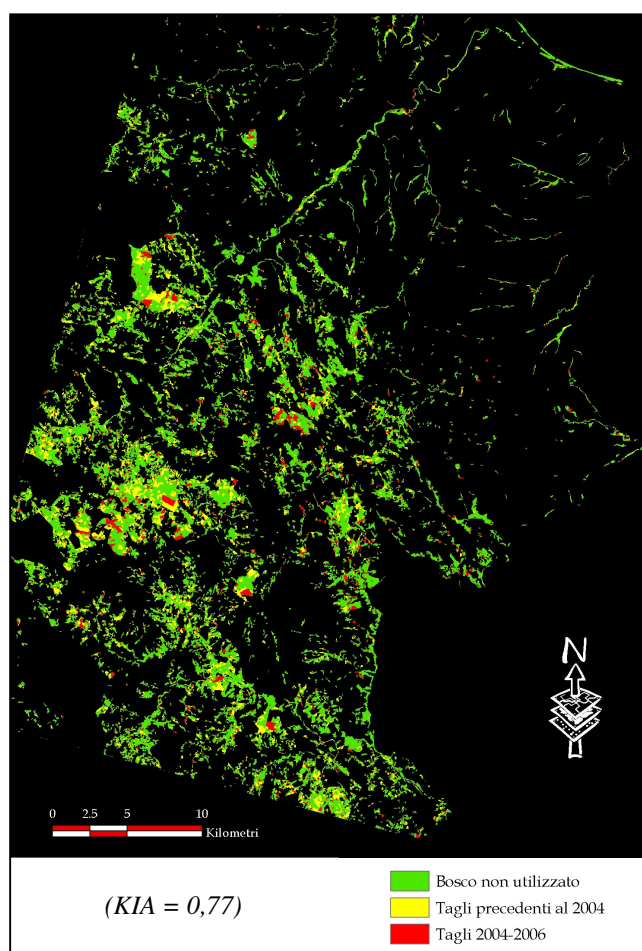


Figura 39 – Esempio di classificazione *object-oriented* elaborata per il sistema di nomenclatura di tipo A mediante applicazione della funzione STD.NN al III set di dati.

Applicando il sistema di nomenclatura di tipo B, i risultati migliori si registrano sia ricorrendo al set multitemporale normalizzato che utilizzando congiuntamente l'indice T calcolato per le quattro bande spettrali SPOT5, raggiungendo in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,61 (Tabella 36 e Fig. 40).

Impiegando i dati SPOT5 originali si riscontrano invece risultati inferiori ($KIA=0,57$). L'aggiunta dell'indice NDVI al set multitemporale elimina le differenze introdotte dal processo di normalizzazione, registrando in entrambi i casi un valore di KIA pari a 0,60.

La minore accuratezza tematica si conferma per la classificazione generata dalle bande prodotte tramite PCA ($KIA=0,46$).

Per quanto concerne le singole classi cartografate i migliori risultati vengono raggiunti per la classificazione delle superfici tagliate a raso negli anni 2003 e 2006, per le quali si osservano valori di AP e AU generalmente superiori a 0,70. Discreti risultati sono stati ottenuti anche per il corretto riconoscimento delle superfici boschive non utilizzate, soprattutto ricorrendo all'utilizzo di dati sottoposti a normalizzazione radiometrica o derivati dal calcolo dell'indice multitemporale T . Maggiori difficoltà di classificazione si rilevano invece per le classi *Tagli 2002* (AP e AU in ogni caso inferiori rispettivamente a 0,70 e a 0,60) e *Tagli 2005* (AP e AU mediamente inferiori a 0,50). La classe dei *Tagli 2004* è quella per la quale si riscontra la minore accuratezza tematica, ottenendo valori di AP e AU rispettivamente inferiori a 0,30 e 0,40.

Tabella 36 - Valori di KIA, di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi previste dal sistema di nomenclatura di tipo B, calcolati per le classificazioni *object-oriented*.

Input	KIA	Classi mappate											
		Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
I	0,57	0,64	0,75	0,60	0,52	0,83	0,75	0,26	0,43	0,51	0,41	0,79	0,74
II	0,61	0,70	0,80	0,69	0,58	0,81	0,77	0,18	0,28	0,53	0,44	0,82	0,77
III	0,60	0,69	0,80	0,68	0,59	0,82	0,77	0,21	0,28	0,45	0,49	0,82	0,76
IV	0,60	0,70	0,78	0,63	0,54	0,82	0,75	0,24	0,30	0,47	0,45	0,83	0,80
V	0,46	0,60	0,71	0,49	0,44	0,70	0,71	0,18	0,21	0,40	0,31	0,69	0,60
VI	0,61	0,73	0,75	0,54	0,55	0,87	0,81	0,29	0,47	0,49	0,46	0,81	0,75

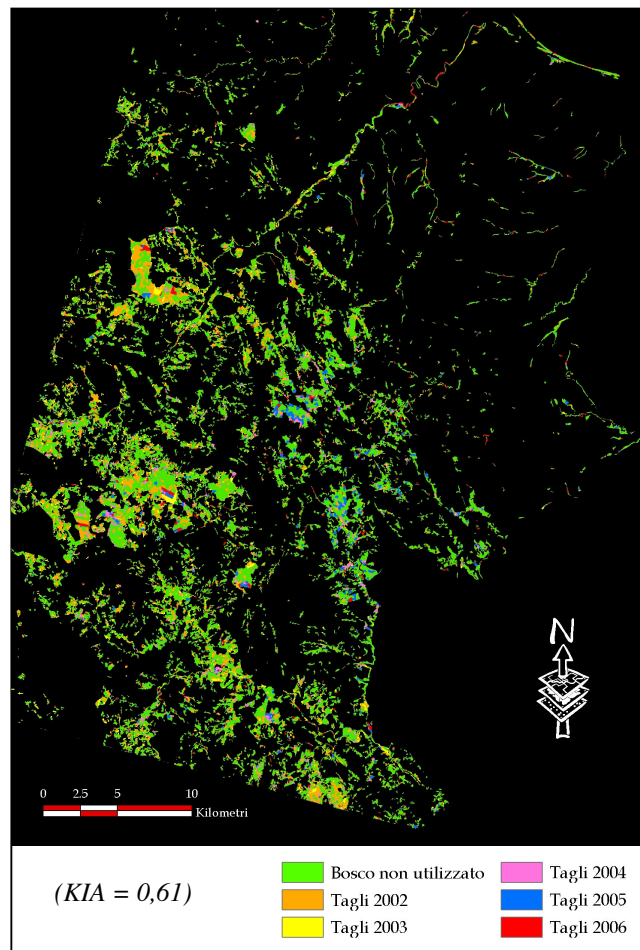


Figura 40 – Esempio di classificazione *object-oriented* elaborata per il sistema di nomenclatura di tipo B mediante applicazione della funzione STD.NN al VI set di dati.

7. DISCUSSIONE

7.1 CONFRONTO TRA SUPERFICI TAGLIATE A RASO MAPPATE MEDIANTE IMMAGINI SPOT5 E STATISTICHE AMMINISTRATIVE UFFICIALI

La superficie tagliata a raso registrata a livello amministrativo appare, per gli anni esaminati e all'interno delle 1127 UA indagate, significativamente inferiore rispetto a quella rilevata mediante interpretazione a video del dato SPOT5, osservando in media per singola UA una sottostima della superficie effettivamente utilizzata pari a circa 3 ettari.

Quanto riscontrato è riconducibile ad una serie di problematiche che affliggono l'attuale filiera di produzione della statistica ufficiale sulle utilizzazioni forestali.

Di fatto, laddove gli interventi di taglio godono di un regime autorizzatorio semplificato, come avviene prevalentemente nel caso dei cedui, la rilevazione amministrativa delle superfici tagliate e delle masse legnose prelevate può soffrire di consistenti sottostime: la semplice dichiarazione, meno onerosa sia in termini economici che di tempo rispetto alla richiesta di autorizzazione, può infatti incentivare i proprietari boschivi a dichiarare superfici o prelievi fittiziamente inferiori a quelli che fanno sorgere l'obbligo dell'autorizzazione (Macrì 2006). Ciò può anche determinare la frammentazione degli interventi e la presentazione, a ogni stagione silvana, di un numero elevato di domande di taglio, che tra l'altro possono rendere difficoltoso un controllo efficiente da parte degli enti preposti. La registrazione amministrativa dei dati sui tagli boschivi avviene in genere prioritariamente per le pratiche relative agli interventi di maggiore estensione, soggetti ad autorizzazione, mentre l'archiviazione degli interventi comunicati avviene talora senza la necessaria tempestività. In ogni caso, non è neanche da sottovalutare il rischio di dispersione di dati nel flusso di informazioni che da Comuni, Comunità Montane e Province (enti ai quali, a seconda dei casi, vanno inviate le dichiarazioni e le richieste di autorizzazione al taglio) devono giungere ai Comandi Stazione CFS ai fini della compilazione dei modelli ISTAT_FOR, oltre che per altri eventuali adempimenti di competenza.

Un possibile motivo di discrepanza tra l'ampiezza delle tagliate effettivamente misurate da satellite e quella registrata amministrativamente è anche il fatto che talora, sia per i tagli soggetti a dichiarazione che per quelli soggetti ad autorizzazione, le superfici riportate fanno riferimento a dati catastali non verificati o, meno di frequente, a misure dirette, non ortorettificate. Infine, un ulteriore aspetto da considerare, sia per i tagli soggetti a dichiarazione che per quelli soggetti ad autorizzazione, è che i dati riportati nei modelli ISTAT_FOR sono dedotti da quelli amministrativi ma non sempre poi i tagli vengono effettivamente eseguiti nella stagione silvana o secondo l'entità indicata, e talora non vengono eseguiti affatto, come dimostrato dai casi di sovrastima di tagliate riscontrate amministrativamente in alcune UA campione rispetto ai valori osservati da satellite per il corrispondente anno.

All'interno dell'area monitorata si rilevano differenze significative nello scostamento medio oggetto di analisi tra la Regione Puglia e Campania. Tali differenze possono essere ricondotte a sostanziali discrepanze esistenti a livello normativo tra le due Regioni considerate. Con riferimento alla Regione Puglia, il R.R. vigente in materia forestale dispone per l'esecuzione di qualsiasi intervento di taglio il previo ottenimento dell'autorizzazione da parte dell'ente competente per territorio, mentre la Campania rappresenta l'unica realtà tra le esaminate per la quale si riscontra, limitatamente ad interventi intercalari, l'esistenza di tagli liberamente esercitabili (vedi § 3.3.1). Differenze significative si riscontrano altresì tra le suddette Regioni anche in relazione alla soglia di superficie (o di massa prelevata) oltre la quale, ai fini dell'ottenimento dell'autorizzazione, è necessaria la redazione di un progetto di taglio, che generalmente rappresenta l'unica sede in cui viene accertata in modo dettagliato la superficie effettiva oggetto di intervento. Infatti mentre da un lato il R.R. presente in Puglia determina probabilmente una eccessiva burocratizzazione in rapporto all'esiguità dei limiti di ripresa possibili, rendendo necessaria la redazione del progetto di taglio anche per utilizzazioni minori ad 1 ha e 100 q di ripresa, dall'altro la normativa vigente in Campania non considera la presentazione del suddetto elaborato tecnico elemento vincolante ai fini del conseguimento dell'autorizzazione per interventi di estensione inferiore a 10 ettari.

7.1.1 Proposta di procedura di calibrazione statistica del rilievo amministrativo delle utilizzazioni dei cedui attraverso l'impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione

La sperimentazione condotta rappresenta il primo esempio oggettivo per il nostro Paese di valutazione quantitativa su ampie superfici della sottostima delle statistiche SISTAN per quanto riguarda le utilizzazioni forestali dei cedui. Da vari Autori è da tempo sottolineato come, data la natura di queste statistiche (che teoricamente rappresentano quello che in gergo statistico è detto censimento o enumerazione completa), vi sia il rischio di errori sistematici di sottostima nel caso in cui siano prevalentemente basate sulle dichiarazioni dei proprietari, come appunto avviene per i cedui.

L'adozione di procedure semplificate per l'autorizzazione al taglio dei cedui è giustamente motivata dal risparmio di risorse finanziarie, sia da parte dei proprietari che degli enti pubblici competenti, da destinare alla gestione amministrativa. Alla luce delle evidenze occorre però trovare modalità di aggiustamento delle fonti statistiche amministrative in modo da garantirne, a costi compatibili, la congruità rispetto alle finalità della rilevazione. Un esempio di miglioramento delle procedure di rilevamento dei prelievi legnosi a fini statistici è riportato da Guidi & Cattoi (2004) e un esempio di miglioramento delle procedure di registrazione amministrativa è proposto da Macrì (2006).

Dai risultati dell'indagine qui presentata emerge un'altra soluzione di potenziale interesse ed efficacia operativa. Assumendo ragionevolmente che, per territori sufficientemente ampi, la superficie complessiva delle tagliate a raso nei cedui a maturità tecnica sia direttamente proporzionale alla entità della massa legnosa asportata è possibile configurare una procedura di correzione del dato amministrativo basata sul

campionamento monofase per rapporto (Corona, 2000). In particolare, si può proporre di estrarre dall'insieme di UA di un dato ambito territoriale (a esempio, una Regione) un campione di n UA sul quale determinare il coefficiente di correzione ottenuto come rapporto tra la superficie delle tagliate a raso osservate da satellite (y) e quella riscontrata amministrativamente nelle singole UA (x):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$$

Assumendo che la relazione tra le tagliate osservate da satellite e quelle riscontrate amministrativamente sia del tipo $y = Rx + e$ (vd. Fig. 34) con valore medio atteso del termine di errore (e) pari a 0, la varianza della stima di R può essere stimata pari a:

$$s_R^2 = \frac{s_y^2 - 2Rs_{yx}^2 + R^2 s_x^2}{n\bar{x}^2}$$

dove: s_y^2 = varianza stimata di y ; s_{yx}^2 = covarianza stimata tra le variabili y e x ; s_x^2 = varianza stimata di x .

Dunque assumendo che le stime siano distribuite normalmente, l'intervallo di confidenza del coefficiente di correzione del dato censuario dei prelievi legnosi può essere stimato pari a:

$$R \pm ts_R$$

dove: t = valore critico del t di *Student* alla probabilità α per $n-1$ gradi di libertà; s_R = errore standard di R .

Moltiplicando i valori dei due limiti fiduciari (superiore e inferiore) per l'entità dei prelievi legnosi riscontrata amministrativamente in un dato anno (statistiche SISTAN), si può così ottenere una stima dell'intervallo fiduciario dei prelievi effettivamente condotti nell'area esaminata in quell'anno.

Nel caso dell'indagine qui presentata il coefficiente di correzione R è stimato pari a 1,41, con intervallo fiduciario, ponendo il valore critico del t di Student pari a 1,96 ($n=1127$; $\alpha=0,05$), equivalente a 1,32-1,50.

Per il dimensionamento del campione, al fine di mantenere l'intervallo fiduciario del coefficiente di correzione entro una data soglia massima a un determinato livello di probabilità, si rimanda alle formule riportate da Corona (2000).

7.2 CLASSIFICAZIONE SEMI-AUTOMATICA DELLE TAGLIATE A RASO

7.2.1 Comparazione di algoritmi di classificazione pixel-oriented

Nelle condizioni esaminate i classificatori semi-automatici ML e LDA hanno evidenziato, relativamente al sistema di nomenclatura di tipo A (vedi § 5.4.4), una maggiore efficienza nel riconoscimento delle superfici sottoposte al taglio raso. In particolare la funzione ML appare sfruttare meglio l'informazione contenuta nel dato multitemporale SPOT5 e quella sintetizzata nelle componenti principali estratte tramite PCA, mentre il classificatore LDA valorizza l'aggiunta dell'indice NDVI al I e II set di dati. L'introduzione di tale indice nell'input si ripercuote invece in modo negativo sulla classificazione generata tramite ML.

Prestazioni equivalenti sono fornite dai due classificatori in questione ricorrendo al set di indici T elaborato per le singole bande spettrali SPOT5.

I classificatori MD e k-NN sono invece risultati i meno efficaci, fornendo in ogni caso valori di KIA inferiori rispetto a quelli conseguiti con ML e LDA. Il classificatore k-NN raggiunge, relativamente all'algoritmo MD, prestazioni superiori ricorrendo ad input contenenti dati radiometricamente normalizzati, mentre si verifica l'opposto basando la classificazione sulle bande originate dalla PCA. Negli altri casi i due classificatori sono equivalenti.

Dall'esame dei valori di AP e AU conseguiti per le singole classi, le maggiori difficoltà di classificazione emergono per la funzione MD, attraverso la quale, ad eccezione della classificazione prodotta sulla base degli indici multitemporali T , si registra una sovrastima delle superfici boscate non utilizzate a scapito della corretta individuazione delle aree tagliate a raso. Per i restanti classificatori testati si evidenziano invece limiti unicamente nel discriminare le aree boschive non utilizzate e le tagliate condotte precedentemente al 2004, risultando l'identificazione delle superfici tagliate nel periodo 2004-2006 soddisfacente.

Tuttavia mediante il classificatore LDA sono stati altresì raggiunti per la classe dei "*Tagli precedenti al 2004*" buoni livelli di AP e AU in corrispondenza del III e IV input.

Prendendo in esame le classificazioni volte a distinguere le tagliate sulla base del loro anno di esecuzione, il classificatore LDA conferma, relativamente agli altri algoritmi *pixel-oriented*, una maggiore efficacia. Significativa è invece la riduzione delle *performance* di classificazione da parte della funzione ML, la quale, ad eccezione delle classificazioni prodotte sulla base del I e II input, evidenzia prestazioni equivalenti o inferiori al classificatore MD. Quest'ultimo rappresenta invece la funzione per la quale si riscontrano le minori ripercussioni in termini di KIA legate alla complessità del sistema di nomenclatura adottato per la classificazione. Indipendentemente dal set di dati prescelto i risultati più scadenti sono ottenuti attraverso l'algoritmo k-NN.

Tutti i classificatori mostrano i migliori risultati di classificazione per le classi "*Tagli 2003*" e "*Tagli 2006*", raggiungendo tuttavia prestazioni soddisfacenti esclusivamente in determinati casi.

In particolare per quanto concerne i tagli realizzati nell'anno 2003, si rilevano discrete prestazioni solamente ricorrendo alla funzione LDA e MD, e al classificatore k-NN impiegando dati normalizzati

radiometricamente. In tutti i restanti casi si osservano invece, a fronte di elevati valori di AU, valori di AP minori a 0,70. Relativamente alla classificazione dei tagli condotti nell'anno 2006 si confermano le prestazioni dei classificatori LDA e k-NN limitatamente agli input citati, mentre attraverso le funzioni MD e ML vengono ottenuti risultati soddisfacenti unicamente adottando come input il set di indici multitemporali *T* elaborato per le bande SPOT5.

La classe dei “*Tagli 2005*” è quella invece per cui tutti i classificatori *supervised* testati hanno evidenziato le maggiori difficoltà di riconoscimento. Risultati mediocri sono stati ottenuti anche per le restanti superfici utilizzate in anni differenti da quelli di acquisizione del dato satellitare.

Le mappe generate tramite le funzioni ML e k-NN mostrano una forte sottostima delle superfici boscate non utilizzate a cui si associa un sovradimensionamento delle classi “*Tagli 2002*” e “*Tagli 2004*”. Anche ricorrendo al classificatore LDA si registra un modesto riconoscimento della classe “*Bosco non utilizzato*” e la tendenza a sovrastimare le tagliate realizzate negli anni 2002 e 2004.

Per la funzione MD si evidenziano, contrariamente a quanto osservato per i restanti classificatori, buoni livelli di AP conseguiti per la classe “*Bosco non utilizzato*” a cui si unisce però una sovrastima della classe stessa per effetto dell'errata attribuzione di superfici afferenti soprattutto a tagliate condotte negli anni 2002, 2004 e 2005.

7.2.2 *Object-oriented vs pixel-oriented*

Confermando precedenti esperienze volte alla comparazione delle *performance* di tecniche di classificazione semi-automatica di dati telerilevati (Chirici *et al.* 2003, Desclée *et al.*, 2006), l'approccio *object-oriented* ha permesso, in tutte le configurazioni esaminate, di ottenere un'accuratezza tematica superiore rispetto alle tecniche tradizionali *pixel-oriented* (Fig. 41 e 42 e Tab. 37 e 38). Le classificazioni *object-oriented* hanno determinato in media, rispetto alla corrispondente migliore prestazione offerta dai classificatori per *pixel*, un incremento del valore di KIA pari al 19% e 9% adottando rispettivamente il sistema di nomenclatura di tipo A e B.

Tale incremento risulta decisamente più pronunciato laddove viene impiegato un sistema di nomenclatura semplificato (Tipo A), ad eccezione delle classificazioni sviluppate sulla base dell'indice multitemporale *T* per le quali l'incremento appare superiore relativamente alle classificazioni articolate in sei classi.

Considerando le classificazioni elaborate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A, è risultato conveniente applicare congiuntamente al classificatore STD.N.N. il set multitemporale SPOT5, originale o normalizzato, e l'indice NDVI calcolato per gli anni di acquisizione del dato satellitare (III e IV input). Tuttavia escludendo il suddetto indice dal set di dati utilizzato per la classificazione si ottengono risultati lievemente inferiori. L'incremento massimo apportato dalla procedura *object-oriented* in termini di KIA si riscontra in corrispondenza delle classificazioni elaborate sulla base delle bande generate attraverso l'applicazione della PCA al set multitemporale SPOT5. Il maggior incremento si osserva relativamente alla

classificazione k-NN (+123%), seguito nell'ordine dalla classificazione MD (+79%), LDA (+67%) e ML (+50%).

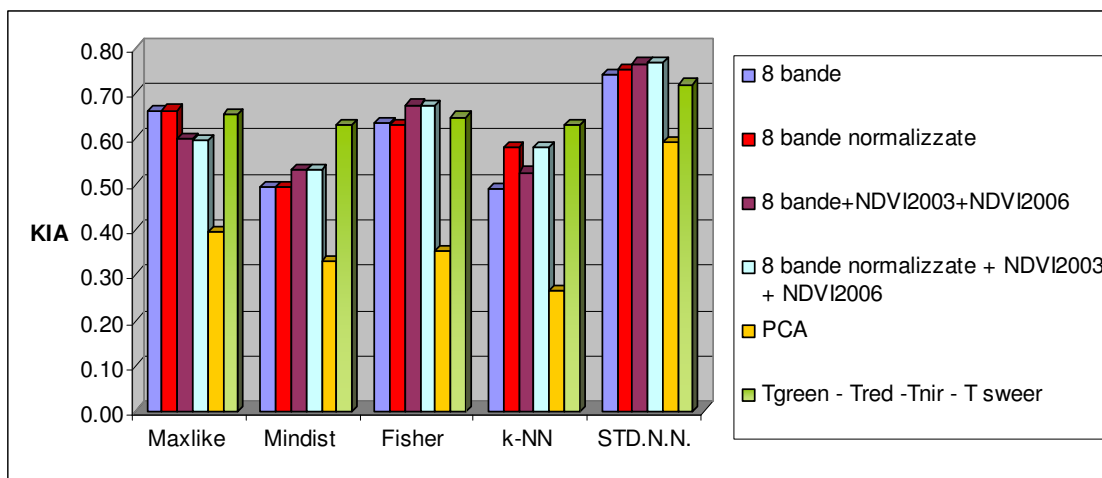


Figura 41 - Valori di KIA ottenuti per le classificazioni realizzate con sistema di nomenclatura di Tipo A.

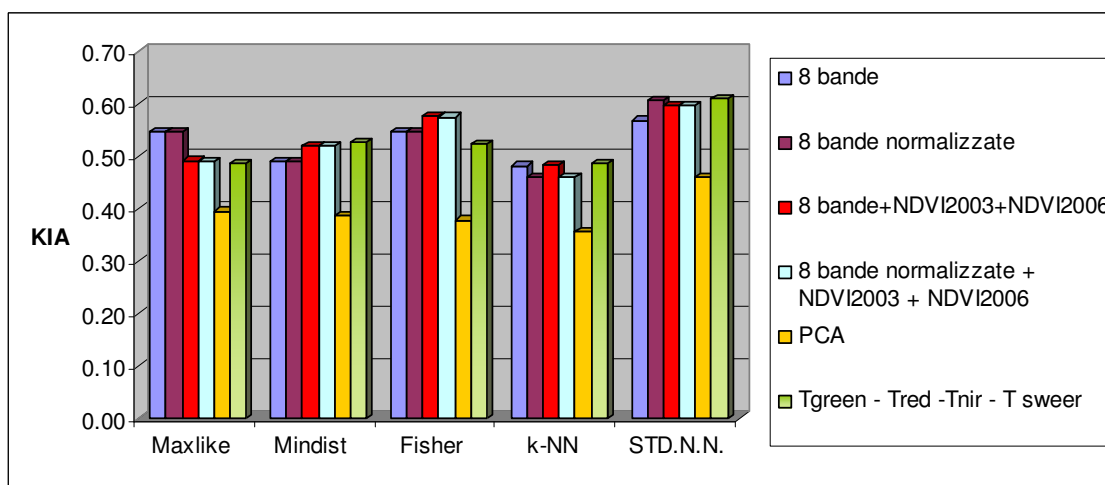


Figura 42 - Valori di KIA ottenuti per le classificazioni realizzate con sistema di nomenclatura di Tipo B.

Per tutti i classificatori testati i valori di accuratezza tematica raggiunti per le singole classi mappate denotano un maggior successo nell'identificare correttamente le utilizzazioni condotte nel periodo 2004-2006. Tuttavia i risultati migliori sono stati anche in questo caso raggiunti attraverso la procedura *object-oriented* che ha generalmente determinato: un incremento rilevante dei valori di AP per le classificazioni sviluppate con MD a cui si associano contenute diminuzioni dei valori di AU; un incremento dei valori di AU relativamente alle classificazioni prodotte tramite ML a cui corrispondono spesso variazioni poco significative dei valori di AP; un incremento dei valori di AP e AU relativamente alle classificazioni sviluppate tramite LDA e k-NN.

Per quanto concerne le restanti classi si osservano difficoltà da parte delle funzioni *pixel-oriented* nel discernere tra superfici utilizzate precedentemente al 2004 e aree boschive non utilizzate. In particolare per i suddetti classificatori si riscontra una costante sottostima dei tagli precedenti al 2004 e una sovrastima dei boschi non utilizzati, mentre l'approccio *object-oriented*, ha permesso una più corretta attribuzione della classe ai poligoni generati dalla segmentazione.

Indipendentemente dal set di dati utilizzato per la classificazione, il ricorso alla tecnica *object-oriented* produce: un incremento significativo dei valori di AP, a cui si contrappongono lievi diminuzioni dei valori di AU, per l'identificazione dei tagli condotti precedentemente al 2004; un incremento dei livelli di AU per la classe “*Bosco non utilizzato*” a cui si associano limitatamente al classificatore ML un aumento dei livelli di AP.

Tabella 37 – Variazione percentuale dei valori di KIA e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi mappate, offerto dall'approccio *object-oriented* rispetto alle classificazioni *pixel-oriented*, sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A.

Input	Classificatore	Variazione percentuale						
		KIA	Classi mappate					
			Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
			AP	AU	AP	AU	AP	AU
I	ML	+12%	+1%	+18%	+23%	-9%	0%	+11%
	MD	+51%	-10%	+54%	+47%	-5%	+67%	-9%
	LDA	+17%	-3%	+27%	+23%	-6%	+13%	+2%
	K-NN	+52%	-5%	+52%	+94%	-9%	+24%	+11%
II	ML	+13%	-1%	+20%	+27%	-9%	+2%	+10%
	MD	+53%	-11%	+56%	+52%	-5%	+69%	-9%
	LDA	+19%	-3%	+28%	+26%	-5%	+14%	+3%
	K-NN	+29%	-6%	+40%	+51%	-4%	+16%	-1%
III	ML	+28%	+28%	+12%	+24%	-9%	-2%	+44%
	MD	+44%	-10%	+51%	+43%	-7%	+60%	-7%
	LDA	+14%	-2%	+22%	+16%	-6%	+12%	+2%
	K-NN	+46%	-5%	+47%	+97%	-12%	+15%	+13%
IV	ML	+29%	+29%	+12%	+24%	-8%	-1%	+48%
	MD	+45%	-11%	+51%	+45%	-7%	+61%	-5%
	LDA	+14%	-3%	+22%	+18%	-6%	+13%	+4%
	K-NN	+32%	-4%	+40%	+51%	-2%	+17%	+3%
V	ML	+50%	+53%	+21%	+41%	-8%	-7%	+50%
	MD	+79%	-10%	+64%	+39%	-3%	+105%	-9%
	LDA	+67%	+47%	+58%	+14%	+6%	+24%	+23%
	K-NN	+123%	+23%	+77%	+77%	-7%	+37%	+45%
VI	ML	+10%	-20%	+29%	+36%	-8%	+15%	-15%
	MD	+14%	+3%	+21%	+7%	+8%	+15%	-6%
	LDA	+11%	-16%	+28%	+25%	-3%	+18%	-14%
	K-NN	+14%	-14%	+28%	+33%	-7%	+14%	-6%

Adottando un sistema di nomenclatura più complesso (tipo B) si osserva una differenziazione dell'input in corrispondenza del quale i due approcci di classificazione posti a confronto forniscono le migliori prestazioni. Tra i classificatori *pixel-oriented* il miglior risultato si conferma per il classificatore di *Fisher* integrando il set multitemporale SPOT5, originale o normalizzato radiometricamente, con l'indice NDVI elaborato per le due scene, mentre per la classificazione *object-oriented* l'input ottimale è costituito sia dal dato normalizzato radiometricamente che dall'indice *T* elaborato per le singole bande spettrali. Livelli di accuratezza tematica lievemente inferiori sono stati ottenuti tuttavia applicando il classificatore STD.N.N. al III e al IV input.

In termini di KIA l'incremento massimo apportato dalle tecniche *object-oriented* si riscontra relativamente ai classificatori k-NN e MD adottando il set multitemporale normalizzato (rispettivamente +32% e +24%), al classificatore ML utilizzando gli indici *T* calcolati per le singole bande spettrali (+25%) e al classificatore LDA impiegando i dati ottenuti attraverso la PCA (+22%).

Le tecniche poste a confronto denotano buone capacità nell'individuare le superfici sottoposte al taglio negli anni 2003 e 2006. Tuttavia il ricorso alla procedura *object-oriented* provoca un incremento percentuale dei valori di AP a cui si associano però frequenti diminuzioni dei valori di AU. Unica eccezione in tal senso è rappresentata dalla funzione MD nei confronti della quale la tecnica *object-oriented* consente per la classe *Tagli 2003* il contemporaneo aumento di entrambi gli indici di accuratezza.

Per entrambi gli approcci di classificazione i maggiori problemi si riscontrano invece per la corretta identificazione delle superfici sottoposte al taglio in anni differenti da quello di acquisizione del dato satellitare. Ciò può essere ricondotto alla ripresa vegetativa che scaturisce in seguito all'intervento di taglio e che grava su tali superfici da uno o più anni al momento della ripresa satellitare, determinando una scarsa separabilità spettrale di tali classi rispetto al bosco non utilizzato.

In particolare per i classificatori *pixel-oriented* i valori inferiori di AP e AU si riscontrano in corrispondenza della classe relativa ai tagli condotti nell'anno 2005, mentre le classificazioni *object-oriented* trovano maggiori difficoltà per il corretto riconoscimento degli interventi realizzati nel 2004, conseguendo, soprattutto in termini di AP, risultati inferiori rispetto ai prodotti cartografici *pixel-oriented*.

Altresì insoddisfacente appare per entrambi gli approcci di classificazione il riconoscimento della classe *Tagli 2002*, per la quale le variazioni più significative introdotte dal processo *object-oriented* si riscontrano relativamente alle classificazioni generate tramite l'algoritmo MD, con incrementi dei valori di AP in alcuni casi superiori all'80% a cui si associano però diminuzioni dei valori di AU anche superiori al 30%.

Il ricorso alla tecnica *object-oriented* comporta infine, nei confronti di tutti gli algoritmi testati applicati ai singoli *pixel*, un significativo incremento dei livelli di accuratezza tematica raggiunti per quanto concerne l'individuazione delle superfici boschive non utilizzate durante il periodo esaminato. In particolare mentre rispetto al classificatore LDA gli incrementi appaiono equamente distribuiti tra i due indici di accuratezza tematica, nei confronti dei classificatori ML e k-NN si osservano invece soprattutto notevoli incrementi dei valori di AP, spesso superiori al 100%. Al contrario, relativamente alle classificazioni prodotte tramite MD,

la classificazione *object-oriented* determina un sostanziale incremento dei valori di AU a cui si contrappongono lievi riduzioni dei valori di AP.

Tabella 38 – Variazione percentuale dei valori di KIA e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) per le classi mappate, offerto dall'approccio *object-oriented* rispetto alle classificazioni *pixel-oriented*, sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo B.

Input	Classificatore	Variazione percentuale												
		KIA	Classi mappate											
			Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
			AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
I	ML	+4%	+63%	+7%	-29%	0%	+23%	-9%	-71%	+9%	+15%	-17%	+15%	-15%
	MD	+16%	-16%	+78%	+56%	-38%	+12%	+5%	-40%	-31%	+88%	-29%	+17%	-16%
	LDA	+4%	+20%	+29%	-14%	-4%	+17%	-8%	-59%	0%	+20%	-21%	+6%	-9%
	k-NN	+18%	+170%	+23%	-26%	+8%	+30%	-6%	-70%	+14%	+30%	-12%	+6%	+7%
II	ML	+11%	+79%	+14%	-19%	+11%	+20%	-6%	-80%	-29%	+18%	-11%	+20%	-11%
	MD	+24%	-8%	+89%	+81%	-31%	+10%	+8%	-60%	-55%	+95%	-23%	+21%	-13%
	LDA	+11%	+32%	+37%	-2%	+7%	+14%	-5%	-72%	-34%	+28%	-15%	+11%	-5%
	k-NN	+32%	+347%	+35%	-15%	+21%	+16%	+3%	-80%	-2%	+72%	-7%	+18%	-7%
III	ML	+21%	+143%	+13%	-17%	+20%	+30%	-8%	-78%	-6%	+23%	+10%	+21%	-14%
	MD	+15%	-7%	+79%	+51%	-27%	+9%	+7%	-58%	-55%	+38%	-19%	+19%	-14%
	LDA	+3%	+23%	+33%	-7%	+2%	+13%	-6%	-69%	-40%	+5%	-11%	+5%	-8%
	k-NN	+23%	+190%	+31%	-16%	+23%	+29%	-3%	-75%	-26%	+15%	+5%	+10%	+10%
IV	ML	+22%	+150%	+9%	-23%	+10%	+29%	-10%	-75%	+1%	+26%	0%	+24%	-9%
	MD	+15%	-5%	+74%	+40%	-33%	+9%	+4%	-53%	-52%	+44%	-25%	+20%	-9%
	LDA	+4%	+25%	+31%	-14%	-7%	+14%	-8%	-65%	-35%	+12%	-19%	+7%	-3%
	k-NN	+30%	+345%	+31%	-22%	+13%	+17%	+1%	-73%	+5%	+53%	-5%	+19%	-3%
V	ML	+17%	+175%	+26%	0%	+4%	+19%	-6%	-79%	-12%	-2%	-7%	0%	-23%
	MD	+19%	-4%	+96%	+28%	-20%	+2%	+5%	+3%	-49%	+93%	-28%	+10%	-27%
	LDA	+22%	+220%	+70%	-6%	-4%	+10%	-2%	-67%	-14%	+6%	+10%	-6%	-8%
	k-NN	+29%	+750%	+55%	+5%	+3%	+17%	-6%	-79%	-7%	+37%	-4%	-13%	+10%
VI	ML	+25%	+107%	+27%	-31%	+22%	+37%	-5%	-62%	+44%	+76%	-5%	+9%	-8%
	MD	+16%	+4%	+28%	+85%	-8%	+9%	+22%	-24%	-5%	+4%	-8%	-1%	+2%
	LDA	+17%	+18%	+29%	+1%	+9%	+30%	+1%	-50%	+33%	+16%	-14%	+7%	-7%
	k-NN	+25%	+16%	+21%	-15%	+23%	+73%	-11%	-62%	+45%	+240%	+24%	+3%	-3%

7.2.3 Importanza della normalizzazione radiometrica

In generale il processo di normalizzazione radiometrica non apporta significativi miglioramenti in termini di accuratezza tematica raggiunta indipendentemente dall'approccio di classificazione adottato (Tab. 39 e 40).

Tra le classificazioni elaborate secondo il sistema di nomenclatura di tipo A, il processo di normalizzazione genera miglioramenti significativi unicamente per la classificazione k-NN (KIA: +19%), aumentando la precisione nel riconoscimento delle aree tagliate nel periodo 2004-2006 e soprattutto riducendo la sovrapposizione spettrale tra tagliate condotte precedentemente al 2004 e aree boschive non utilizzate. Per le restanti classificazioni sostituire il set di dati originale con quello sottoposto a normalizzazione radiometrica appare irrilevante, registrando in ogni caso variazioni contenute nell'ordine massimo di un 2%.

Tabella 39 – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A, dovuti alla normalizzazione radiometrica del set multitemporale SPOT5.

Classificatore	Variazione percentuale: input II vs I						
	KIA	Classi mappate					
		Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	0%	+1%	0%	-1%	0%	-1%	+1%
MD	0%	0%	0%	-1%	0%	0%	0%
LDA	-1%	-2%	0%	+1%	-1%	0%	-1%
K-NN	+19%	-1%	+10%	+32%	-6%	+8%	+12%
STD.N.N.	+1%	-1%	+1%	+2%	0%	+1%	0%

Aumentando la complessità delle classificazioni la normalizzazione radiometrica genera effetti limitatamente ai prodotti realizzati mediante k-NN e STD.N.N., determinando rispettivamente un peggioramento (KIA: -5%) e un miglioramento dei risultati (KIA: +7%).

La variazione riscontrata per la funzione k-NN è principalmente connessa a una riduzione dell'AP per le classi "Bosco non utilizzato" e "Tagli 2005", e dell'AU per la classe "Tagli 2004".

Attraverso la classificazione *object-oriented* del set multitemporale normalizzato si osservano invece miglioramenti nei livelli di accuratezza tematica raggiunti per tutte le classi ad eccezione dei tagli condotti nell'anno 2004 per i quali il processo in questione ne ha ridotto il corretto riconoscimento.

Tabella 40 – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo B, dovuta alla normalizzazione radiometrica del set multitemporale SPOT5.

Classificatore	Variazione percentuale: input II vs I												
	KIA	Classi mappate											
		Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	+1%	+1%	0%	0%
MD	0%	0%	0%	-1%	0%	0%	0%	+2%	0%	0%	-1%	0%	0%
LDA	0%	0%	0%	+1%	0%	0%	0%	+2%	-1%	-3%	0%	0%	0%
k-NN	-5%	-34%	-3%	0%	0%	+10%	-6%	+3%	-25%	-21%	+2%	-7%	+19%
STD.N.N.	+7%	+9%	+7%	+15%	+12%	-2%	+3%	-31%	-35%	+4%	+7%	+4%	+4%

7.2.4 Effetti generati dall'integrazione del dato multitemporale SPOT5 con l'indice NDVI

L'inclusione dell'indice NDVI come banda aggiuntiva sintetica apporta migliorie alle classificazioni prodotte tramite gli algoritmi MD e LDA, indipendentemente dalla complessità del sistema di nomenclatura adottato e dall'utilizzo combinato con bande originali o normalizzate radiometricamente (Tab. 41a, 41b, 42a e 42b).

L'introduzione del suddetto indice ha invece in ogni caso ripercussioni negative sul classificatore ML (KIA mediamente ridotto del 10%) determinando una maggiore confusione spettrale tra le classi “*Bosco non utilizzato*” e “*Tagli 2004-2006*”, con conseguente sovrastima di quest'ultimi rispetto a quanto osservato in corrispondenza del I e II input.

Per quanto concerne il classificatore k-NN si osserva un incremento dei valori di KIA unicamente per la classificazione sviluppata combinando l'indice NDVI con il set multitemporale originale, adottando il sistema di nomenclatura di tipo A. In tutti gli altri casi l'indice non apporta alcun contributo alla classificazione.

Al contrario per la procedura *object-oriented* si rileva una riduzione dell'accuratezza tematica unicamente per la classificazione sviluppata con sistema di nomenclatura di tipo B combinando l'indice NDVI con il dato normalizzato radiometricamente (KIA: -2%). In tutti gli altri casi l'inserimento dell'indice NDVI nel set di dati in input genera modesti incrementi dell'accuratezza tematica.

Tabella 41a – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A, legata all'introduzione dell'indice NDVI.

Classificatore	Variazione percentuale: input III vs I						
	KIA	Classi mappate					
		Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-9%	-19%	+6%	0%	+2%	+4%	-21%
MD	+8%	+2%	+4%	+4%	+4%	+6%	0%
LDA	+6%	+1%	+5%	+8%	+1%	+2%	+2%
K-NN	+8%	+2%	+5%	0%	+5%	+9%	0%
STD.N.N.	+3%	+2%	+1%	+1%	+1%	+1%	+2%

Tabella 41b – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A, legata alla combinazione dell'indice NDVI al set multitemporale normalizzato.

Classificatore	Variazione percentuale: input IV vs II						
	KIA	Classi mappate					
		Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-10%	-22%	+7%	+2%	+1%	+4%	-22%
MD	+8%	+2%	+4%	+5%	+4%	+6%	0%
LDA	+7%	+3%	+5%	+7%	+2%	+2%	+3%
K-NN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
STD.N.N.	+2%	+3%	0%	0%	+1%	+1%	+4%

Tabella 42a – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo B, legata all'introduzione dell'indice NDVI.

Classificatore	Variazione percentuale: input III vs I												
	KIA	Classi mappate											
		Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-10%	-28%	+1%	-4%	-6%	-6%	+2%	+6%	-25%	-18%	-9%	-1%	+1%
MD	+6%	-3%	+6%	+18%	-4%	+2%	+1%	+15%	0%	+20%	+4%	+2%	0%
LDA	+6%	+6%	+3%	+5%	+7%	+2%	+1%	+7%	+10%	0%	+6%	+5%	+2%
k-NN	0%	+1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
STD.N.N.	+5%	+8%	+7%	+13%	+13%	-1%	+3%	-19%	-35%	-12%	+20%	+4%	+3%

Tabella 42b – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo B, dovuta alla combinazione dell'indice NDVI al set multitemporale normalizzato.

Classificatore	Variazione percentuale: input IV vs II												
	KIA	Classi mappate											
		Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-10%	-29%	+2%	-4%	-6%	-6%	+1%	+6%	-24%	-17%	-9%	-2%	+2%
MD	+6%	-3%	+6%	+18%	-5%	+2%	+1%	+13%	0%	+20%	+5%	+2%	0%
LDA	+5%	+6%	+2%	+4%	+7%	+2%	+1%	+6%	+9%	+1%	+7%	+5%	+2%
k-NN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
STD.N.N.	-2%	0%	-3%	-9%	-7%	+1%	-3%	+33%	+7%	-11%	+2%	+1%	+4%

7.2.5 Effetti generati dalla sostituzione del dato multitemporale SPOT5 con bande sintetiche

La sostituzione del dato multitemporale SPOT5 con il set di indici *T* (*normalized multitemporal indeces*) elaborati per le singole bande spettrali determina, relativamente alle classificazioni basate sul sistema di nomenclatura di tipo A, un significativo miglioramento delle prestazioni dei classificatori MD e k-NN, per i quali si registrano rispettivamente un incremento dei valori di KIA pari al 28% e 29% (Tab. 43). In particolare l'utilizzo congiunto degli indici *T* favorisce il riconoscimento delle superfici tagliate a raso nel periodo 2004-2006 per la funzione MD e delle tagliate precedenti al 2004 per il classificatore k-NN.

Per i restanti classificatori si rileva invece un modesto incremento dell'indice KIA per la classificazione generata tramite LDA e una lieve riduzione delle prestazioni di ML e STD.N.N.

Considerando le classificazioni articolate secondo un sistema di nomenclatura a sei classi la principale variazione osservata riguarda la funzione ML, per la quale il ricorso al set di indici *T* causa la riduzione dell'accuratezza globale di classificazione di oltre dieci punti percentuali (Tab. 44). L'applicazione dei restanti algoritmi *pixel-oriented* al VI input piuttosto che al I, provoca, ad eccezione del classificatore LDA per cui si osserva una riduzione del valore di KIA del 4%, un lieve miglioramento delle prestazioni. In particolare mentre per il classificatore k-NN migliora soprattutto l'identificazione delle superfici non utilizzate e peggiora l'individuazione dei tagli condotti in anni differenti da quelli di acquisizione del dato SPOT5, per il classificatore MD migliora invece oltre al riconoscimento del bosco non utilizzato anche quello dei tagli 2005.

Infine il ricorso agli indici *T* appare vantaggioso, seppur in misura limitata, ai fini della classificazione *object-oriented* (KIA: +7%).

Tabella 43 – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A, dovuta alla sostituzione del set multitemporale con il set di indici *T* elaborati per le bande spettrali SPOT5.

Classificatore	Variazione percentuale: input VI vs I						
	KIA	Classi mappate					
		Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-2%	+15%	-9%	-12%	+6%	-8%	+15%
MD	+28%	-20%	+28%	+35%	-6%	+54%	-15%
LDA	+2%	+5%	-1%	-4%	+3%	+1%	+4%
K-NN	+29%	0%	+19%	+42%	+4%	+15%	+4%
STD.N.N.	-3%	-9%	0%	-3%	+6%	+5%	-12%

Tabella 44 – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo B, dovuta alla sostituzione del set multitemporale con il set di indici *T* elaborati per le bande spettrali SPOT5.

Classificatore	Variazione percentuale: input VI vs I												
	KIA	Classi mappate											
		Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-11%	-10%	-16%	-8%	-14%	-5%	+4%	-14%	-17%	-37%	-1%	+9%	-6%
MD	+8%	-8%	+39%	-24%	-29%	+8%	-7%	-12%	-20%	+74%	-14%	+21%	-17%
LDA	-4%	+17%	0%	-23%	-7%	-6%	-2%	-10%	-17%	-1%	+3%	+2%	-1%
k-NN	+1%	+165%	+2%	-22%	-7%	-21%	+14%	-10%	-14%	-63%	-20%	+6%	+12%
STD.N.N.	+7%	+14%	0%	-10%	+6%	+5%	+8%	+12%	+9%	-4%	+12%	+3%	+1%

Sintetizzando l'intero contenuto informativo del set multitemporale SPOT5 attraverso l'analisi delle componenti principali si rilevano per tutte le tesi sperimentali significative diminuzione dei livelli di accuratezza tematica raggiunti (Tab. 45 e 46). Particolarmente pronunciate sono le riduzioni in termini di KIA osservate per le classificazioni elaborate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A. Le maggiori variazioni, riscontrate nell'ordine per le funzioni k-NN (KIA: -46%), LDA (KIA:-44%) e ML (KIA:-40%), appaiono in ogni caso principalmente connesse ad una consistente omissione delle superfici boscate non utilizzate. Tra i classificatori *pixel-oriented* MD appare il meno influenzato dall'applicazione delle componenti principali, tuttavia è l'approccio *object-oriented* a dimostrarsi il meno sensibile alla sintesi informativa oggetto di analisi, riscontrando riduzioni massime del valore di KIA del 20%.

Tabella 45 – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo A, dovuta alla sostituzione del set multitemporale con le componenti principali estratte tramite PCA.

Classificatore	Variazione percentuale: input V vs I						
	KIA	Classi mappate					
		Bosco non utilizzato		Tagli precedenti al 2004		Tagli realizzati nel periodo 2004-2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-40%	-43%	-12%	-26%	-15%	-2%	-37%
MD	-33%	-14%	-15%	-10%	-16%	-26%	-14%
LDA	-44%	-43%	-28%	-8%	-24%	-17%	-29%
K-NN	-46%	-34%	-22%	-7%	-16%	-17%	-35%
STD.N.N.	-20%	-14%	-10%	-15%	-14%	-9%	-14%

Tabella 46 – Variazione percentuale dei valori di KIA, e dei valori di accuratezza del produttore (AP) e accuratezza dell'utilizzatore (AU) osservati per le classificazioni sviluppate sulla base del sistema di nomenclatura di tipo B, dovuta alla sostituzione del set multitemporale con le componenti principali estratte tramite PCA.

Classificatore	Variazione percentuale: input V vs I												
	KIA	Classi mappate											
		Bosco non utilizzato		Tagli 2002		Tagli 2003		Tagli 2004		Tagli 2005		Tagli 2006	
		AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU	AP	AU
ML	-28%	-45%	-20%	-42%	-19%	-13%	-8%	-5%	-39%	-8%	-32%	+1%	-11%
MD	-21%	-18%	-14%	0%	-34%	-7%	-5%	-60%	-33%	-24%	-26%	-8%	-7%
LDA	-31%	-65%	-28%	-25%	-15%	-10%	-11%	-13%	-43%	-12%	-46%	-1%	-19%
k-NN	-26%	-70%	-25%	-42%	-11%	-6%	-5%	-2%	-40%	-26%	-30%	+7%	-21%
STD.N.N.	-19%	-6%	-5%	-18%	-15%	-16%	-5%	-31%	-51%	-22%	-24%	-13%	-19%

8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La sperimentazione condotta dimostra l'efficacia dell'impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione per la quantificazione delle superfici forestali tagliate a raso (vd. § 5.1.1), rappresentando un valido supporto per l'individuazione di utilizzazioni anche di estensione inferiore a 0,5 ha. Tra i sistemi ottici di osservazione satellitare ad alta risoluzione, il dato SPOT5 sembra al momento rappresentare il migliore compromesso tra tipo/qualità di informazioni ritraibili e costo (circa 1-2 euro/km² per prodotto standard su scene di 60 km² a fronte di 15-17 euro/km² per analoghe immagini QuickBird e Ikonos, tuttavia contraddistinte nel pancromatico da risoluzioni geometriche inferiori al metro).

8.1 PRINCIPALI CRITICITÀ RISCONTRATE

Requisito fondamentale per una corretta analisi multitemporale basata sull'impiego di immagini satellitari è una serie diacronica caratterizzata da un elevato livello di coregistrazione del dato. In tal senso risulta critica l'acquisizione di immagini con ampiezza dell'angolo di vista *off-nadir* superiore a 10°. In questi casi infatti (*frame* 68-266 e 70-267) non è possibile raggiungere attraverso le procedure di ortorettifica una coregistrazione adeguata per implementare analisi multitemporali volte all'individuazione delle superfici tagliate a raso (Fig. 43).

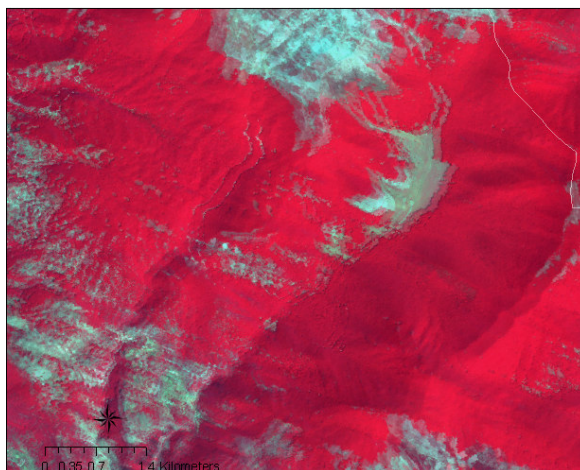


Figura 43 - Esempio di mancata coregistrazione esistente tra due immagini della copertura multitemporale SPOT5 disponibile per la *frame* 68 266. Le due immagini sono presentate in semitrasparenza allo scopo di evidenziare lo scostamento posizionale, pari, in questo caso, a circa 200 m.

Un ulteriore fattore limitante è rappresentato dall'effettiva disponibilità di dati telerilevati, che, in alcuni anni, può essere localmente limitata a immagini caratterizzate da una abbondante copertura nuvolosa, di ostacolo all'osservazione dell'intero territorio investigato. In particolare, nel caso esaminato non è stato

possibile disporre, per la *frame* 70 266, di immagini acquisite nell'estate 2003 prive di una consistente copertura nuvolosa (Fig. 44).

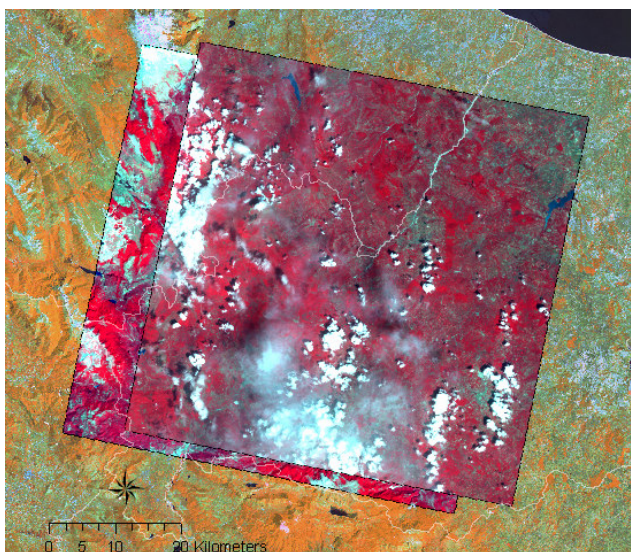


Figura 44 - Immagini SPOT5 disponibili per la *frame* 70 266.

8.2 PROPOSTE OPERATIVE

1. Limitatamente alle realtà e agli anni esaminati, il confronto tra la superficie tagliata a raso cartografata e quella registrata ufficialmente conferma l'inadeguatezza dei dati SISTAN relativamente alle utilizzazioni forestali nei cedui. Le superfici tagliate a raso registrate a livello amministrativo a fini statistici sono infatti significativamente inferiori rispetto a quelle osservate da satellite. Ciò può essere dovuto alle modalità di raccolta/archiviazione dei dati amministrativi e soprattutto alla presenza di procedure semplificate di autorizzazione al taglio applicate ai soprassuoli governati a ceduo (vd. § 3.3.1 e 7.1). In ogni caso si ribadisce la necessità di un aggiustamento della statistica ufficiale relativa alle superfici ceduate al fine di fornire una informazione corretta per la stima dei serbatoi di carbonio e per i processi di *reporting* internazionale, quali ad esempio MPCFE o il Forest Resource Assessment della FAO. In tal senso una valida soluzione può essere rappresentata dalla procedura proposta di calibrazione statistica del dato amministrativo basata sull'impiego di immagini telerilevate SPOT5 (vd. 7.1.1), caratterizzata da costi ovviamente dipendenti dalla dimensione del campione, ma in generale contenuti se si considera il già accennato relativo limitato costo delle suddette immagini e la relativa rapidità di individuazione delle tagliate da parte di interpreti esperti (nel caso in esame, i tempi di lavoro nella fase di interpretazione a video sono stati in media pari a circa 10 minuti per km² di superficie forestale).
2. Per quanto concerne il riconoscimento semi-automatico delle superfici tagliate a raso, risultati incoraggianti sono stati ottenuti attraverso l'approccio di classificazione *object-oriented*, che manifesta, rispetto alle tecniche *pixel-oriented*, una maggiore efficienza in tutte le tesi sperimentali proposte (vd. §

7.2.2). In particolare risulta plausibile un impiego operativo della classificazione *object-oriented* in combinazione con un sistema di nomenclatura semplificato (tipo A, vd. § 5.4.4) volto a discernere le superfici non utilizzate da quelle tagliate a raso, mentre appaiono insoddisfacenti i risultati ottenuti per la mappatura dell'anno di utilizzazione (vd. § 6.2.1 e § 6.2.2). In quest'ultimo caso infatti entrambi gli approcci di classificazione testati denotano particolari difficoltà nel distinguere correttamente tra superfici boschive non utilizzate e tagli condotti in anni differenti da quelli di acquisizione del dato satellitare. Quanto riscontrato è probabilmente dovuto alla ripresa vegetativa che, insediandosi nelle superfici analizzate successivamente all'intervento di taglio, determina una similitudine nella risposta spettrale delle classi in questione. Risultati decisamente migliori si registrano per le classi dei tagli condotti nel 2003 e 2006, anni per i quali si dispone della copertura SPOT5 e in cui le utilizzazioni sono state frequenti.

3. Limitatamente ai classificatori *pixel-oriented*, la funzione LDA fornisce le migliori prestazioni indipendentemente dalla complessità del sistema di nomenclatura impiegato (vd. § 7.2.1). Tra i restanti algoritmi solamente ML offre risultati comparabili al suddetto classificatore nel caso di sistemi di nomenclatura semplificati (tipo A, vd. § 5.4.4).
4. La normalizzazione radiometrica appare utile unicamente ai fini della classificazione k-NN volta alla distinzione tra le superfici non utilizzate e quelle sottoposte al taglio a raso (vd. § 7.2.3). In tutti gli altri casi, indipendentemente dalla tecnica di classificazione impiegata, l'elaborazione in questione non apporta significative migliorie alle classificazioni.
5. L'indice NDVI determina effetti diversificati in funzione dell'algoritmo adottato per la classificazione, ma in ogni caso modesti in termini di incremento di accuratezza tematica (vd. § 7.2.4).
6. L'indice *T* (*multitemporal normalized index*) ha rappresentato nei casi esaminati, lo strumento più efficace per una sintesi del contenuto informativo delle immagini multitemporali SPOT5, mentre il ricorso alle componenti principali (PCA) appare fortemente limitante per tutti i classificatori testati (vd. § 7.2.5).

Alla luce di quanto ottenuto, la sperimentazione condotta apre interessanti prospettive di sviluppo applicativo, meritevoli di essere testate in altri ambiti territoriali in cui i cedui trattati a taglio raso abbiano significativa diffusione.

BIBLIOGRAFIA

- Baatz M., Benz U., Dehghani S., Heynen M., Holtje A., Hofmann P., Lingenfelder I., Mimler M., Sohlbach M., Weber M., Willhauck G. (2004). eCognition Professional. User Guide 4. Definiens Imaging, Munchen, Germany.
- Benz U.C., Hofmann P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58: 239-258.
- Bologna S., Chirici G., Corona P., Marchetti M., Pugliese A., Munafò M. (2004). Sviluppo e implementazione del IV livello Corine Land Cover 2000 per i territori boscati e ambienti semi-naturali in Italia. *Atti VIII Conferenza Nazionale ASITA*, Roma, 14-17 dicembre 2004, pp. 467 - 472.
- 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.
- Chirici G., Corona P., Marchetti M., Portoghesi L., Travaglini D. (2003a). Feasibility assessment of very high resolution satellite imagery for hierarchical classification of burnt pine stands in a Mediterranean coastal environment. *Alberi e foreste per il nuovo millennio*, pp. 67-72. De Angelis P., Macuz A., Bucci G., Scarascia Mugnozza G. (a cura di), *III Congresso SISEF*, Viterbo.
- Chirici G., Corona P., Marchetti M., Travaglini D. (2003b). Testing Ikonos and Landsat 7 ETM+ potential for stand-level forest type mapping by soft supervised approaches. *Advances in Forest Inventory for Sustainable Forest Management and Biodiversity Monitoring*, pp. 71-85. P. Corona, M. Kohl, M. Marchetti (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Chirici G., Corona P., Travaglini D. (2003c). Sperimentazione di tecniche di classificazione object-oriented di immagini QuickBird a fini forestali. *L'Italia Forestale e Montana*, 4: 231-250.
- 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*, 37: 113-136.
- Chirici G., Corona P. (2006). Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per il rilevamento delle risorse forestali. *Aracne Editrice*, Roma.

- Chirici G., Blasi M., Bertini R., Bonora N., Chiavetta U., Ottaviano M., Corona P., Lamonaca A., Giuliarelli D., Mastronardi A., Nardinocchi G., Sambucini V., Tonti D., Marchetti M. (2008). Monitoraggio della rinnovazione naturale post incendio tramite l'uso integrato di immagini telerilevate ad alta risoluzione: il caso della pineta di Castel Fusano. *Rivista italiana di Telerilevamento*, 40 (1): 107-122.
- Chuvieco E., Riano D., Aguado I., Cocero D. (2002). Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat thematic mapper reflectance data: Applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 23(11): 2145-2162.
- Ciancio O., Nocentini S. (2004). Il bosco ceduo. Selvicoltura, assestamento, gestione. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze.
- Coppin P.R., Bauer M.E. (1996). Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews*, 13: 207-234.
- Corona P. (2000). Introduzione al rilevamento campionario delle risorse forestali. Editrice CUSL, Firenze.
- Corona P., Macrì A., Marchetti M. (2004). Boschi e foreste in Italia secondo le più recenti fonti informative. *L'Italia Forestale e Montana*, 2: 119-136.
- Corona P., Giuliarelli D., Lamonaca A., Mattioli W., Tonti D., Chirici G., Marchetti M. (2007). Confronto sperimentale tra superfici a ceduo tagliate a raso osservate mediante immagini satellitari ad alta risoluzione e tagliate riscontrate amministrativamente. *Forest@*, 4 (3): 324-332. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Cutolo N. (2000). Il progetto per il settore forestale. In: I riferimenti delle nuove statistiche forestali: integrazione nel sistema e ottica di filiera. Istat, Servizio Agricoltura, Roma, pp. 16-27.
- Desclée B., Bogaert P., Defourny P. (2006). Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment*, 102: 1-11.
- Dorren L.K.A., Maier B., Seijmonsbergen A.C. (2003). Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification. *Forest Ecology and Management*, 183: 31-46.
- EEA (2000). CORINE land cover technical guide - Addendum 2000. Technical report n. 40, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

Geomatica (2003). Geomatica Focus. User Guide. Richmond Hill, ON, Canada.

Giannetti F., Canavesio A., Selvaggi A. (2004). Uso di dati QuickBird nella cartografia degli habitat in Piemonte: rapporti con il sistema di classificazione, aspetti metrici ed estrazione dell'informazione tematica. Atti VIII Conferenza Nazionale ASITA, Roma, vol. II: 1183-1188.

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. [online] URL: <http://www.sisef.it/>

Giuliarelli D., Lamonaca A., (2007). Utilizzo di immagini VHR con tecniche object-oriented per il monitoraggio della superficie forestale: il caso dei Monti Cimini (VT). Atti XI Conferenza Nazionale ASITA, Torino, 6-9 Novembre 2007, vol. II: 1251-1256.

Giuliarelli D., Chirici G., Rossi L., Biscontini D., Tonti D., Mattioli W., Lamonaca A., Marchetti M., Corona P. (2007). Monitoring coppice clearcuts by multitemporal VHR satellite imagery. CD Proceedings of the ForestSat 2007 Conference, 5-7 November 2007, INRA, Montpellier, France.

Gomarasca M. (2004). Elementi di geomatica. Associazione Italiana di Telerilevamento, Milano.

Guidi G., Cattoi M. (2004). Il controllo delle utilizzazioni forestali come strumento di analisi del settore. Il caso delle Marche. Sherwood, 101: 21-23.

Haralick R.M. (1979). Statistical and Structural Approaches to Texture. Proceedings of the IEEE, Vol. 67, n. 5, May 1979, pp. 786-804.

Hayashi M., Hori S., Suzuki K., Iehara T., Matsumoto M., Awaya Y., Gonzales G. (2007). Verification of the monitoring method for ARD under article 3.3 of the kyoto protocol. CD Proceedings of the ForestSat 2007 Conference, 5-7 November 2007, INRA, Montpellier, France.

Hayes D.J., Sader S.A. (2001). Comparison of change-detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67: 1067-1075.

- Heikkonen J., Varjo, J. (2004). Forest change detection applying Landsat Thematic Mapper difference features: A comparison of different classifiers in boreal forest conditions. *Forest Science*, 50: 579–588.
- Hellrigl B. (2002). L'uso energetico del legno nelle abitazioni in Italia. *Sherwood*, 75: 15-26.
- INFC (2007). Le stime di superficie 2005. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Ispettorato Generale - Corpo Forestale dello Stato, CRA - Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e l'Alpicoltura, Trento. [on line] URL: <http://www.infc.it>.
- Jenness, J. (2006). Dissolve adjacent polygons (diss_adjac.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.8a. Jenness Enterprises. [Online] URL: http://www.jennessent.com/arcview/dissolve_adjacent_polys.htm.
- Jensen J. R., Rutchey K., Koch M.S., Narumalani S. (1995). Inland wetland change detection in the Everglades Water Conservation Area 2A using a time series of normalized remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61 (2): 199-209.
- Jin S. M., Sader S. A. (2005). Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94: 364–372.
- Lamonaca A. (2006). Utilizzo di immagini QuickBird per il monitoraggio annuale della superficie forestale. *L'Italia Forestale e Montana*, 61(2): 119-132.
- Lewinski S. (2006). Applying fused multispectral and panchromatic data of Landsat ETM+ to object oriented classification. *Proceedings of the 26th EARSeL Symposium, New Developments and Challenges in Remote Sensing*, May 29-June 2, 2006, Warsaw, Poland.
- Klecka W. R. (1980). *Discriminant analysis*. SAGE publications, Newbury Park, CA.
- Macrì A. (2006). Uso di dati amministrativi nella rilevazione dei tagli boschivi. *Alberi e Territorio*, 3: 41-46.
- Marchetti M., Ricotta C. (2004). Monitoraggio. Contributo del telerilevamento. Incendi e complessità ecosistemica, pp. 220-225. Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetta M., Maturani A. (a cura di), Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Società Botanica Italiana, Roma.
- Maricchiolo C., Sambucini V., Pugliese A., Blasi C., Marchetti M., Chirici G., Corona P. (2004). La realizzazione in Italia del progetto europeo I&CLC2000: metodologie operative e risultati. *Atti VIII Conferenza Nazionale ASITA*, Roma, 14-17 dicembre 2004, pp. 113-128.

- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. (2005). Allegato 4. Legenda dell'Atlante dell'uso del territorio. [online] URL: <http://www.minambiente.it/scn/records/sections/download/files/allegato4.pdf>.
- Mitri G.H., Gitas I.Z. (2006). Fire type mapping using object-based classification of Ikonos imagery. *International Journal of Wildland Fire*, 15: 457-462.
- Nunes De Lima M.V. (2005). IMAGE 2000 and CLC2000. Products and Methods. JRC-IES, European Communities, Italy.
- Ongaro L., Ramat G. (2003). Analysis of the cork forest of Ben Stimane (Morocco) using multi temporal images. In: *Advances in Forest Inventory for Sustainable Forest Management and Biodiversity Monitoring*, pp. 343-351. P. Corona, M. Kohl, M. Marchetti (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Pettenella D, Speziali P (2004). L'autorizzazione al taglio di lotti boschivi. *Sherwood*, 104: 11-15.
- Richards, J. A. (1993). *Remote sensing digital image analysis. An introduction* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag. 340 pp.
- Schott J.R., Selvaggio C., Volchok W.J. (1998). Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26:1-16.
- Travaglini D., Chirici G., Corona P., Lamonaca A., Marchetti M. (2003). Potenzialità delle immagini telerilevate SPOT5 per inventari forestali su vasta scala. *L'Italia Forestale e Montana*, 4: 301-317.
- Saksa T., Uutera J., Kolstrom T., Lehtikainen M., Pekkarinen A., Sarvi V. (2003). Clear-cut detection in boreal forest aided by remote sensing. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 18: 537-546.
- Wilson E. H., Sader S. A.. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80: 385-396.
- Wulder A. A., Skakun R. S., Kurz W. A., White J. C. (2004). Estimating time since forest harvest using segmented Landsat ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 93: 179-187.

Zhang Y. (2002). Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite as well as Landsat 7 images and initial solutions. Symposium on “Geospatial Theory, Processing and Applications”, Ottawa 9-12 July 2002, Canada, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), Volume 34, Part 4.