UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

DOTTORATO DI RICERCA
SCIENZE GEODETICHE E TOPOGRAFICHE

CICLO XIX

Analisi di immagini aerofotogrammetriche e telerilevate per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa di ecosistemi forestali e della loro evoluzione

SETTORE SCIENTIFICO E DISCIPLINARE:
ICAR/06 TOPOGRAFIA E CARTOGRAFIA

Anno Accademico 2005/2006

Tesi di
Dott. Ing. Mognol Alessandro

Coordinatore
Prof. Ing. Gabriele Bitelli
Relatore
Prof. Ing. Gabriele Bitelli

PAROLE CHIAVE

fotogrammetria

telerilevamento

segmentazione

classificazione

vegetazione

RIASSUNTO

L'obiettivo della tesi riguarda l'utilizzo di immagini aerofotogrammetriche e telerilevate per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa di ecosistemi forestali e della loro evoluzione. Le tematiche affrontate hanno riguardato, da una parte, l'aspetto fotogrammetrico, mediante recupero, digitalizzazione ed elaborazione di immagini aeree storiche di varie epoche, e, dall'altra, l'aspetto legato all'uso del telerilevamento per la classificazione delle coperture al suolo.

Nel capitolo 1 viene fatta una breve introduzione sullo sviluppo delle nuove tecnologie di rilievo con un approfondimento delle applicazioni forestali; nel secondo capitolo è affrontata la tematica legata all'acquisizione dei dati telerilevati e fotogrammetrici con una breve descrizione delle caratteristiche e grandezze principali; il terzo capitolo tratta i processi di elaborazione e classificazione delle immagini per l'estrazione delle informazioni significative.

Nei tre capitoli seguenti vengono mostrati tre casi di applicazioni di fotogrammetria e telerilevamento nello studio di ecosistemi forestali.

Il primo caso (capitolo 4) riguarda l'area del gruppo montuoso del Prado-Cusna, sui cui è stata compiuta un'analisi multitemporale dell'evoluzione del limite altitudinale degli alberi nell'arco degli ultimi cinquant'anni. E' stata affrontata ed analizzata la procedura per il recupero delle prese aeree storiche, definibile mediante una serie di successive operazioni, a partire dalla digitalizzazione dei fotogrammi, continuando con la determinazione di punti di controllo noti a terra per l'orientamento delle immagini, per finire con l'ortorettifica e mosaicatura delle stesse, con l'ausilio di un Modello Digitale del Terreno (*DTM*). Tutto ciò ha permesso il confronto di tali dati con immagini digitali più recenti al fine di individuare eventuali cambiamenti avvenuti nell'arco di tempo intercorso.

Nel secondo caso (capitolo 5) si è definita per lo studio della zona del gruppo del monte Giovo una procedura di classificazione per l'estrazione delle coperture vegetative e per l'aggiornamento della cartografia esistente – in questo caso la carta della vegetazione. In particolare si è cercato di classificare la

vegetazione soprasilvatica, dominata da brughiere a mirtilli e praterie con prevalenza di quelle secondarie a nardo e brachipodio. In alcune aree sono inoltre presenti comunità che colonizzano accumuli detritici stabilizzati e le rupi arenacee. A questo scopo, oltre alle immagini aeree (Volo IT2000) sono state usate anche immagini satellitari *ASTER* e altri dati ancillari (*DTM* e derivati), ed è stato applicato un sistema di classificazione delle coperture di tipo *object-based*. Si è cercato di definire i migliori parametri per la segmentazione e il numero migliore di *sample* per la classificazione. Da una parte, è stata fatta una classificazione supervisionata della vegetazione a partire da pochi *sample* di riferimento, dall'altra si è voluto testare tale metodo per la definizione di una procedura di aggiornamento automatico della cartografia esistente.

Nel terzo caso (capitolo 6), sempre nella zona del gruppo del monte Giovo, è stato fatto un confronto fra la *timberline* estratta mediante segmentazione ad oggetti ed il risultato di rilievi *GPS* a terra appositamente effettuati. L'obiettivo è la definizione del limite altitudinale del bosco e l'individuazione di gruppi di alberi isolati al di sopra di esso mediante procedure di segmentazione e classificazione *object-based* di ortofoto aeree in formato digitale e la verifica sul campo in alcune zone campione dei risultati, mediante creazione di profili *GPS* del limite del bosco e determinazione delle coordinate dei gruppi di alberi isolati.

I risultati finali del lavoro hanno messo in luce come le moderne tecniche di analisi di immagini sono ormai mature per consentire il raggiungimento degli obiettivi prefissi nelle tre applicazioni considerate, pur essendo in ogni caso necessaria una attenta validazione dei dati ed un intervento dell'operatore in diversi momenti del processo.

In particolare, le operazioni di segmentazione delle immagini per l'estrazione di *feature* significative hanno dimostrato grandi potenzialità in tutti e tre i casi. Un software ad "oggetti" semplifica l'implementazione dei risultati della classificazione in un ambiente *GIS*, offrendo la possibilità, ad esempio, di esportare in formato vettoriale gli oggetti classificati. Inoltre dà la possibilità di utilizzare contemporaneamente, in un unico ambiente, più sorgenti di informazione quali foto aeree, immagini satellitari, *DTM* e derivati.

Le procedure automatiche per l'estrazione della *timberline* e dei gruppi di alberi isolati e per la classificazione delle coperture sono oggetto di un continuo sviluppo al fine di migliorarne le prestazioni; allo stato attuale esse non devono essere considerate una soluzione ottimale autonoma ma uno strumento per impostare e semplificare l'intervento da parte dello specialista in fotointerpretazione.

SOMMARIO

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE 1

1.1 LE NUOVE TECNOLOGIE DI RILIEVO PER IL RILEVAMENTO DEL TERRITORIO.....1

1.2 TELERILEVAMENTO E GESTIONE SOSTENIBILE DELLE FORESTE.....5

CAPITOLO 2: ACQUISIZIONE DEI DATI.....11

2.1 IMMAGINI A TERRA, AEREE E SATELLITARI IN APPLICAZIONI FORESTALI..... 11

2.2 CARATTERISTICHE DEI DATI..... 11

2.2.1 Immagini ottiche..... 12

2.2.2 Immagini SAR..... 13

2.3 RISOLUZIONE E SCALA 13

2.3.1 Risoluzione spettrale 14

2.3.2 Risoluzione spaziale 14

2.3.3 Risoluzione temporale 15

2.3.4 Risoluzione radiometrica 15

2.3.5 Relazione tra scala e risoluzione 16

2.4 SENSORI E PIATTAFORME AEREE..... 19

2.4.1 Fotografia Aerea 20

2.4.2 Camere aeree digitali..... 21

2.5 SENSORI E PIATTAFORME SATELLITARI 22

2.6 LIMITI GENERALI NELL'ACQUISIZIONE DI DATI AEREI E SATELLITARI..... 24

CAPITOLO 3: PROCESSAMENTO DELLE IMMAGINI 27

3.1 EFFETTI RADIOMETRICI E RISPOTE SPETTRALI 27

3.1.1 Processamento radiometrico delle immagini 28

3.2 GEOCODIFICA, ORTORETTIFICA E MOSAICATURA DELLE IMMAGINI 31

3.3 ESTRAZIONE DELLE INFORMAZIONI 33

3.3.1 Classificazione delle immagini 34

3.3.2 Stima dell'accuratezza 38

3.3.3 Struttura e tessitura dell'immagine 42

3.3.4 Analisi dei cambiamenti 44

CAPITOLO 4: IL CASO DI STUDIO DEL GRUPPO PRADO – CUSNA 47

4.1 INQUADRAMENTO AMBIENTALE 47

4.2 MATERIALE A DISPOSIZIONE 50

4.3 PREPARAZIONE DEI DATI 51

4.3.1 I voli GAI e RER 51

4.3.2 Digitalizzazione dei fotogrammi 53

4.3.3 Individuazione dei Ground Control Point (GCP) 54

4.3.4 L'orientamento dei fotogrammi 58

4.3.5 L'ortofotogramma finale 63

4.4 ELABORAZIONI EFFETTUATE 65

4.5 CONSIDERAZIONI 70

CAPITOLO 5: IL CASO DI STUDIO DEL MONTE GIOVO.....73

5.1 INTRODUZIONE 73

5.2 SEGMENTAZIONE E CLASSIFICAZIONE 76

5.2.1 Fase 1 80

5.2.2 Fase 2 88

5.2.3 Fase 3 89

5.3 AGGIORNAMENTO CARTOGRAFICO 98

5.4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI 101

CAPITOLO 6: INTEGRAZIONE DI DATI TELERILEVATI E GPS IN UN GIS.....103

6.1 INTRODUZIONE 103

6.2 OBIETTIVI E METODI 108

6.3 FASI DEL PROCESSO 108

6.3.1 Segmentazione e classificazione..... 109

6.3.2 Rilievo GPS ed elaborazione dati 113

6.3.3 Implementazione dei risultati in un GIS..... 117

6.4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI 120

CAPITOLO 7: CONCLUSIONI 123

APPENDICE I

BIBLIOGRAFIA.....i

1 INTRODUZIONE

1.1 LE NUOVE TECNOLOGIE DI RILIEVO PER IL RILEVAMENTO DEL TERRITORIO

Il telerilevamento è una scienza che permette di ottenere dati qualitativi e/o quantitativi riguardanti un oggetto, un'area o un fenomeno attraverso l'analisi dell'informazione acquisita senza contatto diretto con lo stesso oggetto, area o fenomeno indagato; questa informazione può provenire sia da foto aeree che da immagini satellitari. *"Un'immagine di un paesaggio è telerilevamento"* (*Lillesand and Kiefer, 1994).*

Le prime applicazioni tecniche di foto aeree per visualizzare e descrivere la realtà risalgono al XIX secolo per mezzo dell'uso di palloni. Con lo sviluppo degli aeroplani, specialmente durante le due guerre mondiali, e delle camere aeree – con progressivi miglioramenti sia per quanto riguarda l'aspetto tecnico delle macchine che le caratteristiche dei supporti sensibili – l'applicazione di foto aeree per l'analisi e il monitoraggio della realtà si diffuse sempre più, prima in ambito militare e successivamente nei settori pubblici e privati della società. Infine, lo sviluppo tecnologico negli ultimi decenni delle tecnologie satellitari ha reso disponibile una grande quantità di immagini "telerilevate" della superficie terrestre, ampliando notevolmente il campo di applicabilità di questa scienza.

Un complesso insieme di tecniche si è al contempo sviluppato al fine di interpretare e utilizzare al meglio queste fotografie per la produzione di carte geografiche e topografiche. Per poter produrre mappe rigorose dal punto di vista spaziale è necessario definire alcuni parametri fondamenti quali: quota di acquisizione, piani di volo dettagliati, stabilità della camera, informazioni accurate sulle coordinate di punti a terra identificabili nelle immagini.

Tutto ciò, insieme all'accuratezza nell'interpretazione delle immagini aeree, diede il via ad una vera rivoluzione nel campo del rilevamento permettendo di arrivare a rappresentare la realtà con una precisione molto elevata e diventando così strumento indispensabile per la gestione e la pianificazione del territorio (urbanizzato e non), senza dimenticare evidentemente le applicazioni di carattere strategico/militare.

Le mappe create partendo da fotogrammetria aerea possono essere prodotte a scale legate, in primo luogo, all'altezza di volo e alla distanza focale caratterizzante le lenti della camera; le varie possibilità di scelta dei parametri permettono così applicazioni differenti, sia a livello operativo che di progettazione.

Nonostante la grande rivoluzione introdotta da questi sistemi, e la loro possibilità di applicazione su vasta scala, essi rimangono strumenti molto complessi e costosi; si pensi al costo di acquisto di una camera aerofotogrammetrica, alla complessità del processo di elaborazione del blocco fotogrammetrico fino alla fase di restituzione con l'interpretazione delle immagini da parte di "fotointerpreti" per l'identificazione di tutte le "*features*" (oggetti) presenti. A questi problemi si possono aggiungere quelli derivanti da un monitoraggio costante di una determinata porzione di territorio; l'esecuzione di voli ripetuti in differenti periodi di tempo necessita ingenti investimenti, rendendo il processo di aggiornamento cartografico da foto aeree in alcuni casi impraticabile, almeno se lo si dovesse fare ogni volta che si presentino cambiamenti nella realtà.

Nel 1972, infine, ebbe origine una nuova epoca: usando satelliti orbitanti ad un'altitudine maggiore di 700 km, ebbe inizio il programma *LANDSAT*. Si cominciarono a produrre immagini "ininterrotte" della superficie terrestre; per la prima volta nella storia, fu sviluppato globalmente e sistematicamente un sistema per l'estrazione di informazioni a terra non per scopi militari.

Con questo strumento fu possibile ottenere informazioni a livello globale, obiettivo in precedenza impensabile, con l'accuratezza permessa dal sistema stesso, per stabilire, ad esempio, l'area totale occupata dalle foreste tropicali o dai

ghiacci nel continente antartico. Le immagini satellitari sono ricevute da apposite stazioni a terra e immagazzinate in formato digitale, mettendo a disposizione dell'intera comunità tecnico-scientifica un nuovo livello di informazione globale. A questa caratteristica si aggiunge la capacità del sistema, per le sue caratteristiche di periodicità, di permettere un processo di mappatura in grado di produrre serie storiche che mostrano tendenze e parametri di espansione o contrazione di forme o tipi di coperture sulla superficie del pianeta. Ad esempio, si possono ricavare informazioni sulla percentuale di deforestazione delle foreste tropicali o sulla percentuale di espansione di grandi città.

Sono state realizzate fino ad oggi molte tipologie di satelliti e sensori, e di conseguenza di immagini; questo rende disponibile un numero sempre maggiore di informazioni per migliorare la conoscenza della superficie terrestre. Le immagini dei vari sistemi permettono di osservare la realtà a partire da una informazioni di dimensione elementare, corrispondente alla superficie del pixel, che varia ampiamente: nel caso del satellite *LANDSAT* è possibile rappresentare con un pixel superfici dell'ordine dei 900 m^2, mentre per i satelliti meteorologici questa superficie può essere ad esempio di 1 km^2. Questi sistemi sono in grado di rappresentare la distribuzione globale di un determinato parametro, come ad esempio le dinamiche riguardanti la distribuzione delle coperture nuvolose, o porzioni minori di territorio come la descrizione delle tipologie di coperture su una certa zona della superficie.

A causa della loro risoluzione, o per meglio dire della loro capacità di osservare e mappare, questi satelliti possono rivestire oggi un ruolo basilare nella gestione e pianificazione del territorio su vasta scala; per la generazione di mappe operative e tecniche da utilizzare, per esempio, in area urbana o nelle operazioni di delimitazione di proprietà rurali, sono invece necessarie immagini aeree ad una più alta risoluzione. D'altra parte tutto ciò implica investimenti considerevoli, sia per l'acquisizione che per l'interpretazione di tali immagini, soprattutto se si opera su una scala locale con scopi operativi come può essere per il catasto urbano o rurale.

Nel 1999 comincia una nuova fase nell'acquisizione di immagini satellitari con il lancio del primo satellite orbitale ad alta risoluzione a livello civile, chiamato *IKONOS*. Esso è in grado di produrre immagini ad altissima risoluzione, fino ad un punto per m^2 a terra nella modalità pancromatica. Queste immagini, come quelle *LANDSAT*, sono prodotte in modo continuo portando ad avere una incredibile mole di dati, coprendo praticamente tutto il pianeta, rendendo possibile la creazione di mappe a grandissima scala, paragonabili a quelle che si possono ottenere da fotogrammi aerei.

Questa tecnologia sta trasformando l'uso del telerilevamento in un sistema relativamente semplice di acquisizione di immagini a livello globale al fine di creare soluzioni specifiche con un livello di dettaglio ed una accuratezza compatibili con analisi a scale locali. In questa maniera il satellite *IKONOS* porta con sé entrambi i vantaggi degli altri sistemi, da una parte la periodicità e la globalizzazione delle immagini satellitari, dall'altra un'accuratezza paragonabile all'uso di foto aeree.

Dopo l'*IKONOS*, sono stati lanciati altri satelliti per l'altissima risoluzione, come il satellite *QUICKBIRD*, con una risoluzione di 60 cm in modalità pancromatica, o lo *SPOT 5*, con una risoluzione di 2.5 m in "*sharp mode"*. La produzione di immagini satellitari è stata accompagnata dallo sviluppo di vari strumenti per la loro elaborazione e classificazione, estendendo la potenzialità di queste tecnologie.

Il telerilevamento copre una vasta gamma di applicazioni. Ogni applicazione ha le sue specifiche esigenze per quello che riguarda la risoluzione spaziale, la risoluzione spettrale e la risoluzione temporale. Ci sono applicazioni che richiedono dati in tempo reale, come quelle sull'inquinamento da idrocarburi nel mare, sugli incendi e il monitoraggio del movimento dei ghiacci. Alcune applicazioni richiedono solamente immagini stagionali (identificazione delle colture, malattia delle foreste e monitoraggio delle aree umide), altre ancora hanno bisogno di acquisire l'immagine una sola volta (geologia strutturale). Spesso è necessario più di un sensore per rispondere adeguatamente a tutti i requisiti di una data applicazione. L'uso combinato di sorgenti multiple di

informazione è chiamato integrazione. In molte applicazioni, l'uso di informazioni provenienti da differenti fonti garantisce che l'identificazione degli elementi dell'immagine sia la più accurata possibile. Dati addizionali che possono fornire un aiuto nell'analisi e nell'interpretazione delle immagini sono detti "dati ancillari".

Un interessante tipo di applicazione consentito dalla disponibilità di fotogrammetria aerea ed oggi anche dalle immagini satellitari è legato all'ambito della gestione dell'ecosistema forestale; esso costituisce il tema principale della presente tesi.

1.2 TELERILEVAMENTO E GESTIONE SOSTENIBILE DELLE FORESTE

L'attenzione sempre maggiore che sta assumendo la questione della sostenibilità ambientale, e nel caso specifico la gestione sostenibile dell'ecosistema forestale, ha portato alla produzione di numerosi lavori, pubblicazioni, libri incentrati su tale argomento, volti ad analizzarne le problematiche e a individuare delle metodologie "sostenibili" per una loro risoluzione (*Franklin, 2001*).

Le attività umane nel campo forestale stanno spostando sempre più la loro attenzione verso i temi della sostenibilità e della conservazione delle biodiversità. I progetti alla base di una gestione sostenibile delle foreste hanno come obiettivo il mantenimento e la crescita a lungo termine dell'ecosistema forestale, cercando nello stesso momento di fornire prospettive di crescita ecologica, economica, sociale e culturale a beneficio delle generazioni presenti e future (*Canadian Council of Forest Ministers, 1995*).

In un contesto globale, per il continuo aumento della popolazione e dell'estrazione di risorse dall'ecosistema boschivo, le foreste, che nei secoli scorsi apparivano come un qualcosa di enormemente vasto e inesauribile, appaiono sempre più "finite", vulnerabili e pericolosamente in diminuzione, e forse, per alcuni, ormai soggette ad un danno irreparabile.

La consapevolezza di questa situazione, ha portato a dare maggiore enfasi ad una gestione scientifica e alla necessità di capire meglio il funzionamento dell'ecosistema e della sua struttura, su vaste aree e lunghi periodi di tempo.

Alcuni credono che l'aumento della pressione antropica sull'ambiente abbia fatto cadere l'ecosistema forestale in una situazione irreversibile, che può solo peggiorare per il costante aumento della popolazione e il progressivo diminuire delle risorse base. Altri analizzano la situazione attuale come sintomatica di un evidente sbilanciamento fra la gestione delle necessità umane – economiche in primo luogo – e la disponibilità di risorse, ma comunque ancora recuperabile.

In ogni caso, il futuro dell'ecosistema forestale e di una sua giusta gestione rimane incerto. L'unica cosa chiara è che deve essere acquisito un maggiore quantitativo di informazioni scientifiche per poter sostenere gli obiettivi e i traguardi emergenti, pratici e in corso nell'ambito della gestione delle foreste. Un obiettivo è riuscire a tenere in costante aggiornamento tutto ciò che riguarda il *management* forestale in modo da poter affrontare al meglio le nuove problematiche che possono sorgere. Un altro obiettivo è imparare a gestire la sostenibilità delle foreste in modo da poter mantenere i benefici ricavabili ma senza compromettere le generazioni future. Un altro ancora consiste nell'acquisire conoscenze riguardo l'attuale stato in cui versano le foreste e nel capire come il *management* è i processi naturali influenzino gli esiti futuri. Questi traguardi necessitano dell'acquisizione di nuove informazioni per mezzo di:

1. Conoscenza più approfondita dell'ecosistema forestale mediante prove sul campo, osservazioni su campionamenti a lungo termine, analisi e modelli di serie storiche di crescita, rotazione e competizione;
2. Trasformazione e interpretazione di dati da inventari forestali nuovi e esistenti;
3. Sviluppo e accesso a vari dati a livello regionale e nazionale, inclusi *network* sullo stato di salute delle piante, *network* per il sistema di supporto decisionale, e sistemi di classificazione ecologica o biogeoclimatica;

4. Acquisizione di nuovi dati e conoscenze attraverso lo sviluppo e l'applicazione di pacchetti di nuove tecnologie informative, inclusi i *GIS* (*Geographical Information System*), creazione di modelli al computer e *database* spaziali, e qualsiasi tipo di dato telerilevato.

D'altra parte, se l'unico impedimento per una gestione sostenibile delle foreste fosse solo l'acquisizione e l'accumulo di dati, i problemi sarebbero di risoluzione abbastanza semplice. Un punto di vista comune nelle scienze naturali riguarda la difficoltà di gestire l'enorme mole di dati disponibile senza perdere di vista i componenti chiave principali; nel campo selvicolturale è stato detto che *"noi ora abbiamo più dati di quelli che possiamo interpretare"* (*Lachowski et al., 2000: p.15*). Quello che sembra mancare è il modo di interpretare i dati, di dare una giusta interpretazioni agli stessi, di garantire la loro conversione in informazioni utili, e infine, la conversione delle informazioni in conoscenze usabili per definire lo stato attuale dell'ambiente e l'influenza dei processi antropici e naturali su di esso. Quindi, la conversione di dati in informazioni si presenta come la priorità principale del telerilevamento al fine di contribuire ad una gestione sostenibile delle foreste.

Un'applicazione di telerilevamento che abbia buon esito deriva dalla definizione di una metodologia. In un approccio tecnologico di telerilevamento, l'obiettivo è l'applicazione di ciò che si conosce – l'uso di ciò che si è imparato – per risolvere i problemi.

Un'applicazione di telerilevamento che abbia buon esito deriva dalla definizione di una metodologia. In un approccio tecnologico al telerilevamento, l'obiettivo è l'applicazione di ciò che si conosce – l'uso di ciò che si è imparato – per risolvere i problemi.

I *manager* forestali hanno a che fare con il problema della distribuzione spaziale delle risorse forestali nella loro area di gestione e nell'ecosistema circostante, con la necessità di una tempestiva acquisizione di informazioni sulle condizioni e sui cambiamenti di queste risorse, con i piccoli e grandi effetti associati a cambiamenti di configurazione (*pattern*) e processi a scale differenti nello spazio e nel tempo, con l'interpretazione delle conseguenze di questi

cambiamenti su componenti “non mappate”, come animali e piante selvatiche ed infine con implicazioni economiche, sociali ed ambientali delle attività e degli impatti antropici sulle foreste. Il traguardo del telerilevamento è soddisfare al meglio tutte queste esigenze multidisciplinari in risposta alle necessità della gestione dell’ecosistema forestale. Questa tecnologia può diventare uno strumento potente per individuare in modo preciso qualsiasi cambiamento e per aiutare a capire meglio le implicazioni delle azioni umane sull’ambiente. In questo consiste, d’altra parte, la definizione di una metodologia – convertire i dati in informazioni in maniera scientifica, capibile e ripetibile.

Per tutte quelle persone che a vari livelli hanno a che fare con il telerilevamento, le potenzialità di tale strumento come fonte di informazioni in supporto ad una gestione sostenibile delle foreste appaiono evidenti, sulla base fondamentalmente di due considerazioni:

1. Una gestione sostenibile delle foreste necessita l’acquisizione di dati sinottici e ripetitivi dello stato biofisico e biochimico della vegetazione su vasta scala e per lunghi periodi di tempo;
2. Il telerilevamento è l’unico modo per acquisire tali dati.

L’idea che questa tecnologia possa dare un contributo importante nella gestione dell’ecosistema forestale deriva dalle caratteristiche proprie dei dati telerilevati, ossia quelle di essere sinottici, ripetitivi, quantitativi e spazialmente definiti.

Nondimeno, da parte di molti è stato notato come i risultati dell’applicazione del telerilevamento nel campo forestale non sempre abbiano risposto alle aspettative, forse a causa della difficoltà di definire e legare tra loro i dati disponibili e le metodologie da applicare. Bisogna osservare anche come molti associno al termine telerilevamento solamente il rilevamento da satellite dimenticandosi dell’importanza del rilevamento da aereo, con le fotografie che esso fornisce. Certamente, se fino a qualche anno fa non ci si poteva aspettare che questa tecnologia potesse sostituire la fotografia aerea, nel provvedere allo stesso tipo di informazione forestale, oggi con la diffusione delle immagini ad altissima risoluzione (vedi *IKONOS* o *QUICKBIRD*) il divario si è molto

assottigliato. La soluzione ottimale rimane, comunque, quella di riuscire ad integrare nel modo migliore, a seconda dell'obiettivo che ci si prefigge, le informazioni ricavabili dalle due diverse fonti di dati.

Alcune volte si presuppone che se qualcosa può essere osservato su un'immagine satellitare allora si possa definire in breve tempo una procedura automatica per trasformare quello che si può vedere con i nostri occhi in informazioni pratiche da utilizzare nella realtà. Purtroppo, è raro riuscire a convertire immediatamente dati in informazioni utili; di solito deve essere definito un insieme di procedure e metodi interpretativi, e anche fatto questo non ci sono garanzie sicure di raggiungere il traguardo prefissato. La soluzione migliore per far fronte alle problematiche viste, consiste allora nel cominciare, per prima cosa, a capire i dati in nostro possesso e successivamente valutare quali siano i metodi e le applicazioni più adatti da sviluppare. In questa maniera, se da una parte il telerilevamento non potrà rappresentare la panacea nel campo della gestione forestale, dall'altra sarà sicuramente in grado di rispondere ad alcuni importanti quesiti necessari per andare avanti sulla strada di una gestione sostenibile. Una delle più grandi sfide è rappresentata infine dall'integrazione dei dati telerilevati con le osservazioni sul campo, e dall'identificazione del giusto ruolo del telerilevamento come strumento in grado di gestire specifiche problematiche ed opportunità inerenti la gestione ambientale.

In quest'ottica si possono elencare tre applicazioni di questa tecnologia che si potrebbero considerare operative:

1. Mappatura delle coperture vegetative;
2. Misurazione e monitoraggio della struttura, della funzione e della composizione della vegetazione;
3. Individuazione dei cambiamenti riguardanti tali caratteristiche nel tempo.

In particolare nel presente elaborato verranno affrontate le questioni legate all'applicabilità del primo e del terzo punto sopra esposti.

Pare opportuno far precedere la parte sperimentale da una breve rassegna sulle caratteristiche e sulle problematiche di acquisizione ed elaborazione di

immagini telerilevate; nell'ambito di questa rassegna si porranno in evidenza le specificità legate al campo applicativo forestale.

2 ACQUISIZIONE DEI DATI

2.1 IMMAGINI A TERRA, AEREE E SATELLITARI IN APPLICAZIONI FORESTALI

Immagini telerilevate delle foreste possono essere acquisite da piattaforme satellitari, aeree o sul campo. Ognuna di esse fornisce dati in supporto all'analisi e alla modellazione dell'ecosistema forestale, e tali dati possono essere fra loro complementari. Ad esempio, osservazioni sul campo possono essere integrate con una varietà di fotografie o immagini dell'area in esame o con misurazioni spettroscopiche (*Miller et al., 1976*), che, insieme a dati telerilevati o aerei, possono essere usate per estendere l'analisi dettagliata di un piccolo sito ad aree più vaste di studio.

Prima di usare dati provenienti da fonti diverse è necessario avere ben chiari gli obiettivi prefissati, in modo da valutare i vantaggi derivanti in rapporto ai costi maggiori da affrontare. Se, ad esempio, un'applicazione dipende pesantemente dai dati sul campo, ma con il telerilevamento è possibile sostituire o implementare tali dati, il risparmio in termini di costi è evidente, visto che i dati da satellite sono più facilmente acquisibili, analizzabili e più economici rispetto a quelli di un rilievo a terra.

2.2 CARATTERISTICHE DEI DATI

Un'immagine satellitare è prodotta come noto per mezzo di sensori montati a bordo di satelliti. Ogni tipologia di sensore produce immagini con specifiche caratteristiche, permettendo differenti applicazioni. Queste caratteristiche

comprendono fra le altre, oltre al tipo di sensore, la risoluzione dell'immagine, il tipo di orbita, dimensione della scena, ecc….

Esistono due categorie di sensori: i sensori passivi e quelli attivi. I primi misurano la quantità di energia elettromagnetica, derivante dal Sole, riflessa dagli oggetti al suolo; alcuni sono anche in grado di catturare l'energia emessa dalla Terra nel campo termico. I secondi emettono essi stessi la radiazione verso la superficie, misurando poi la quantità di energia che viene riflessa.

Una conoscenza di base delle caratteristiche dei dati telerilevati è necessaria per poter capire la loro importanza nelle applicazioni in campo forestale. Attualmente, le due porzioni dello spettro elettromagnetico utilizzate nelle applicazioni forestali di telerilevamento sono: (1) ottico/infrarosso e (2) microonde attive. Delle due, le immagini ottiche/infrarosso sono le più comunemente usate, e verosimilmente lo saranno anche per il futuro.

Esistono altre tipologie di dati con caratteristiche differenti che necessitano di valutazioni specifiche prima di essere usate in applicazioni di questo genere. Ad esempio, le immagini *Lidar* sono l'unico strumento che può "vedere" sia la struttura verticale che orizzontale di una foresta, fornendo informazioni sull'altezza degli alberi, sulla loro età e altri dati sensibili. Ci sono poi le immagini acquisite nella regione del termico, dell'ultravioletto e delle microonde passive che vengono tipicamente usate in applicazioni specialistiche piuttosto che come fonte di informazioni di carattere generale nel campo forestale. In altre applicazioni, questo tipo di dati assume un'importanza assoluta; per esempio, le immagini termiche possono essere utilizzate nella ricostruzione di *pattern* di temperatura superficiale, che per alcuni ambienti boschivi possono essere legati a fattori di stress idrico per la vegetazione e di biodiversità.

2.2.1 Immagini ottiche

Un'immagine, formata dalle osservazioni dei differenti quantitativi di energia derivanti dalle superfici riflettenti, è influenzata dalle caratteristiche tipiche di ogni diversa superficie (come foglie, corteccia, terreno) e da uno

svariato numero di altri fattori, fra cui l'atmosfera terrestre e le superfici adiacenti coinvolte nel processo di formazione dell'immagine stessa.

In generale, i fattori che influenzano il responso spettrale degli oggetti contenuti in una immagine includono:

1. Le proprietà spettrali (energia riflessa, assorbita e trasmessa) del *target* a terra;
2. La geometria di illuminazione, inclusi gli effetti topografici;
3. L'atmosfera;
4. Le proprietà radiometriche del sensore (ad esempio, il rapporto segnale/rumore);
5. Le proprietà geometriche del *target* (ad esempio, inclinazione delle foglie);
6. Le proprietà più specifiche legate allo stato della pianta (fenologico, di salute) e alle sue caratteristiche interne.

2.2.2 Immagini SAR

I principi dell'interazione delle microonde con l'ecosistema forestale sono stati riassunti da *Henderson and Lewis* (*1998*). I sensori SAR sono sensori per il telerilevamento attivi; l'energia a lunghezze d'onda conosciute viene generata e registrata dallo strumento stesso. Di solito, ci si riferisce all'energia raccolta in termini di *backscatter*.

Le lunghezze d'onda usate sono tipicamente lunghe abbastanza da poter attraversare senza alcun impedimento gli strati dell'atmosfera; inoltre, finché è presente la sorgente di illuminazione, questi sensori sono in grado di operare indipendentemente dalla rotazione della Terra.

2.3 RISOLUZIONE E SCALA

La risoluzione è una qualità propria delle immagini satellitari, e ci si può riferire ad essa come alla capacità del sensore di acquisire dati sulle immagini con specifiche caratteristiche.

Le parti di informazione contenute in una immagine satellitare sono immagazzinate in griglie composte da unità chiamate *pixel*. Un *pixel* rappresenta la media dei valori di riflettanza luminosa degli oggetti contenuti in una certa zona a seconda del tipo di sensore usato. Questo significa, ad esempio, nel caso di una immagine *LANDSAT* multispettrale, che un *pixel* rappresenta il valore medio di riflettanza di tutti gli oggetti contenuti in un'area quadrata di $30m$ di lato; nel caso di una immagine *QUICKBIRD* multispettrale, un'area di $2{,}4m$ di lato.

Esistono quattro categorie principali di potere risolutivo applicabili ai sistemi di telerilevamento. Ognuna sarà discussa nelle sezioni seguenti.

2.3.1 Risoluzione Spettrale

I sensori spaziali sono in grado di ricavare informazioni da differenti parti dello spettro elettromagnetico e di immagazzinarle in modo indipendente in unità chiamate bande. La risoluzione spettrale rappresenta, quindi, il numero e la dimensione di intervalli specifici di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico ai quali il sensore è sensibile. Specifici intervalli sono utili per scoprire particolari informazioni biofisiche della superficie; ad esempio, per quanto riguarda la parte visibile dello spettro, le osservazioni della vegetazione nella regione del rosso sono legate al contenuto di clorofilla del target a terra (vedi le foglie degli alberi). Esistono, poi, i sensori iperspettrali in grado di individuare intervalli piccolissimi, dell'ordine di ampiezza da 2 a 4 *nm*.

2.3.2 Risoluzione Spaziale

La risoluzione spaziale (geometrica) è la proiezione dell'elemento rivelatore ("*detector element*"), di solito un sensore *CCD* (*Charged Couplet Devices*), attraverso l'ottica del sensore all'interno del campo di vista istantaneo (*IFOV, Instantaneous Field of View*) dello stesso. In altre parole, la dimensione dell'elemento *CCD* determina la risoluzione spaziale. Essa è la misura della capacità dello strumento di discriminare oggetti diversi nell'immagine. Il dettaglio spaziale in una immagine ottica/infrarosso è funzione dell'*IFOV*, ma

anche del campionamento del segnale, che determina la dimensione del *pixel* nell'immagine risultante.

La differenza di dimensione del *pixel* a terra a seconda dei diversi sensori, implica, ad esempio, che non è possibile distinguere oggetti più piccoli di $900m^2$ usando immagini *LANDSAT* multispettrali, più piccoli di $5{,}76m^2$ nel caso di immagini *QUICKBIRD* multispettrali. In questo modo, più piccolo è il *pixel* che compone una immagine, e più grande sarà la capacità di discriminare un numero sempre maggiore di oggetti. Immagini *LANDSAT* possono portare alla classificazione di oggetti di dimensioni maggiori di $900m^2$ e alla creazione di mappe più piccole o compatibili con una scala $1:50.000$; immagini *QUICKBIRD*, oggetti maggiori di $5{,}76m^2$, e mappe confrontabili con una scala$1:5.000$. Usando immagini *QUICKBIRD* pancromatiche si può arrivare a produrre carte compatibili con una scala $1:2.000$.

2.3.3 Risoluzione Temporale

La frequenza con cui una particolare zona della superficie viene registrata e trasformata in immagine dal sensore è definita risoluzione temporale. La frequenza di registrazione di un'immagine determina la tipologia di cambiamento ambientale individuata dal sensore e la percentuale di cambiamento che può essere stimata. Molti satelliti possono aumentare le loro capacità di analisi della superficie montando a bordo sensori programmabili in grado di "guardare" da entrambi i lati della traiettoria di volo. Questo ha dato il via a considerazioni riguardo a modelli di risposta spettrale angolare (*Diner et al., 1999*).

2.3.4 Risoluzione Radiometrica

La quantità di livelli di energia, contenuti nelle lunghezze d'onda proprie del *target* analizzato, che un sensore riesce a discriminare (cioè a trasformare in numeri) fra un livello massimo e minimo, è una misura della risoluzione radiometrica. Valori più grandi di questa grandezza permettono di discriminare differenze sempre più piccole nel segnale della radiazione. Il segnale viene

"quantizzato" per mezzo di un convertitore analogico/digitale. La quantizzazione determina il numero di *bit* di dati immagazzinato in ogni *pixel* e, inoltre, determina il numero di livelli che possono essere rappresentati nell'immagine.

Perciò, un *pixel*, a seconda del sensore, conterrà un certo ammontare di informazione. Il *pixel* di una banda di una immagine *LANDSAT* contiene *8-bit* di informazione, che rappresentano una possibile variazione di 256 valori. Il *pixel* di una *IKONOS* contiene *11-bit*, che rappresentano una possibile variazione di 2.048 valori. In questo senso, la quantità di informazione immagazzinata in un *pixel* di un certo tipo di immagine satellitare è definita *risoluzione radiometrica*.

2.3.5 Relazione tra scala e risoluzione

Quando si considera il potere risolvente di sistemi di telerilevamento per piattaforme aeree o satellitari occorre fare alcune concessioni. Ad esempio, un aumento nel numero di bande è spesso accompagnato da una diminuzione della risoluzione spaziale. Per acquisire più bande o bande fra loro più vicine, il sensore deve vedere la stessa zona a terra per un periodo di tempo più lungo, e perciò la dimensione dell'area osservata aumenta da una altezza costante. Se dovesse aumentare la risoluzione radiometrica (così da individuare differenze più piccole nel segnale radiante), il dettaglio spaziale, il numero di bande, la vicinanze delle bande, o tutte e tre queste grandezze assieme, si ridurrebbero. Oltre a ciò, la dimensione dell'area a terra (la grandezza del *pixel*) influenzerà la relazione tra gli oggetti nell'immagine e la riflettanza. In altre parole, la quantità di energia disponibile è fissata entro il tempo di integrazione del dispositivo di rilevamento. La costruzione di un sensore si baserà su un giusto compromesso tra risoluzione spettrale (quante energia è divisa in bande spettrali), risoluzione spaziale (quanto grande deve essere l'area usata per "accumulare" energia), e il rapporto segnale/rumore. La divisione dell'energia in troppe bande su una zona troppo piccola, e del segnale entro ogni banda porterebbe ad avere un rapporto segnale/rumore troppo elevato che impedirebbe l'utilizzo delle immagini. Quindi, nella progettazione di un sensore, ciò che dovrebbe essere massimizzato

è l'*SNR* (*Signal-to-noise Ratio*) piuttosto che una qualsiasi delle altre grandezze in gioco.

Spesso, i dati satellitari sono dati a bassa o media risoluzione spaziale; usando la terminologia suggerita da *Strahler et al.* (*1986*), essi sono definiti come "*low*" o "*L-resolution*". In questi casi, gli oggetti su un'immagine sono generalmente più piccoli della dimensione del *pixel*, e, quindi, la riflettanza misurata per quel *pixel* è la somma dei contributi di radianza degli oggetti in esso contenuti. In alcuni studi sui sensori satellitari, la generalizzazione delle caratteristiche propria dei dati a risoluzioni grossolane può essere considerata un vantaggio, almeno fino ad un certo punto, oltre il quale i dati sono troppo generali per l'obiettivo desiderato.

Invece, i dati aerei sono quasi sempre ad alta ed altissima risoluzione spaziale; questi dati sono definiti "*high*" o "*H-resolution*" (*Strahler et al., 1996*). A questa categoria appartengono anche le immagini satellitari ad altissima risoluzione. Di solito gli oggetti sono più grandi della dimensione del *pixel*, e perciò la riflettanza misurata per un certo *pixel* è verosimile che sia correlata direttamente alle caratteristiche dell'oggetto.

L'uso combinato e integrato di immagini ad alta e bassa risoluzione, sebbene implichi una complicazione nelle procedure di analisi, può fornire risultati molto più accurati rispetto all'uso di una singola sorgente di dati. Un approccio multi-risoluzione di questo tipo può produrre un efficace *data set* che può essere scalato a partire da dati a terra fino a livello dell'immagine o da una risoluzione alla successiva.

La scala è un concetto che permea qualsiasi lavoro di monitoraggio, modellazione e misurazione ambientali (*Peterson and Parker, 1998*) ed ha un'implicazione spaziale diretta in telerilevamento. La scala è legata alla risoluzione spaziale ma non è un concetto equivalente. Se la risoluzione fa riferimento al dettaglio spaziale di un'immagine che può essere usato per individuare, mappare o studiare un oggetto, la scala si riferisce sia alla risoluzione che all'area sopra la quale una forma o un processo possono essere individuati, mappati, o studiati.

Quindi, la scala consiste essenzialmente di due aspetti, uno legato alla risoluzione e l'altro all'area coperta, ed entrambi devono essere considerati ogniqualvolta il fattore scala sia di interesse. Di solito per convenzione si dice che:

1. Quando si parla di piccola scala ci si riferisce alla copertura di una vasta area in cui è contenuta una piccola quantità di dettagli (ad esempio, mappe con scala $1:1.000.000$);
2. Quando si parla di grande scala ci si riferisce alla copertura di una piccola area in cui è contenuta una grande quantità di dettagli (ad esempio, mappe in scala $1:1.000$).

Un modo per legare fra loro scala e risoluzione spaziale dell'immagine è dividere in categorie i diversi livelli di risoluzione spaziale delle immagini in base alla scala che meglio definisce o stima i fenomeni ambientali:

- Immagini a bassa risoluzione spaziale: applicazioni ottimali nello di studio di fenomeni con un ordine di grandezza variabile da centinaia a migliaia di metri (piccola scala), supportate da dati *GOES, NOAA AVHRR, EOS MODIS, SPOT VEGETATION, HRV, ASTER* e *LANDSAT*. Esempi dell'utilizzo di tali immagini comprendono la mappatura di oggetti a piccola scala, come tipologie generali di coperture forestali (boschi a conifere, decidui, misti) o caratteristiche abiotiche/biotiche;
- Immagini a media risoluzione spaziale: applicazioni ottimali nello di studio di fenomeni con un ordine di grandezza variabile da qualche decina a un centinaio di metri (scala media), supportate da dati *LANDSAT, SPOT, ASTER, IRS* e aerei. Esempi dell'utilizzo di questo tipo di immagini comprendono la mappatura di oggetti a media scala, come le caratteristiche e le dinamiche delle tessere del paesaggio (*patch*), le specie di alberi, i diametri delle corone, la densità degli alberi, il numero di fusti e la misura dell'indice *LAI* (*Leaf Area Index*);
- Immagini ad alta e altissima risoluzione spaziale: applicazioni ottimali nello di studio di fenomeni con un ordine di grandezza variabile dalla decina di centimetri a qualche metro (grande scala), supportate da dati di

piattaforme di telerilevamento aereo e da immagini satellittari ad altissima risoluzione (in primis *IKONOS* e *QUICKBIRD*). Esempi dell'utilizzo di questo tipo di immagini includono la mappatura di oggetti quali singoli alberi o altri oggetti discreti a terra, assembramenti di strati sottostanti di vegetazione (*understory assemplages*), la struttura della foresta, le coperture boschive (diametri e vicinanza delle corone), il *LAI*, la composizione degli strati sottostanti o l'individuazione si specie rare.

Si vuole osservare, infine, che non sempre il metodo ottimale disponibile per l'identificazione di un fenomeno ad una particolare scala è anche il metodo più accurato possibile. La scelta migliore dei dati telerilevati e dei metodi operativi è una funzione dell'accuratezza (posizionale e tematica) e della scala (risoluzione e dimensioni del progetto), insieme a problemi legati agli operatori (ad esempio, capacità tecniche) e ai costi (esigenze di acquisizione e immagazzinamento dei dati, e quantità di tempo necessaria per le analisi).

2.4 SENSORI E PIATTAFORME AEREE

Una rapida occhiata alla letteratura sul telerilevamento fornisce numerosi esempi sull'uso di una grande varietà di piattaforme aeree (palloni, elicotteri, aeroplani, droni) e sensori, dalle camere analogiche ai sensori *CCD* (*charge-coupled devices*), applicato ai problemi forestali. Una prima rassegna sulle tecnologie disponibili fatta da *Schweitzer* (*1982*) identificò gli scanner multispettrali, i sensori laser aerotrasportati (ai quali oggi ci si riferisce comunemente con il termine *Lidar*) e la fotografia aerea come promettenti strumenti per il monitoraggio ambientale. A questi si aggiunsero in seguito sistemi digitali di riprese video aeree (*Neale and Crowther, 1994*), spettrometria per immagini (*Curran and Kupiec, 1995*), radar ad apertura sintetica (*Dobson 2000*), oltre a numerosi sensori satellitari per il telerilevamento.

Nel campo forestale viene data maggiore importanza alla fotografia aerea, ai sensori digitali multispettrali, al *Lidar* e al telerilevamento radar. Nei paragrafi

seguenti sono analizzate le principali questioni riguardanti i sensori usati in ambito forestale, le loro potenzialità, e i principali metodi di analisi.

2.4.1 Fotografia Aerea

Le fotografie aeree sono largamente impiegate nelle gestione forestale già dagli anni ’40 (*Spurr, 1960*). L’acquisizione delle immagini aeree deve essere pianificata in relazione all’altitudine (scala della carta desiderata), al punto di osservazione (ad esempio, verticale, obliquo), al tipo di camera (ad esempio, metrica, panoramica, di piccolo formato), al filtraggio e al tipo di pellicola. Lo scopo della fotografia è importante; una maggiore qualità e un miglior controllo della fotografia sono necessari per l’inventario delle foreste, quando confrontato, per esempio, con gli aggiornamenti cartografici forestali (*Gillis and Leckie, 1996*). Il progresso nelle scienze fotografiche ha permesso continui miglioramenti nella tecnologia delle camere aeree, nella velocità del *film*, nel contrasto, nella risoluzione, nel processammento e nel tempo di esposizione. Fotografie aeree a valenza metrica, in bianco e nero, a colori e all’infrarosso, vengono acquisite ripetutamente per zone boschive molto estese, con diversi valori di scala, in supporto ai progetti e alle operazioni di *management* forestale (ad esempio, mappe forestali, rilievi catastali, inventario forestale, localizzazione delle infrastrutture, ecc…).

L’interpretazione delle immagini aeree, e in questo caso si parla di “fotointerpretazione”, fa affidamento alla valutazione di tipo deduttivo e induttivo dei *pattern* delle foto aeree. L’approccio “fotomorfico” è la base per la costituzione della maggior parte delle mappe di uso e copertura del suolo e di inventario forestale; gli analisti identificano oggetti o aeree delineandone le caratteristiche distintive quali tono, tessitura, *pattern*, dimensione, ombre, posizione nello spazio, forme, o relazioni. Di solito, viene utilizzato un approccio di tipo gerarchico nell’organizzazione delle informazioni interpretate; i tipi di coperture sono separati; gli oggetti familiari sono individuati una volta che il fotointerprete passa da configurazioni note a sconosciute e dal generale al particolare. Successivamente, le diverse zone sono suddivise in unità più piccole,

e contrassegnate in accordo al livello di dettaglio desiderato o ottenibile dalla data risoluzione dell'immagine. Il prodotto finale dell'interpretazione fotomorfica di un ecosistema forestale vorrebbe essere un *"forest stand"* identificato ed etichettato (di solito) per mezzo di un esauriente sistema di classificazione basato sulla composizione e densità delle specie, sull'altezza delle coperture, e su classi di età.

Se, fino a qualche anno fa, le fotografie aeree rappresentavano lo strumento che offriva la miglior combinazione di caratteristiche, oggi, la disponibilità sempre maggiore di immagini digitali multispettrali ad altissima risoluzione, anche inferiore al metro, provenienti sia da piattaforme aeree che satellitari, rappresenta una valida alternativa alla tecnologia su *film* nel campo della gestione forestale.

2.4.2 Camere aeree digitali

Attualmente esistono e vengono sviluppati numerosi tipi di camere digitali che possono essere usate in supporto ad applicazioni forestali, operative e di *management*.

Rispetto alle classiche camere analogiche, le camere digitali semplicemente rimpiazzano l'emulsione fotografica della pellicola con una matrice di microsensori immersi in un materiale di substrato come il silicio. I fotoni incidenti eccitano gli elettroni in ogni microsensore. La carica risultante può essere convertita in un segnale analogico, in misura direttamente proporzionale alla radiazione incidente. Il segnale viene digitalizzato all'interno del sistema e reso disponibile in diversi formati. Le camere aerofotogrammetriche digitali a *CCD* oggi utilizzate sono in genere del tipo multi-cono o a sensori lineari (*Galetto, R., 2004*). Nella camera digitale i sensori *CCD* possono acquisire immagini con una risoluzione radiometrica fino a 12 bits per canale, corrispondenti a 4096 livelli rispetto ai 256 delle tradizionali immagini ad 8 bits, normalmente derivate per scansione dei fotogrammi aerei. Un'altra qualità dei sensori *CCD* è di avere un rapporto segnale rumore ed una linearità di risposta migliore rispetto alle pellicole fotografiche. Questo si traduce in un miglior

dettaglio e chiarezza anche in condizioni di scarsa illuminazione o di zone in ombra (*Casella et al., 2004*).

Le immagini digitali mantengono inalterata la gamma delle tonalità cromatiche originali, mentre le pellicole fotografiche sono sottoposte a processi chimici di sviluppo e di scansione con una conseguente perdita di qualità; inoltre, non sono affette da problemi derivanti da polvere, graffi, ecc., che affliggono tipicamente le immagini digitali scansionate a partire da fotografie su supporto cartaceo.

La capacità delle camere digitali di fornire anche immagini nell'infrarosso le rende di grande interesse per le applicazioni nello studio e monitoraggio dell'ecosistema forestale.

Le camere aeree digitali, che lentamente andranno a rimpiazzare le camere a *film*, consentono quindi di avere immediatamente a disposizione il dato per una elaborazione su stazione fotogrammetrica digitale (anche se alcune, per la particolare geometria e formazione dell'immagine richiedono *software* specifici di trattamento). Se ne possono ricavare i prodotti tipici della fotogrammetria, con tempi di elaborazione molto ristretti quando si possono usare procedure matematiche (ad esempio, *DSM* delle coperture delle chiome) e si ha in aggiunta la possibilità di visualizzazione nativa in falso colore o di classificazione basata sull'infrarosso.

2.5 SENSORI E PIATTAFORME SATELLITARI

I principali sensori e piattaforme satellitari utilizzati in molteplici applicazioni, fra le quali la gestione sostenibile delle foreste, sono elencati nella tabella 2.1.

Caratteristiche dei principali sensori satellitari usati in ambito forestale				
Piattaforma	**Sensore**	**Numero di Bande**	**Risoluzione Spaziale (m)**	
Landsat-5	TM	7	30–120	
	MSS	4	82	
Landsat-7	ETM+	1pan, 7ms	15–30	
SPOT-1,2,3	HRV	1pan, 3ms	10–20	
SPOT-4	HRV	1pan 4ms	10–20	
	VEGETATION1	4	1000	
SPOT-5	2HRG	2pan, 3ms, 1swir	5(2.5)-10-20	
RESURS-01-3	MSU-KV	5	170–600	
IRS-1B	LISS	4	36–72	
IRS-1C,-1D	LISS	4	23–70	
	PAN	1	5.8	
	WiFS	2	180	
IRS-P4 (Oceansat)	OCM	8	360	
JERS-1	VNIR,SWIR	8	20	
	SAR	1	18	
Radarsat-1	SAR	1	8–100	
ERS-1,-2	AMI(SAR)	1	26	
	ATSR	4	1000	
Space Imaging	IKONOS-2	5	1–4	
NOAA-K(15)-L(16)-M(17)-N(18)	AVHRR/3	6	1300	
Orbview-2 (Seastar)	SeaWiFS	8	1130	
CBERS-1-2	*CCD*	5	20	
	IRMSS	4	80–160	
	WFI	2	260	
Terra (EOS AM-1)	ASTER	14	15, 30, 90	
	MODIS	36	250, 500, 1000	
	MISR	4	275	
Earthwatch	Quickbird	4	0.6–2.4	
Orbview-3	Orbview	4	1–4	
IRS-Resourcesat-1	LISS III	4	23.5	
	LISS IV	3	5.8	
	AWiFS	4	56-70	
IRS-Cartosat-1	Pan Stereo	1	2.5	
	VEGETATION2	4	1000	
KVR-1000	Camera	1 pan	2	
TK350	Camera	2 pan stereo	10	
EO-1	Hyperion	220	30	
		1pan, 10ms	10-30	
Kompsat	EOC	1pan	6.6	
	OSMI	6ms	1000	
ALOS	PRISM	1pan	2.5	
	AVNIR-2	4	10	
	PALSAR	1(L-band)	10-100	
Envisat-1	ASAR	1(C-band)	30	
	MERIS	15	1040x1200, 260x300	
EROS-A	Pan	1	1.9	
EROS-B	Pan	1	0.7	

Aqua(EOS PM-1)	MODIS	36	250-500-1000	
MTI	MTI	15	5-20	
Caratteristiche dei principali sensori satellitari di prossima attivazione				
Piattaforma	**Sensore**	**Numero di Bande**	**Risoluzione Spaziale (m)**	**data prevista di lancio**
NOAA-N'	AVHRR/3	6	1300	Dicembre 2007
TerraSar-X	SAR	1	1-16	Febbraio 2007
Radarsat-2	SAR	1(C-band)	3-100	Marzo 2007
Orbview-5	Orbview	4	0.4-1.6	2007
CBERS-3-4	PANMUX	4	5-10	2008-2010
	MUXCAM	4	20	
	IRMSS	4	40-80	
	WFICAM	4	73	
LightSAR	SAR	1(L-band)	3-100	???
NEMO	COIS	210	30-60	???
	PIC	1pan	5	???

Tabella 2.1: principali sensori e piattaforme satellitari.

Molti sistemi forniscono osservazioni da un solo sensore o nella porzione ottica dello spettro (ad esempio, *LANDSAT*, *SPOT*, *IRS*) o nella porzione delle microonde (ad esempio, *Radarsat*, *ERS-1*). La scelta della tipologia di piattaforma/sensore per le applicazione in ambito forestale si è limitata nel passato all'uso di pochi satelliti con caratteristiche simili nel campo ottico o delle microonde dello spettro elettromagnetico. Oggi, in seguito al numero sempre maggiore di satelliti presenti, caratterizzati da sensori con diverse caratteristiche, è possibile distinguere quattro gruppi di strumenti:

1. Sensori tipo *LANDSAT;*
2. Sensori iperspettrali;
3. Sensori ad altissima risoluzione;
4. Sensori radar.

Della prima categoria fanno parte fra gli altri i satelliti *LANDSAT*, *SPOT*, *IRS;*la seconda comprende le piattaforme della serie *EOS* e l'*Orbview 4*, mentre nella terza rientrano i satelliti *QUICKBIRD* ed *IKONOS* La quarta raggruppa i satelliti *ERS* dell'agenzia spaziale europea e i *Radarsat* dell'agenzia spaziale canadese, e altri diverse piattaforme.

2.6 LIMITI GENERALI NELL'ACQUISIZIONE DI DATI AEREI E SATELLITARI

Una possibile limitazione all'utilizzo del telerilevamento in ambito forestale può essere rappresentata dall'incapacità, o dalla non volontà, degli enti preposti di capire i vantaggi che questa nuova tecnologia può offrire nella gestione delle dinamiche territoriali. Volendo fare un esempio, si prenda in considerazione l'aumento della copertura nuvolosa del globo negli ultimi 30 anni, che ha rappresentato e rappresenta una limitazione alla diffusione delle applicazioni di telerilevamento in ambito forestale. La copertura nuvolosa rappresenta uno dei maggiori ostacoli in molte aree del mondo. Ma per molte di queste, esistono centinaia di migliaia di immagini raccolte in numerosi archivi di dati telerilevati; ad esempio, era possibile creare un data set *LANDSAT* libero da nuvole per l'intera area amazzonica del Brasile (*Skole and Tucker, 1993*). *Kuntz* e *Siegert* (*1996*), lavorando sulla regione Est del Kalimantan, trovarono che tutte le immagini *LANDSAT* e *SPOT* esistenti della zona in esame erano caratterizzate da gravi problemi di copertura nuvolosa. Per questo, decisero di utilizzare una serie di fotografie *KFA1000* della stazione spaziale *MIR* insieme a dati *SAR ERS-1*. Escludendo le aree caratterizzate da pendii troppo ripidi, essi riuscirono a riconoscere e classificare 5 tipologie di foreste, adatte per lo sviluppo di un primo inventario forestale.

In tali regioni, risulta operativamente pratico l'uso di immagini satellitari a microonde quando i dati ottici non sono disponibili, o quando la copertura nuvolosa ne impedisce l'utilizzo (*Fransson et al., 1999*).

Esistono alcune limitazioni all'utilizzo di dati telerilevati, limitazioni che vanno oltre l'acquisizione dei dati, il loro prezzo, e le questioni legate al tipo di sensore, e che derivano principalmente dai problemi infrastrutturali che gli utenti incontrano durante l'acquisizione e l'utilizzo dei dati.

La prima di queste, e forse la più ovvia, è legata alla componente base delle immagini digitali, ossia il *pixel* (una funzione del campo di vista istantaneo del sensore, dell'elettronica, e delle condizioni ambientali). Risulta complesso trovare il giusto compromesso fra il livello di dettagliato dei dati da acquisire (in

termini di risoluzione) e l'estensione della zona di interesse; la scelta della dimensione del *pixel* è strettamente legata agli obiettivi che ci si è prefissati. Connessi a questi problemi di grandezza del *pixel* e scala ci sono quelli legati agli altri tipi di risoluzione: risoluzione spettrale (il numero di bande è adeguato?); risoluzione radiometrica (giusta sensibilità agli oggetti di interesse?); risoluzione temporale (è attuabile la ripetizione della copertura?). Bisogna comunque osservare che spesso non è possibile avere a disposizione i dati migliori per l'analisi, e di conseguenza si procede con il materiale che si riesce a recuperare.

La seconda limitazione è legata all'efficienza della strumentazione e dei metodi usati per estrarre informazioni utili dai dati telerilevati. Anche nell'ipotesi di poter determinare la giusta dimensione del *pixel* e un numero utile di bande, la cosa più importante è riuscire a definire "*procedure di analisi soddisfacenti, ripetibili e rigorose*" (*Landgrebe, 1997: p.866*).

Il continuo proliferare di nuovi satelliti e piattaforme aeree, con il conseguente aumento della quantità di informazioni disponibili, aiuta ad individuare la terza limitazione nell'acquisizione dei dati telerilevati, ovverosia la disponibilità di analisti di telerilevamento qualificati ed esperti in grado di gestire tali dati.

La chiave di sviluppo per il prossimo futuro si trova, quindi, nel continuo miglioramento della capacità, umane e tecnologiche, di estrarre informazioni utili dai dati disponibili, da utilizzare nelle diverse applicazioni esistenti.

3 PROCESSAMENTO DELLE IMMAGINI

3.1 EFFETTI RADIOMETRICI E RISPOSTE SPETTRALI

E' ben noto che la risposta spettrale dei dati acquisiti da sensori terrestri (*Taylor 1993*), aerei (*King, 1991*) e satellitari (*Teillet, 1986*) è influenzata da una serie di fattori georadiometrici legati alla tipologia del sensore e alle caratteristiche della scena.

Si possono individuare tre tematiche principali in merito a questa problematica:

1. L'influenza dei termini radiometrici (ad esempio, le funzioni di risposta del sensore);
2. L'influenza delle componenti atmosferiche, di solito approssimate con dei modelli;
3. Le proprietà di riflettanza dei *target.*

Nelle immagini ottiche i principali fattori di interesse riguardano l'atmosfera, la geometria di illuminazione (inclusi la topografia e l'angolo di visuale) e le caratteristiche del sensore (inclusi effetti di "rumore" e di funzioni di dispersione del punto). Nelle immagini *SAR*, ad esempio, gli effetti dominanti riguardano le caratteristiche del sensore e la topografia. Quando si considera la risposta spettrale di un singolo *pixel* come fonte principale di informazioni in una procedura di "*image analysis"*, una differenza di illuminazione dovuta ad effetti topografici, atmosferici o di angolo di visuale, può portare ad errori di interpretazione riguardo alle proprietà spettrali della superficie analizzata.

In alcuni casi, immagini non corrette possono essere virtualmente inutilizzabili a causa della difficoltà nel classificarle o nell'usarle per ricavare

parametri fisici della superficie; ma non necessariamente devono essere corrette per tutti i tipi di influenze e per ogni tipo di applicazione. In molti casi, le immagini si possono utilizzare così come sono, corrette, ad esempio, solo internamente, con i coefficienti di calibrazione, ai valori di radianza al sensore (*Wolter et al., 1995*). L'utilizzo di valori in termini di radianza al sensore o di *Digital Numbers* (*DN*) è equivalente nella maggior parte degli studi statistici o di classificazione; riscalare i dati attraverso dei coefficienti lineari non altererà il risultato finale. Anche in analisi multitemporali, quando si assume che le differenze di risposta spettrale nelle classi caratterizzino in maniera dominante i dati delle immagini (ad esempio, mappatura delle aree disboscate mediante dati *LANDSAT*; oppure mappatura delle zone colpite da eventi catastrofici), può non essere necessario applicare alcuna calibrazione radiometrica (*Cohen et al., 1998*).

Le correzioni geometriche riguardano, invece, la capacità di assegnare la posizione dei *pixel* nell'immagine ad un sistema di coordinate a terra, in un preciso sistema di riferimento spaziale.

In generale, quando si parla di tecniche di correzione ci si riferisce a elaborazioni di tipo radiometrico e geometrico sulle immagini, in quanto l'obiettivo è ridurre o rimuovere influenze interne od esterne sui dati telerilevati in modo da renderli il più possibile correlati con le proprietà spettrali dei *target* nell'immagine.

3.1.1 Processamento radiometrico delle immagini

I moderni sistemi di elaborazione delle immagini di solito contengono algoritmi specifici per rimuovere o ridurre l'influenza degli effetti atmosferici e topografici, in modo da preparare le immagini alle successive procedure di analisi, come la classificazione, le analisi di raggruppamento (*cluster analysis*), le procedure di segmentazione, la stima degli attributi forestali, e così via. L'obiettivo è sviluppare metodologie, empiriche o rigorose, di correzione per rimuovere gli errori dovuti al sensore (ad esempio, variazioni dell'angolo di visuale) e ambientali (ad esempio, differenza di illuminazione dovute ad effetti topografici, assorbimento atmosferico e diffusione (*scattering*).

Le correzioni radiometriche, solitamente, implicano la conversione dei valori di radianza in valori di riflettanza attraverso modelli atmosferici e di illuminazione. Lo scopo di una correzione radiometrica della scena analizzata è derivare internamente per ogni banda misure coerenti di riflettanza spettrale a partire dai valori osservati di radianza nella parte ottica dello spettro (*Smith and Milton, 1999*).

Uno dei modelli atmosferici più semplici consiste nel mettere in relazione le informazioni contenute nell'immagine con dei riflettori pseudo-invarianti, come, ad esempio, laghi profondi e scuri, o tetti/asfalti scuri. Questa procedura, chiamata procedura di sottrazione dell'oggetto scuro (*Campbell and Ran, 1993*) permette di eliminare solamente i componenti additivi degli effetti atmosferici.

Bisogna ricordare, comunque, che i modelli implementati nella maggior parte dei moderni *software* sono spesso modelli semplificati e standard, e per questo motivo la presenza, ad esempio, di nuvole fini, fumo, foschia può confondere l'algoritmo usato in quanto l'influenza di questi particolari effetti atmosferici non è stata prevista nella costruzione del modello.

Riguardo all'influenza della topografia della superficie, il suo effetto è di alterare le proprietà geometriche dell'immagine e di influire anche sull'illuminazione e la riflettanza degli oggetti che si trovano nell'area rappresentata. Tutto ciò e dovuto alla varietà dei rilievi presenti e di conseguenza al diverso angolo con cui la luce colpisce gli oggetti che costituiscono il territorio rappresentato nell'immagine. Questo effetto è stato definito come la variazione di radianza di superfici inclinate rispetto a superfici orizzontali, funzione dell'orientamento della superficie in relazione alla posizione della sorgente di luce e del sensore (*Holben and Justice, 1980*).

Nella realtà, la presenza di questi ostacoli può diventare un aiuto nell'interpretazione manuale e automatica delle immagini; per esempio, la tenue sfumatura che si crea a causa delle differenti condizioni di illuminazione su ciascuno dei lati di un crinale topografico può servire ad identificare un modello geologico e ad applicare tecniche di analisi di immagine. L'uso di immagini satellitari stereoscopiche per la creazione di un *DEM* (*Digital Elevation Model*) è

basata largamente sulla presenza di diversi effetti topografici nelle due immagini acquisite sulla stessa area da diverse posizioni del sensore.

Per correggere queste distorsioni, viene applicata una tecnica chiamata correzione topografica. Oltre all'uso del *DEM*, è necessario avere informazioni sul sensore e sulla posizione del sole nel momento in cui l'immagine è stata presa. Come risultato si ha un'immagine che, a prescindere dalle variazioni nei rilievi, mostrerà per certe tipologie di oggetti all'incirca gli stessi valori di *DN*, indipendentemente dalla loro posizione spaziale.

Questa procedura non vale per tutti i tipi di coperture, e in particolare per quelle foreste costituite da alberi con proprietà geotropiche (*Gu and Gillespie, 1998*). Nelle foreste, le principali differenze di illuminazione tra alberi che crescono su pendii e su superficie piane stanno nella quantità di corone illuminate dal sole e corone in ombra visibili al sensore, piuttosto che nel valore predetto sulla base delle caratteristiche di pendenza del terreno sottostante.

Probabilmente, il metodo migliore per prendere in considerazione l'effetto topografico consiste nell'usare insieme al *DEM* anche informazioni di tipo spettrale: l'obiettivo è di incorporare effetti georadiometrici indesiderati, come quello topografico, all'interno di un processo di classificazione di tipo decisionale.

Per quanto riguarda gli effetti dovuti all'angolo di visuale, questi sono meno evidenti nei dati satellitari che in quelli aerei, a causa del più ampio *range* di posizioni di osservazione che i sensori aerei possono supportare. In alcuni casi, l'effetto è evidente anche nei sensori satellitari, soprattutto per sistemi grandangolari o "puntabili" (*pointable*) come *SPOT* (*Muller, 1993*), *AVHRR* (*Cihlar et al., 1994*), *SPOT VEGETATION* (*Donoghue, 1999*), o il sensore *EOS MODIS* (*Running at al., 2000*). In questi casi, l'effetto dell'angolo di visuale può "mascherare" o impedire l'estrazione delle informazioni come accade tipicamente nel caso di dati aerei "*single pass*". Questa condizione peggiorerà più gli angoli di visuale saranno grandi e più la risoluzione delle immagini sarà elevata.

L'entità di questo effetto dipenderà da:

1. La geometria del sensore – ad esempio, le dimensioni dei *pixel* e la loro sovrapposizione in relazione alle sorgenti di illuminazione;
2. La geometria del *target* – ad esempio, la variabilità delle diverse caratteristiche della superficie visibile al sensore.

Come nel caso degli effetti topografici, in alcuni casi anche l'effetto dell'angolo di visuale può aiutare ad interpretare un'immagine: ad esempio, immagini non nadirali valorizzano il contenuto informativo e migliorano i risultati di diversi rapporti tra bande multispettrali quando si vogliono discriminare le coperture forestali e ricavare l'indice *LAI* (*Gemmel and McDonald, 2000*).

Generalmente questo effetto, soprattutto nel caso di immagini "*single-pass*" o di procedure di composizione e mosaicatura, è considerato un impedimento per l'analisi e la classificazione dell'immagine.

Fortunatamente, nella maggior parte dei casi, esso è all'incirca additivo nelle diverse bande e perciò può essere eliminato attraverso semplici procedure di processamento di immagini, come, ad esempio, il rapporto tra bande.

3.2 GEOCODIFICA, ORTORETTIFICA E MOSAICATURA DELLE IMMAGINI

Affinché le immagini satellitari possano venir integrate in un sistema di informazione geografica (*GIS, Geographical Information System*) – o ancora essere in grado di rappresentare la realtà in modo adeguato, ovverosia mantenendo le relazioni di proporzione fra ciò che si vede nella realtà e il corrispondente rappresentato nell'immagine – esse necessitano di "essere inserite nella realtà". Questo processo è chiamato georeferenziazione ed implica la registrazione dell'immagine ad un sistema di coordinate di riferimento insieme ad una procedura di ricampionamento. Molte descrizioni dettagliate in merito a questo argomento si possono trovare in diversi libri che trattano di telerilevamento (*Mather, 1987, Lillesand and Kiefer, 1994, Bähr and Vögtle, 1998, Richards and Jia, 1998*).

Il processo di georeferenziazione comincia con la definizione di punti di controllo a terra (*GCP, Ground Control Points*) con precise coordinate geografiche. Questi punti si possono ottenere da immagini o foto aeree su cui è già definito un sistema di rifereminto o da punti definiti sul terreno attraverso l'uso di un *GPS* (*Global Positioning System*). Di solito si cercano oggetti facilmente identificabili, come intersezioni di strade o angoli di edifici. L'accuratezza nella scelta di questi punti definirà la precisione dell'immagine georeferenziata. In questo modo, ad esempio, l'uso di un'immagine a bassa risoluzione come base per l'identificazione di punti al fine di georeferenziare un'immagine ad altissima risoluzione, produrrà un'immagine con la stessa precisione dell'immagine di riferimento.

Il processo di individuazione dei punti di riferimento è interattivo: una volta definito un punto di riferimento questo viene cercato nell'immagine da georeferenziare. I *software* in commercio di solito mostrano il livello di errore associato ad ogni punto, indice della precisione nella scelta del punto stesso, guidando in questo modo l'operatore nel processo di posizionamento dei punti. Una volta definiti tutti i punti, attraverso l'uso di *tool* dedicati che adattano l'immagine ai vari punti, questa viene georeferenziata sulle nuove coordinate.

Quando un'immagine rappresenta un porzione di territorio caratterizzata da molte "rugosità", come una regione montuosa, essa è caratterizzata da distorsioni, dovute appunto al fatto di riportare sul piano dell'immagine un oggetto, la zona montuosa, che non è piano. Queste distorsioni possono essere eliminate rettificando l'immagine attraverso l'introduzione di informazioni di tipo altimetrico. Quando il processo di georeferenziazione è accompagnato dall'inserimento di informazioni altimetriche prende il nome di processo di ortorettifica.

L'immagine ortorettificata è esente da tutti i vari tipi di deformazione dovuti alla proiezione centrale con cui un'immagine viene normalmente presa e dagli effetti dell'altimetria; perciò può essere utilizzata a fini metrici.

L'informazione altimetrica può essere ricavata, ad esempio, da un *DTM* (*Digital Terrain Model, Modello Digitale del Terreno*), che altro non è che una

rappresentazione digitale – numerica o discreta – dell'altimetria della superficie terrestre. Il *DTM* può essere sviluppato partendo da curve di livello in formato vettoriale come pure da punti presi direttamente sul campo con coordinate geografiche e informazione sulla quota prese con un *GPS*. La precisione del *DTM* influenzerà la precisione finale dell'immagine ortorettificata. Così se si lavora con un'immagine ad 1 metro di risoluzione e si utilizzano per l'ortorettifica curve di livello a 10 metri, l'immagine finale mostrerà errori nella rappresentazione del terreno all'interno dell'ampiezza dell'informazione altimetrica (*Krauss, 1994*).

Quando una zona è rappresentata da una serie di immagini, se si vuole avere una sua visione d'insieme è necessario, una volta ortorettificate le immagini, "unirle" assieme attraverso il procedimento denominato mosaicatura, che porta alla creazione di un'unica ortofoto rappresentante, appunto, l'intera area oggetto di studio

Esistono diverse tecniche, implementate nei moderni software, per la produzione dell'ortofoto finale, che permetto di minimizzare le differenze di colore, luminosità e contrasto esistenti tra le singole immagini che devono essere mosaicate. Il passo successivo consiste nello scegliere i criteri secondo cui attribuire i valori ai *pixel* delle aree di sovrapposizione delle ortofoto. Questa scelta incide notevolmente sulla validità della mosaicatura in quanto permette di collegare i fotogrammi senza che si noti il passaggio dall'uno all'altro. I metodi si dividono essenzialmente in due categorie: quelli che assegnano il valore di una delle immagini sovrapposte e quelli che effettuano operazioni di media, più o meno pesata, dei valori di tutti i *pixel* (*Giorgini, 2006*).

3.3 ESTRAZIONE DELLE INFORMAZIONI

Nelle applicazioni di gestione sostenibile delle foreste, si possono identificare tre diverse tipologie di informazioni telerilevate di interesse:

1. Informazioni sulle variabili forestali continue (ad esempio, stima della risposta spettrale quando le corone degli alberi si toccano o l'indice *LAI*);

2. Informazioni sulla classificazione delle foreste (ad esempio, suddivisione delle risposte spettrali in classi di copertura);
3. Informazioni su differenze o cambiamenti nell'ecosistema forestale (ad esempio, differenze nella risposta spettrale, chiusura delle corone, variazioni di classi nel tempo).

Ognuno di questi tipi di informazione può essere usato dagli addetti ai lavori in numerosi modi, ma per prima cosa occorre estrarre le risposte spettrali dalle immagini e, usando tecniche di analisi di immagine, interpretarle e convertirle in uno dei tre tipi di informazioni sopra elencati.

3.3.1 Classificazione delle immagini

Il processo di acquisizione di informazioni da immagini satellitari o aeree è chiamato *classificazione* (*Lillesand and Kiefer, 1994*). Classificare significa cercare, per mezzo di tecniche automatiche, semi-automatiche o manuali, di associare i *pixel* di una immagine a determinate classi di copertura del suolo con l'obbiettivo di creare una specie di mappa tematica.

La classificazione implica necessariamente una semplificazione di ciò che viene osservato in un'immagine. Ad esempio, una classe rappresentante l'urbanizzato raggruppa entità dalle caratteristiche molto diverse fra loro: abitazioni grandi e piccole, strade, condomini e così via. Sebbene siano differenti, tutti fanno parte del gruppo più grande che li contiene.

Esistono due metodi di classificazione di una immagine. Il primo, più diffuso e in genere maggiormente preciso, è l'interpretazione visiva. In base a questa tecnica il fotointerprete identifica nell'immagine gli *standard* di colore, tessitura (*texture*), struttura, forma e altri, e li unisce a formare classi prestabilite andando a digitalizzare direttamente sull'immagine i poligoni corrispondenti. Il secondo è la classificazione automatica che attraverso l'uso di specifici algoritmi cerca di definire dal punto di vista matematico le caratteristiche identificative delle classi di copertura nell'immagine.

L'interpretazione visuale consiste in varie tecniche per la valutazione di tutti quegli aspetti che possono facilitare la classificazione di immagini da parte

del fotointerprete. I metodi e le strategie adottati per determinare un certo gruppo di classi, indipendentemente dalla solida base tecnologica che implica l'utilizzo degli strumenti del telerilevamento, sono da considerarsi molto soggettivi, vale a dire, "*molto simili all'arte"* (*Patterson and Jensen, 1998*).

Oltre ad essere il metodo più diffuso, l'interpretazione visuale permette di ottenere anche i migliori risultati in termini di accuratezza e precisione, sostanzialmente grazie alla capacità umana di distinguere le diverse tipologie di copertura. D'altro canto il processo è molto lento in quanto ogni parte dell'immagine deve essere analizzata individualmente, e a causa delle dimensioni della zona da classificare può diventare molto dispendioso sia in termini di tempo che di denaro.

Durante gli ultimi anni i sistemi di classificazione automatica delle immagini hanno usato *software* sempre più "intelligenti", basandosi sulle informazioni spettrali contenute nei *pixel* per eseguire il processo di classificazione. La classificazione automatica è molto efficace quando si ha a che fare con grandi aree e si ha bisogno di risultati nel minor tempo possibile e a costi relativamente bassi.

Esistono due tipi d procedure di classificazione: la classificazione non-supervisionata, con la quale il *software* costruisce gruppi (*clusters*) di *pixel* dalle caratteristiche simili che rappresentano le classi di copertura, sulla base dei valori di riflettanza di ciascuno di essi; la classificazione supervisionata, per cui l'utente definisce a priori dei *training sites*, cioè gruppi di *pixel* che rappresentano una determinata categoria di interesse, dai quali il *software* ricava una firma spettrale della classe corrispondente e dal confronto, sulla base di criteri predefiniti, di tutti i *pixel* dell'immagine con le varie firme create assegnerà un *pixel* ad una classe o ad un'altra.

La creazione di *samples* o *training sites* e la valutazione della loro capacità di distinguere una classe sono possibili grazie all'uso dei moderni *software* che implementano strumenti come la verifica della separabilità delle diverse firme spettrali, l'analisi degli istogrammi delle firme, le analisi statistiche, ed altri strumenti.

I *samples* usati per motivare una classificazione basata sui *pixel* sono prodotti usando verità sul campo, ottenute o da altre classificazioni prodotte dall'interpretazione visuale o direttamente a terra usando un sistema *GPS* o ancora da foto aeree.

A partire dalle immagini originali è possibile produrre diversi indici per classificare o suddividere certe classi che non sono chiaramente distinguibili usando solamente l'informazione spettrale ottenuta dai *pixel* nelle varie bande. Questi indici producono nuove immagini che possono essere integrate come bande nell'immagine originale o usate come "maschere". Una classificazione con due sole classi, ad esempio, foresta e non-foresta, può servire come maschera per un'immagine che ha un indice di vegetazione, e da questa maschera analizzare le variazioni nella vegetazione permettendo l'identificazione di sotto-classi.

La classificazione basata sui *pixel* ottiene ottimi risultati con immagini che hanno una risoluzione superiore almeno a $20m$, come *LANDSAT* e *SPOT*. In questo caso, il ruolo del tecnico addetto al processo di classificazione coinvolge la produzione dei *samples* e la verifica matematica, grazie alle funzioni messe a disposizione dal *software*, della capacità di distinguere le diverse firme spettrali.
Gli strumenti più recenti e diffusi che permettono la classificazione automatica delle immagini digitali si basano fondamentalmente sull'informazione contenuta nel *pixel*.

Un altro sistema di classificazione automatica basato su gruppi di *pixel* pre-combinati, chiamato classificazione ad oggetti, viene applicato soprattutto alle immagini ad altissima risoluzione. Tale processo che organizza insieme i *pixel* è chiamato segmentazione (*Marr, 1982*).

Il processo di segmentazione può veramente semplificare la complessità dell'informazione contenuta nel *pixel*, specialmente nel caso di immagini ad altissima risoluzione spaziale e radiometrica (*Smith and Hoffmann, 2001*).
Nel 1999, uscì in commercio un nuovo *software* che permetteva di produrre un ambiente totalmente composto da oggetti, con l'obiettivo di avvicinare il processo di classificazione alla capacità umana di identificare automaticamente le entità visibili in una immagine. Questo *software,* chiamato *eCognition*, "ridusse

le distanze" fra quello che si vede in una immagine e come questo debba essere classificato. Il programma crea un ambiente multi-segmentato in cui l'interprete può manipolare o identificare ciò che intende classificare per mezzo di un insieme di algoritmi e funzioni di classificazione e determinare con accuratezza e flessibilità le caratteristiche descrittive di una classe.

Il sistema si basa non più sul *pixel* ma su gruppi di *pixel*, chiamati oggetti, in modo analogo ad una rappresentazione vettoriale in un ambiente *GIS*, fra i quali è possibile definire, ad esempio, relazioni di distanza, di area e di prossimità da utilizzare come elementi da inserire nella descrizione di una classe. Le informazioni spettrali non si riferiscono più al singolo *pixel* ma rappresentano il valore medio di tutti i *pixel* che compongono un oggetto.

La descrizione di una classe nell'ambiente ad oggetti di *eCognition* si basa su una logica di tipo *fuzzy* che implica il concetto di "essere" o "non essere" qualche cosa, così che valori molteplici "nascono" all'interno di una scala da 0 a 1, dove 0 significa "non appartiene alla classe" e 1 "appartiene alla classe".

Una funzione di tipo *fuzzy* permette di integrare valori su scale differenti. In questo modo, ad esempio, la descrizione di una classe può seguire le seguenti regole: gli oggetti che hanno un'area maggiore di $200m^2$ e con valori spettrali nella banda del vicino infrarosso minori di 12 verranno classificati come appartenenti ad una determinata classe.

Il sistema di classificazione basato sui *pixel* quando è applicato ad immagini ad altissima risoluzione mostra risultati non soddisfacenti, dovuti in particolar modo alla difficoltà di definire i *samples* e le funzioni matematiche per la descrizione e distinzione delle classi. Un solo *sample* di una classe contenente 30-40 *pixel*, per esempio, mostra una grande variazione interna, rendendo difficoltosa la creazione di firme spettrali che possano descrivere una certa classe. Le immagini ad altissima risoluzione classificate con questa metodologia tendono a mostrare *pixel* isolati classificati come appartenenti ad una classe chiaramente inserita in un'area che rappresenta un'altra classe (*Blascheckt and Strobl, 2001*). Questo problema compare anche in immagini a medio-alta risoluzione, ma usando tecniche di filtraggio è possibile eliminare i *pixel* isolati

inserendoli nella classe più verosimile. A causa del basso livello di dettaglio nelle classificazioni prodotte da immagini *LANDASAT* o *SPOT* questo processo non va a compromettere l'accuratezza globale della classificazione. Invece, in una immagine ad altissima risoluzione in cui è possibile individuare visivamente gli oggetti come case o alberi isolati questo processo di filtraggio si rivela essere poco adatto, causando una generale perdita di informazione.

In un ambiente oggetto di segmentazione è possibile classificare oggetti a diversi livelli di dettaglio e costituire una gerarchia di classi che, in accordo alla dimensione media dell'oggetto in un determinato livello di segmentazione, permette la definizione di classi generali (*parent class*), caratterizzate da oggetti più grandi, e classi più specifiche (*child class*), otto-classi delle prime, caratterizzate da oggetti più piccoli.

3.3.2 Stima dell'accuratezza

Con la classificazione delle immagini si cerca di estrarre informazioni che descrivano la realtà. In questa maniera, i sistemi che permettono di verificare quanto la classificazione prodotta sia compatibile con la situazione reale sono fondamentali e, nella pratica, occorre prendere in considerazione una metodologia da inserire nel processo stesso di classificazione.

Le procedure di accuratezza implicano l'uso di dati o oggetti noti a terra da usare come base di confronto per valutare la bontà della classificazione. Queste informazioni si possono ricavare da mappe, foto aeree o ispezioni sul campo mediante l'uso di sistemi *GPS* e possono essere rappresentate da punti o aree. Le informazioni a terra devono necessariamente essere georeferenziate, in modo da poterle sovrapporre e confrontare con le classi identificate. Dal confronto si ricava una matrice di errore che serve come base nel processo di verifica dell'accuratezza. La matrice di errore è costituita da un certo numero di righe e colonne. Le righe rappresentano i valori della classificazione, le colonne le realtà a terra. Sulla diagonale della matrice è riportato il numero di *pixel* correttamente classificati per ogni classe, come si può vedere in tabella 3.1.

		Verità a terra		
		A	B	C
Valori della classificazione	A	10	2	3
	B	0	20	0
	C	4	1	10

Tabella 3.1: matrice di confusione.

Dalla matrice d'errore si estraggono tre importanti indici: *overall*, *producer's* e *user's accuracy*. La *overall accuracy* si ottiene dividendo tutti i *pixel* correttamente classificati (cioè tutti i *pixel* nella diagonale) per il numero totale di *pixel* nella matrice. La *producer's accuracy* si ottiene dividendo il numero di *pixel* correttamente classificati che appartengono ad una classe per la somma dei valori della colonna della stessa classe. La *user's accuracy* si ottiene, invece, dividendo il numero di *pixel* correttamente classificati che appartengono ad una classe per la somma dei valori della riga della stessa classe. Nel caso della *producer's accuracy*, si parla anche di errori di omissione, per cui *pixel* appartenenti ad una classe non vengono attribuiti ad essa (indicati nelle colonne); nel caso della *user's accuracy* si parla di errori di commissione o di inserimento, per cui alcuni *pixel* vengono assegnati a classi diverse da quella alla quale dovrebbero appartenere (indicati nelle righe). Gli indici appena descritti sono riportati in tabella 3.2.

	A	**B**	**C**	**Total**	**User's Accuracy**
A	10	2	3	15	0,67
B	0	20	0	20	1,00
C	4	1	10	15	0,67
Total	14	23	13	40	
Producer's Accuracy	0,71	0,87	0,77		
Overall Accuracy	0,80				

Tabella 3.2: indici di accuratezza.

I risultati in tabella si ottengono come segue:

- *Overall Accuracy*:
  (10+20+10)/(10+2+3+0+20+0+4+1+10)= 40/50 = 80%
- Errore di commissione per la classe A:
  (2+3)/(10+2+3) = 5/15 = 33% errore, *user's accuracy* del 67%
- Errore di omissione per la classe A:
  (0+4)/(10+0+4) = 4/14 = 29% errore, *producer's accuracy* del 71%

Producer's e *user's accuracy* permettono di identificare relazioni fra le classi, così, nell'ipotesi di aver per esempio sei classi, quattro di queste possono avere valori di *producer's* e *user's accuracy* bilanciati mentre le altre due no, influendo sul valore globale dell'accuratezza (*overall accuracy*). In questo caso, conviene ripetere la classificazione mantenendo, ad esempio, gli stessi parametri per le prime quattro classi e unendo in un'unica classe le ultime due.

La *producer's accuracy* stima la probabilità che un *pixel* appartenente alla classe *i* nella classificazione di riferimento sia correttamente classificato. Quindi, per una determinata classe *i*, è il rapporto tra il numero di *pixel* in cui classificazione e mappa di riferimento concordano e il numero di *pixel* di riferimento classificati in questa classe. Questa misura, ci dice quando bene la nostra classificazione concordi con quella di riferimento, ma non ci dà informazioni riguardo alla probabilità che un *pixel* classificato come classe *i* rappresenti effettivamente tale classe. Una stima di questa probabilità ci viene fornita dalla *user's accuracy*, ed è data dal rapporto tra il numero di *pixel* in cui classificazione e mappa di riferimento concordano e il numero di tutti i *pixel* di riferimento classificati come classe *i* dalla classificazione automatica (*eCognition User Guide, 2004*).

Congalton (*1991*) suggerisce, per classificazioni con un numero di classi piccolo, inferiore a dieci, di usare per la valutazione dell'accuratezza un numero di punti di riferimento (*reference points*) variabile fra 50 e 60. Questo valore può variare a seconda del volume dell'area occupata da una certa classe. Nel caso di un territorio boschivo caratterizzato da un solo ed unico affioramento roccioso, non avrebbe molto senso localizzare molti *reference points* per identificare

l'affioramento. L'opposto, invece, per quanto riguarda la vegetazione, per la quale saranno necessari molti punti di riferimento per verificare l'accuratezza della classificazione.

Oltre agli indici di accuratezza sopra esposti, se ne possono ricavare altri dalla matrice di errore (detta anche *matrice di confusione*) che coinvolgono operazioni matematiche più complesse. Uno di questi è l'indice *Kappa* che permette una generalizzazione dell'informazione per confrontare classificazioni prodotte da immagini diverse. L'indice *Kappa* è stato descritto in dettaglio da *Bishop et al* (*1975*), e da *Kalkhan* (*1994*). Con questo indice si assume che la classificazione automatica e quella di riferimento siano entrambe assegnazioni di classe indipendenti di eguale attendibilità; ciò che viene misurato è quanto bene esse concordino fra loro. Il vantaggio del coefficiente *Kappa* rispetto all'*overall accuracy* è che il *Kappa* prende in considerazione la "concordanza casuale" (*chance agreement*) e la corregge. Il termine "concordanza casuale" rappresenta in questo contesto la probabilità che la classificazione automatica e quella di riferimento concordino per puro caso (*eCognition User Guide, 2004*). Si può anche dire che l'indice *Kappa* esprime la riduzione proporzionale nell'errore generato dal processo di classificazione rispetto all'errore di una classificazione completamente casuale:

- *Kappa =1* significa un accordo (*agreement*) perfetto;
- Un valore, ad esempio, pari a *0,82* implica che il processo di classificazione ha evitato l'*82%* degli errori che sarebbero stati fatti con una classificazione del tutto casuale

	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**TOTALE**
A	2	0	2	0	0	4
B	0	1	0	0	0	1
C	1	0	1	0	0	2
D	0	0	0	2	1	3
E	0	0	0	0	6	6
TOTALE	3	1	3	2	7	16

Tabella 3.3: matrice di confusione per il calcolo dell'indice Kappa.

L'esempio seguente illustra il calcolo dell'indice *Kappa* (Tabella 3.3).

Calcolo di "*q*", numero di casi accidentali che ci si aspetta nella diagonale:

$$q = n(riga) * n(colonna) / N$$

$$A = 4 \cdot 3/16 = 0{,}75;$$

$$B = 1 \cdot 1/16 = 0{,}0625$$

$$C = 2 \cdot 3/16 = 0{,}375$$

$$D = 3 \cdot 2/16 = 0{,}375$$

$$E = 6 \cdot 7/16 = 2{,}625$$

$$q = (A + B + C + D + E) = 4{,}1875 \cong 4{,}2$$

con N = somma dei valori in riga o colonna (dovrebbero essere uguali)

Calcolo di K:

$$K = (d - q)/(N - q) = (12 - 4{,}2)/(16 - 4{,}2) = 0{,}66$$

con d = somma dei valori della diagonale

La maggior parte dei *software* che lavorano con immagini implementano strumenti specifici per la valutazione dell'accuratezza. Quelli che usano un sistema di classificazione basato sui *pixel* lavorano di solito usando dei punti di riferimento come base di confronto, mentre quelli che usano un classificatore ad oggetti utilizzano aree come riferimento.

3.3.3 Struttura e tessitura dell'immagine

Oltre che dai dati di tipo spettrale, è possibile ricavare informazioni considerando la classificazione delle immagini in un contesto spaziale. La premessa è che la classificazione più probabile per un *pixel*, quando lo si considera singolarmente, può cambiare se lo si inserisce in un determinato contesto (*Haralick and Joo, 1986*). I classificatori di contesto operano sia spazialmente che spettralmente (*Haralick, 1986*). I più semplici utilizzano i *pixel* vicini per decidere la classificazione del *pixel* centrale.

Quando l'obiettivo è l'identificazione di oggetti o regioni entra in gioco il procedimento noto come segmentazione dell'immagine. I poligoni dell'inventario forestale ("*forest stands"*) sembrano l'oggetto ideale per una segmentazione (*Woodcock and Harvard, 1992*). Invece di decidere l'appartenenza di un *pixel* sulla base della sola risposta spettrale, con la

segmentazione si applicano *"edge"* e *"region analysis"* per trovare *feature* spazialmente identificabili. L'idea è che parametri quali la tessitura, la forma, il contesto possano essere sfruttati nel processo di classificazione, in aggiunta alle informazioni di tipo spettrale. La tessitura dell'immagine è una quantificazione della variazione spaziale dei valori dei toni (ad esempio, toni di grigio) dell'immagine stessa, e non se ne può dare una definizione precisa a causa del suo carattere del tutto percettivo (*Hay et al., 1996*). Nell'interpretazione di immagini aeree i fotointerpreti utilizzano la tessitura per individuare i cambiamenti nella distribuzione spaziale della vegetazione forestale.

Parallelamente a questo uso della tessitura nella classificazione, l'interesse si è rivolto alla tessitura intesa come variabile nelle applicazioni forestali (*Coops and Culvenor, 2000*). La tessitura può essere correlata direttamente a differenti aspetti legati all'ambito forestale, quali indici di età, densità e area fogliare.

L'approccio più diffuso per la definizione di variabili tessiturali si basa sull'utilizzo di statistiche del secondo ordine derivate dalla co-occorrenza ("*co-occurrence*") spaziale dell'immagine (*Haralick et al., 1973*). Si suppone che l'informazione di tessitura sia contenuta nelle relazioni spaziali esistente fra i toni di grigio dell'immagine. Queste relazioni sono contenute in matrici di co-occorrenza spaziali (o di livelli di grigio), calcolate per quattro direzioni fra *pixel* adiacenti all'interno di una finestra di movimento ("*moving window*") nell'immagine. La matrice di co-occorrenza esprime come i valori dei *pixel* si succedano uno all'altro in una piccola finestra di analisi rispetto al numero di *pixel* nell'immagine. Questa procedura di base si è dimostrata valida per un'ampia gamma di immagini e applicazioni (*Franklin and Peddle, 1987*).

Di norma, una procedura di analisi della tessitura richiede l'individuazione di cinque parametri di controllo:

1. Dimensione della finestra;
2. Derivate tessiturali;
3. Canali di ingresso (ad esempio, canali spettrali di cui misurare la tessitura);
4. Livello di quantizzazione dei canali di uscita (8-bit, 16-bit o 32-bit);

5. La componente spaziale (ad esempio, la distanza e l'angolo inter-*pixel* durante il calcolo della matrice di co-occorrenza).

Di questi, probabilmente, il più critico è la dimensione della finestra mobile (*Franklin et al., 1996*); se, per esempio, *pixel* che si susseguono uno all'altro sono usati nel calcolo della matrice, qual è l'effetto di una autocorrelazione spaziale (*Foglein and Kittler, 1983*)? Oltre a ciò, questo tipo di approccio di co-occorrenza spaziale genera una grande mole di dati, che, insieme alle dimensione dell'immagine da studiare, può allungare notevolmente il tempo necessario al *software* per la loro elaborazione.

In generale, la tessitura dipende strettamente dal tipo di immagine da analizzare: un'analisi tessiturale soddisfacente per una applicazione, non necessariamente implica un suo utilizzo su grande scala. Perciò, una giusta scelta delle variabili tessiturali dovrebbe basarsi su un procedimento iterativo che prenda in considerazione il tipo di dati disponibili e gli obiettivi di interesse.

3.3.4 Analisi dei cambiamenti

Una serie di immagini acquisite in date diverse (si può parlare di serie temporali di immagini), geometricamente e radiometricamente corrette, possono essere sottoposte ad un diverso tipo di analisi mirato all'identificazione dei cambiamenti nel tempo. I cambiamenti si possono individuare attraverso analisi visuali: nessuna variazione, variazioni positive o negative appariranno con tonalità di colore diverse nell'immagine permettendo così un primo esame dei cambiamenti subiti dal territorio.

L'utilizzo di immagini digitali elaborate con i moderni *software* ha permesso di automatizzare la procedura. Gli approcci più utilizzati sono i seguenti:

1. Analisi dell'immagine *pixel-per-pixel*, come analisi di tendenza ("*trend analysis*), classificazioni e differenziazione;
2. Analisi dell'immagine area-per-area in cui il cambiamento si può generalizzare all'interno di strutture più grandi, come poligoni *GIS-based* di comunità di alberi omogenei ("*forest stand*") (*Wulder, 1998*).

In genere, per ridurre al minimo le operazioni di calibrazione delle immagini che devono essere confrontate, bisogna cercare di mantenere costanti alcuni parametri caratterizzanti le stesse, quali il periodo dell'anno, l'ora del giorno, le bande spettrali, il sensore, l'angolo di visuale, la risoluzione spaziale, ecc…. Le immagini da comparare devono essere registrate tra loro il più precisamente possibile e riferite al medesimo sistema di riferimento, per evitare di confondere come cambiamenti errori dovuti ad una errata georestistrazione.

Ci sono differenze sul modo in cui gli algoritmi di *"change detection"* lavorano sulle diverse tipologie di immagini e sull'individuazione di differenti tipi di cambiamento.

Uno degli approcci possibili consiste in una classificazione "multidata", caratterizzata dal confronto di un insieme di classificazioni indipendenti fatte su immagini riferite a periodi temporali diversi.

I metodi di *change detection* possono utilizzare sia classificazioni multispettrali sia la segmentazione delle immagini; l'algoritmo è in grado di selezionare gruppi omogenei di *pixel* da entrambe le immagini e confrontarli, focalizzando solo su quelle aree che non combaciano sulla base della classificazione. Un vantaggio di questa classificazione "multidata" è che non è necessaria una calibrazione precisa delle immagini nel caso in cui i cambiamenti siano evidenti o siano disponibili dei buoni dati a terra da usare come *training site*. Uno svantaggio è dato dal fatto che gli errori di classificazione si possono combinare nell'analisi di *change detection*, portando ad una interpretazione errata dei cambiamenti. Per questo è sempre utile procedere ad una attenta analisi dell'accuratezza dei risultati della classificazione.

Un altro approccio è rappresentato dalle tecniche di differenziazione (*"differencing"*), in cui la risposta spettrale di un'immagine può essere sottratta, o altrimenti confrontata, dalla risposta spettrale di un'immagine di un'altra data. L'entità del cambiamento è rappresentata dalla distanza euclidea fra due punti analizzati. Aree soggette a cambiamento saranno caratterizzate da grandi differenze nei valori, mentre il contrario per quelle che hanno subito una minima o nessuna modifica. Sarà necessario scegliere un valore di soglia (*"threshold"*)

per decidere quali *pixel* appartengono ad aree che hanno subito una trasformazione, e quali no; tale valore si trova andando a vedere i valori dei *pixel* in corrispondenza di queste aree. Nel caso si analizzino immagini con una risoluzione che non permette una verifica visiva sull'effettivo cambiamento avvenuto in una certa area, al fine di fissare un giusto valore di soglia sono necessari dei rilievi a terra oppure la disponibilità di immagini ad altissima risoluzione sulle quali è possibile individuare visivamente se è avvenuto o meno un cambiamento. Ovviamente questo discorso dipende dall'obiettivo dell'analisi, che può essere l'individuazione di edifici distrutti in seguito ad eventi calamitosi o di grandi zone boschive distrutte in seguito ad incendi. Bisogna quindi prendere in considerazione sia l'entità minima del cambiamento che si vuole individuare sia l'estensione di tale cambiamento.

Occorre inoltre distinguere fra cambiamenti "positivi" e "negativi": per esempio un cambiamento negativo può essere la scomparsa di vegetazione, mentre un cambiamento positivo può essere rappresentato dalla ricrescita di vegetazione.

Un approccio alternativo, è l'uso del rapporto fra bande (*"band ratio"*) di immagini riferite a differenti periodi temporali. In questo caso, per aree che non hanno subito cambiamenti il valore del rapporto tenderà ad uno, mentre per zone di trasformazione si avranno valori del rapporto che tenderanno ad aumentare o diminuire rispetto all'unità. Come sopra, anche qui occorre definire un valore di soglia per l'identificazione del cambiamento.

4 IL CASO DI STUDIO DEL GRUPPO PRADO - CUSNA

4.1 INQUADRAMENTO AMBIENTALE

Il caso studio è un'area del versante emiliano del gruppo montuoso Prado-Cusna (latitudine: *44°14' N*; longitudine *10°23' E*), due fra le cime più alte dell'Appennino settentrionale. Il gruppo montuoso si sviluppa per circa $15Km$, dal Passo di Pradarena ($1.579m$), ad Ovest, alla Foce delle Radici, ad EsT. Il monte Prado ($2.054m$) è posto lungo lo spartiacque tosco-emiliano, mentre il monte Cusna ($2.120m$) è su una dorsale quasi parallela alla linea dello spartiacque (Figura 4.1).

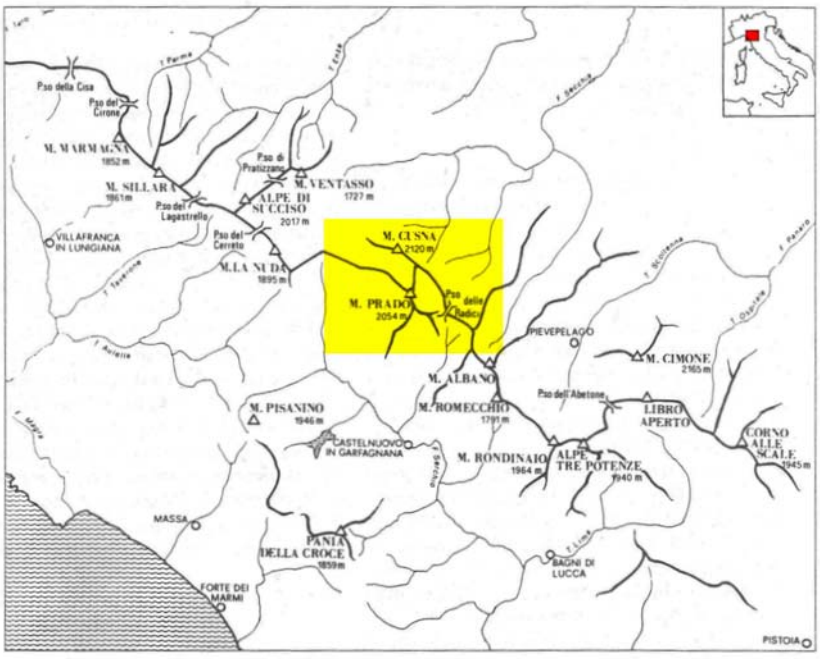


Figura 4.1: localizzazione dell'area Prado-Cusna, nell'Appennino tosco-emiliano.

A Nord il Monte Prado è separato dal gruppo del Monte Cusna (Figure 4.2, 4.3) dalla depressione di Lama Lite ($1769m$). Il versante nord-occidentale delimita a sud la testata della Valle del Torrente Ozola, mentre il versante nord-orientale delimita l'alta Valle del Torrente Dolo. Ambedue i corsi d'acqua sono tributari del Fiume Secchia.

(a)

(b)

Figura 4.2: il limite altitudinale del bosco di faggio nel versante meridionale del Monte Cusna (a); alberi al limite del bosco (b).

Figura 4.3: Vista del Monte Cusna.

L'area, per il suo elevato valore ambientale e biologico, è compresa nel Parco Nazionale dell'Appennino Tosco-Emiliano e in 4 Siti di Interesse Comunitario (SIC): IT4030004; IT4030006; IT4030005; IT5120002. Ha un'estensione di $3.885 ha$ ed un ambito altitudinale compreso tra i $1.040 m$ e i $2.120 m$. All'interno di questa area è possibile definire il limite altitudinale di distribuzione del bosco di faggio (*Fagus sylvatica*) (Figura 4.2). Al di sopra di questo limite le durate della copertura nevosa selezionano differenti comunità vegetali (*Ferrari, 1995*). Le formazioni più diffuse sono rappresentate da brughiere a *Vaccinium myrtillus* e *V. gaultherioides* (*Ferrari e Piccoli, 1997*) e da praterie a *Brachypodium genuense* e *Nardus stricta.* Tra le praterie, le prime sono localizzate su versanti ad esposizione meridionale, mentre le seconde derivano in genere dalla distruzione delle brughiere a mirtilli per una gestione a pascolo (*Ferrari et al., 2002*).

Il substrato litologico è di tipo prevalentemente arenaceo caratterizzato dalle arenarie del "Macigno" e di "Monte Modino". Sono presenti numerosi circhi glaciali originati dalla glaciazione del Würm (*Losacco, 1982*).

Il clima ha un carattere debolmente continentale. La precipitazione annuale media sul crinale è di $2.000mm$ con valori minimi in estate e in inverno. Le precipitazioni a carattere nevoso si hanno da Novembre ad Aprile. La durata della copertura nevosa - sino alla fine di maggio o all'inizio di luglio – dipende dalla topografia e dall'esposizione dei luoghi.

In questo capitolo viene affrontata ed analizzata una procedura per il recupero di prese aeree storiche, definibile mediante una serie di successive operazioni, a partire dalla digitalizzazione dei fotogrammi, continuando con la determinazione di punti di controllo noti a terra per l'orientamento delle immagini, per finire con l'ortorettifica e mosaicatura delle stesse, con l'ausilio di un Modello Digitale del Terreno (*DTM*). L'obiettivo è il confronto di tali dati con immagini digitali più recenti al fine di individuare eventuali cambiamenti avvenuti nell'arco di tempo intercorso, con particolare attenzione ad eventuali variazioni dell'ambito altitudinale del limite superiore del bosco.

4.2 MATERIALE A DISPOSIZIONE

Il materiale disponibile per la sperimentazione è stato il seguente:

- Fotogrammi aerei in bianco e nero della zona oggetto di studio in scala $1:62.000$ del volo *GAI* 1954-1955 (periodo luglio e ottobre); fotogrammi aerei a colori della zona oggetto di studio in scala $1:13.000$ del volo *RER* 1976-1978 (periodo Luglio e Settembre 1978). I fotogrammi, opportunamente ortorettificati (come sarà descritto in seguito), sono stati utilizzati come base di partenza per l'analisi multitemporale;
- Ortofoto a colori (dimensioni del *pixel* a terra pari a *1m*) della zona di interesse del Volo IT2000, realizzato dalla Compagna Generale Riprese Aeree (CGRA), utilizzati come dato aggiornato di confronto nell'analisi multitemporale;
- Cartografia Tecnica Regionale (CTR) della Regione Emilia-Romagna in formato *raster*, in scala $1:5.000$. Sono state utilizzate le curve di livello in formato vettoriale con interdistanza di *5m* derivate dalla CTR per la

creazione del Modello Digitale del Terreno. E' stato prodotto un *DTM* con passo di *15m* per l'elaborazione del volo *GAI*, di minore qualità e a piccola scala, e con passo di *5m* per il volo *RER*.

La mancanza di dati di rilevante importanza, primo fra tutti il certificato di calibrazione della camera usata per i fotogrammi del volo *GAI*, nonché la scarsa qualità dei fotogrammi stessi, hanno notevolmente complicato la procedura di ortorettifica (*Pasimeni, 2005*). Minori difficoltà ha dato l'ortorettifica dei fotogrammi del volo *RER*, data la loro migliore qualità e la presenza del certificato di calibrazione. Il sistema cartografico adottato per il prodotto finale è *UTM-ED50* nel fuso 32.

La tabella 4.1 riassume le caratteristiche delle immagini utilizzate.

Immagini aeree	**Data**	**Dettagli tecnici**
4 immagini aeree in scala di grigio	Luglio e Ottobre 1954	Volo *GAI* (Gruppo Aereo Italiano)
		scala media fotogramma 1:62 000
		Certificato di calibrazione della camera non disponibile
15 immagini aeree a colori	Luglio e Settembre 1978	volo *RER* (Regione Emilia-Romagna)
		scala media fotogramma 1:13 000
		Certificato di calibrazione della camera disponibile
6 ortofoto a colori	1998-99	volo IT2000 (Compagnia Generale Riprese Aeree - CGRA)
		scala media 1:10 000
		Formato digitale

Tabella 4.1: immagini utilizzate per lo studio multitemporale.

4.3 PREPARAZIONE DEI DATI

4.3.1 I voli GAI e RER

Come materiale di partenza per lo studio multitemporale della copertura boschiva dell'area in esame, sono stati utilizzati 4 fotogrammi aerei realizzati nel

1954 dal Gruppo Aereo Italiano (G.A.I.), e 15 foto aeree a colori del volo *RER*, effettuato tra gli anni 1976-1978.

Per quanto riguarda il primo volo, fu effettuato su committenza americana in soli tre anni, con l'obiettivo realizzato di coprire tutto il Nord e Centro Italia. Per l'occorrenza fu costituito un consorzio di imprese private, il *GAI* per l'appunto, che fornì velivoli in grado di volare ad alte quote ed attrezzati con le strumentazioni necessarie alla ripresa stereoscopica.

Nei decenni successivi, tutta la documentazione fotografica fu acquistata dall'Istituto Geografico Militare Italiano di Firenze e messa a disposizione per consultazione o vendita al pubblico.

Nella figura seguente (Figura 4.4.), è riportato uno schema delle due strisciate adiacenti di cui fanno parte i quattro fotogrammi del '54:

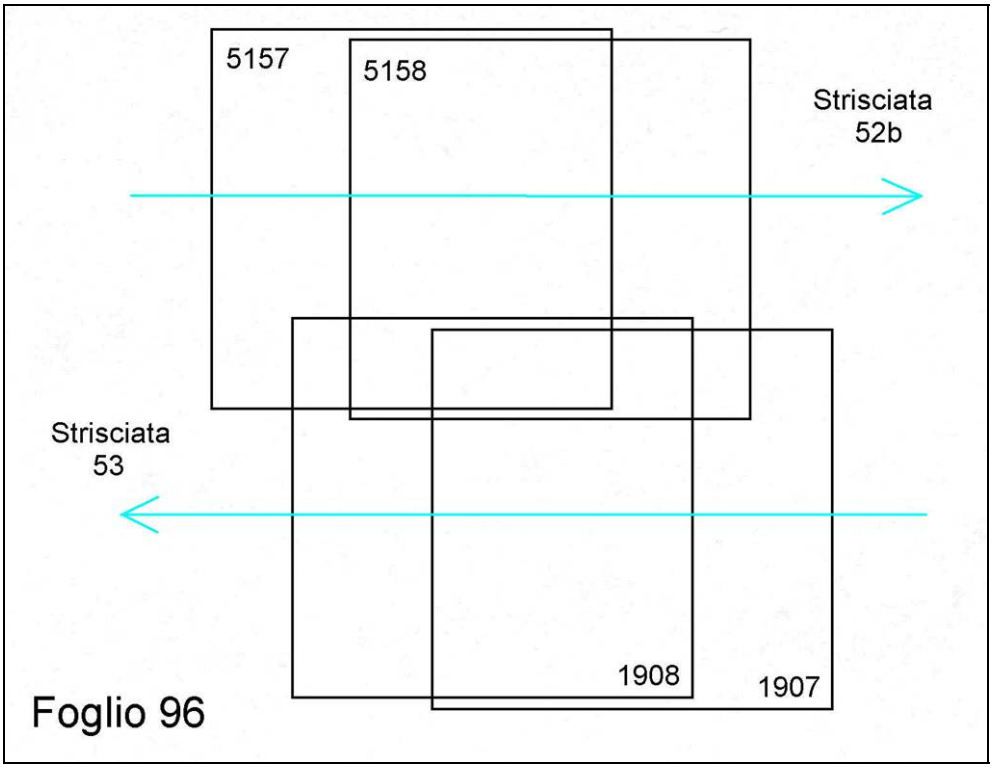


Figura 4.4: schema delle strisciate e disposizione relativa dei fotogrammi del '54 sul foglio 96.

Riguardo al secondo volo, è stata utilizzata una pellicola a colori; il formato dei fotogrammi e delle diapositive è di $23x23cm$. Per le riprese del 1976 l'andamento delle strisciate è da nord-ovest a sud-est; per i restanti voli l'andamento è da ovest a est e viceversa. I fotogrammi sono caratterizzati da una

copertura stereoscopica con sovrapposizione longitudinale del *60%* e laterale del *20%*. Il volo è stato effettuato dalla Compagnia Generale Riprese Aeree Spa di Parma.

4.3.2 Digitalizzazione dei fotogrammi

La prima fase dello studio condotto ha riguardato la trasformazione dei fotogrammi dal formato cartaceo al formato numerico, ossia digitale. A tal fine le foto sono state "scansionate" mediante scanner piano *Epson GT-12000* ad una risoluzione di *800 dpi* (dimensione del pixel pari a $31{,}8\mu m$). Inizialmente è stat eseguita una scansione a *1200 dpi* (dimensione del pixel pari a $21{,}2\mu m$), ma dalle prove fatte è emersa una trascurabile differenza fra le due risoluzioni in relazione alla qualità del dato a disposizione. Per questo motivo e, soprattutto, per non trovarsi ad avere immagini di centinaia di *MegaByte* che avrebbero rallentato notevolmente la fase di elaborazione, si è scelta la risoluzione di scansione più bassa.

Essendo stato utilizzato uno scanner non fotogrammetrico, e dunque presumibilmente affetto da errori di carattere geometrico non trascurabili, si è reso necessario elaborare le immagini scansionate per ridurre il più possibile l'effetto di deformazioni locali o globali introdotte dalla conversione analogico/digitale. Gli errori sono stati corretti utilizzando il *software* di calibrazione *SV-Scan* sviluppato da *Menci Software*. Si è proceduto a scansionare un reticolo di crocicchi con interdistanza relativa fissa riportato su un supporto plastico indeformabile. Tale valore noto è stato poi confrontato in automatico dal *software* con le distanze rilevate sul reticolo scansionato mediante collimazione automatica dei crocicchi. In questo modo il programma ha ricavato l'errore di posizionamento di ciascun crocicchio ed ha creato un file di calibrazione mediante il quale è stato possibile correggere gli errori di scansione sui fotogrammi. L'elaborazione non ha fatto altro che ricampionare ciascun *pixel* dell'immagine processata nella sua posizione più plausibile sulla base del file di calibrazione creato in precedenza.

Nella figura 4.5 è mostrata una schermata del programma *SV-Scan* in cui si vede il diagramma di deformazione della griglia acquisita dallo scanner. I puntini rossi indicano l'errore di posizionamento del crocicchio scansionato rispetto alla sua posizione reale individuata dai punti di intersezione del reticolo.

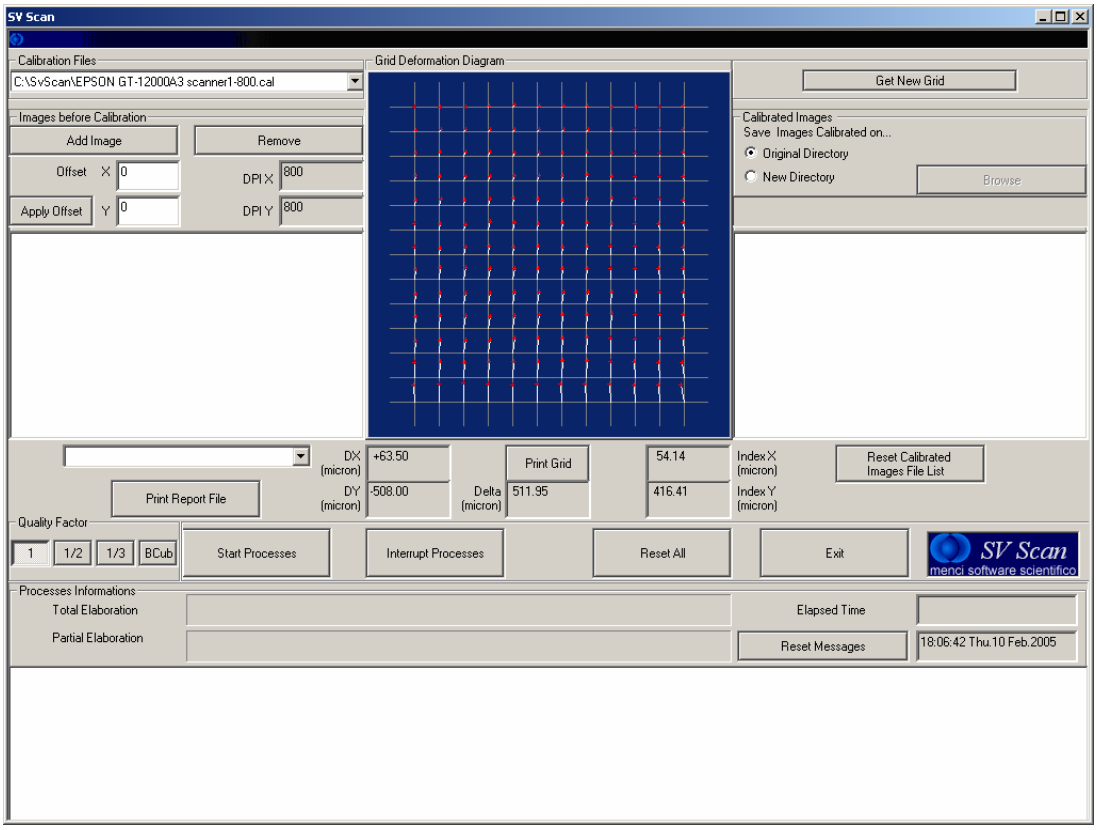


Figura 4.5: schermata del software SV-Scan.

Il valore medio, espresso in micron, dell'errore di posizionamento dei crocicchi scansionati rispetto alla posizione teorica corretta è risultata essere di $54\mu m$ in direzione X (orizzontale) e di $416\mu m$ in direzione Y (verticale).

4.3.3 Individuazione dei Ground Control Point (GCP)

Per utilizzare i fotogrammi a fini metrici all'interno di un sistema cartografico, sia nell'ambito di una tradizionale restituzione analitica stereoscopica, sia nella produzione di ortofoto con il raddrizzamento differenziale, è necessario conoscere le coordinate terreno di un certo numero di punti fotografici di appoggio (*GCP*) nel sistema di riferimento.

Per l'individuazione dei punti ci si è avvalsi dell'utilizzo di ortofoto a colori georeferenziate nel sistema *UTM-WGS84* realizzate nel 2000 durante il Volo Italia dalla Compagnia Generale Riprese Aeree e consultabili gratuitamente sul Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'Ambiente. Dal confronto tra tali immagini e i fotogrammi storici si sono identificati gli stessi punti significativi presenti in entrambe le fonti, a cui sono state assegnate le coordinate planimetriche derivanti dalle ortofoto digitali.

La ricerca dei punti di appoggio si è rivelata molto difficile e laboriosa soprattutto nel caso delle immagini del volo del 1954 a causa di tre motivazioni principali:

1°. La scarsa qualità delle immagini, sfocate lungo il bordo e non sempre di chiara interpretazione per via della scala fotogramma piuttosto piccola. A ciò va aggiunto il fatto che le immagini sono in bianco e nero, per cui la distinzione dei vari oggetti rappresentati molto spesso risulta impossibile;

2°. Si è dovuto tenere in debita considerazione che non sempre è stata possibile o chiara l'identificazione sulle ortofoto del 2000 dei punti di appoggio individuati sui fotogrammi del 1954 a causa della presenza di vegetazione nelle immagini recenti in aree che nel 1954 ne erano prive; lo stesso si è riscontrato, anche se in misura minore, per le immagini del 1978.

3°. Le zone analizzate sono tipicamente montane, quindi con forte copertura vegetale o nevosa, per cui la maggior parte dei punti è stata individuata in corrispondenza di massi o tornanti di montagna.

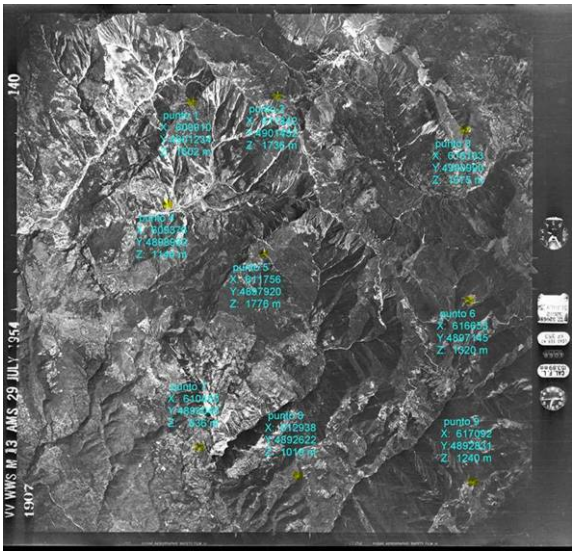
Nonostante queste difficoltà, alla fine si è riusciti ad avere una buona ed omogenea distribuzione di punti sui quattro fotogrammi, per un totale di 36 punti di appoggio (9 per ciascuna immagine). Anche per le immagini del '78 sono stati individuati 9 punti di controllo per ciascuna.

L'ultima operazione della fase di georeferenziazione è stata quella di trasformare le coordinate dei punti trovati dal sistema di riferimento *UTM-WGS84*, utilizzato per le ortofoto del 2000, al sistema europeo *UTM-ED50*,

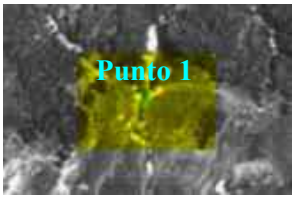
scelto per il presente lavoro. In questo caso ci si è avvalsi dell'utilizzo del *software* di conversione *CartLab1 v.1.2.2* (*realizzato da Cima, Maseroli, e Surace)*

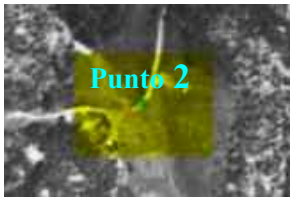
Inoltre, le ortofoto del 2000 forniscono solo le coordinate planimetriche, per cui la determinazione delle quote è avvenuta per mezzo delle tavolette in scala $1:25.000$ dell'I.G.M.I., sulle quali sono riportate le curve di livello con un'equidistanza pari a $25m$, eseguendo un'interpolazione fra due curve di livello consecutive se il punto considerato cadeva all'interno di esse, oppure utilizzando i punti quotati nel caso in cui il punto di appoggio veniva a coincidere con uno di questi. Le quote degli stessi punti sono state ricavate nel caso del volo *RER* direttamente dal *DTM* generato a partire dalle curve di livello, sovrapposto alle ortofoto del Volo IT2000 in modo da velocizzare l'individuazione della quota del punto planimetrico corrispondente. Si è deciso di procedere in questa maniera visto il numero maggiore di foto del '78 rispetto al '54.

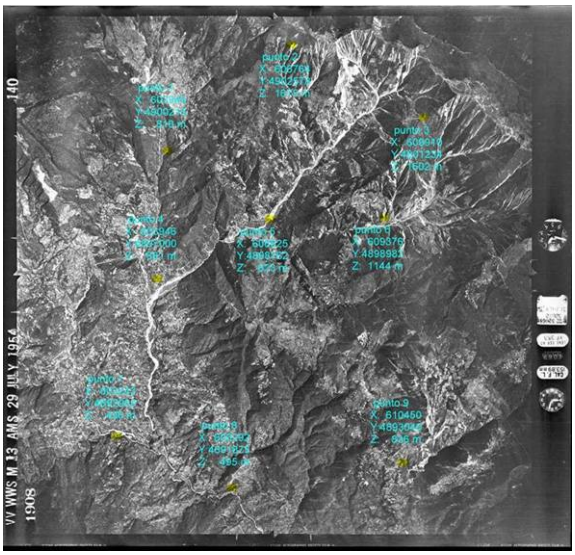
Si riportano in figura 4.6 i quattro fotogrammi aerei del 1954 e i punti di appoggio utilizzati, e 2 fotogrammi esemplificativi dei 15 fotogrammi aerei del 1978 con i corrispondenti punti di appoggio.

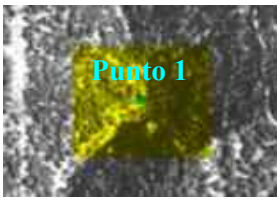


(a)



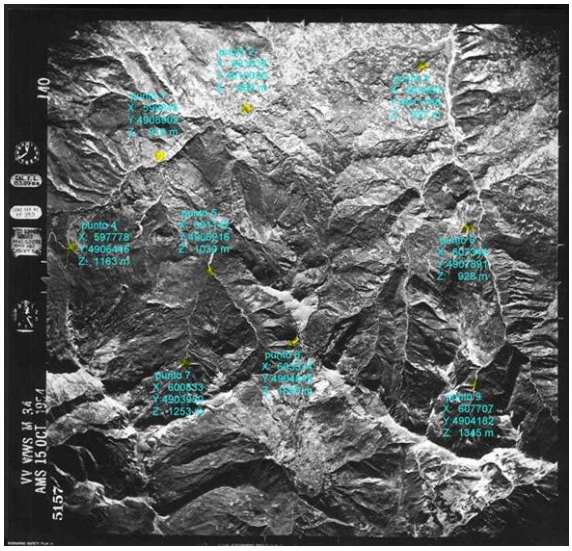


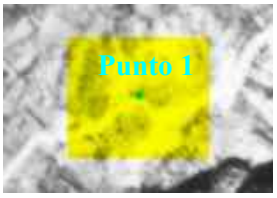

punto 3
X 609376
Y 4898984
Z 1144 m
punto 9
X 610460
VV WWS M 13 AMS 29 JULY 1954
1908

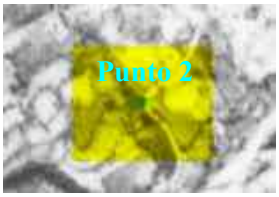

Punto 1

Punto 2

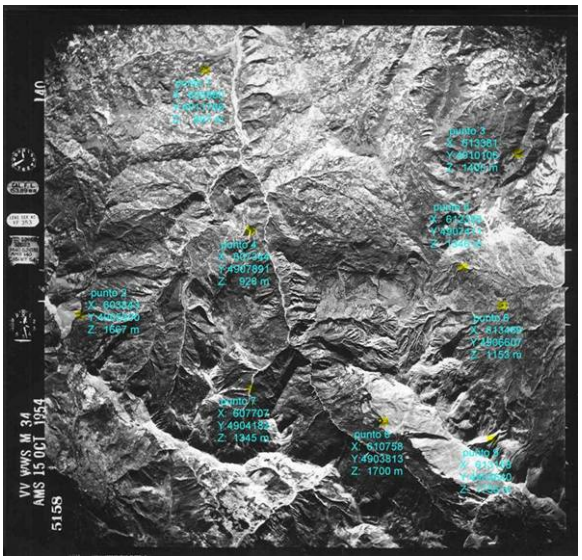
(b)

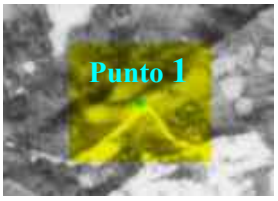

punto 4
X 597778
Y 4906446
Z 1163 m
punto 5
X 607707
Y 4904182
Z 1345 m
VV WWS M 34
AMS 15 OCT 1954
5157

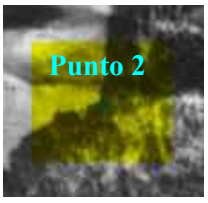

Punto 1


Punto 2

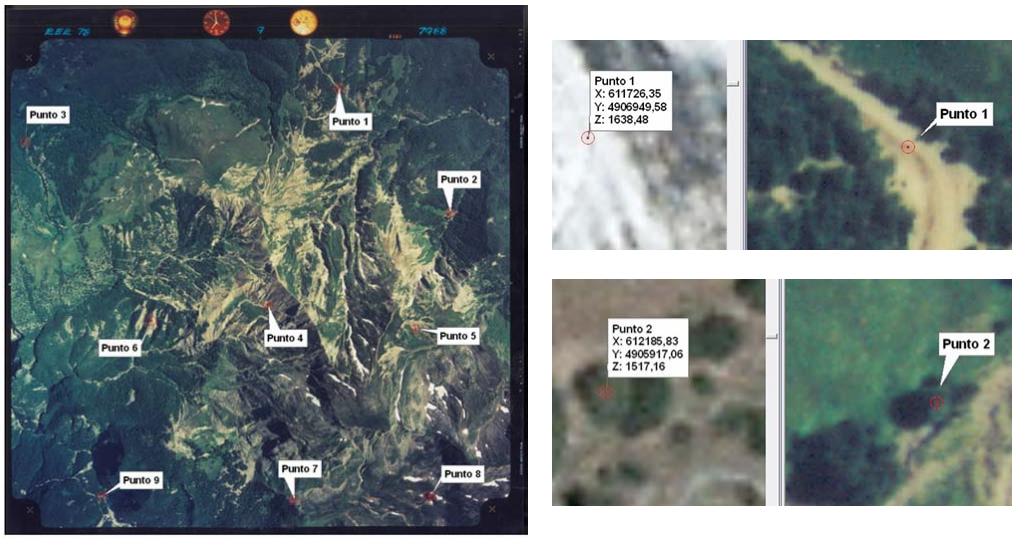
(c)


punto 3
X 613381
Y 4910 m
Z 1405 m
punto 5
X 607707
Y 4904182
Z 1345 m
punto 8
X 610758
Y 4903815
Z 1700 m
VV WWS M 34
AMS 15 OCT 1954
5158

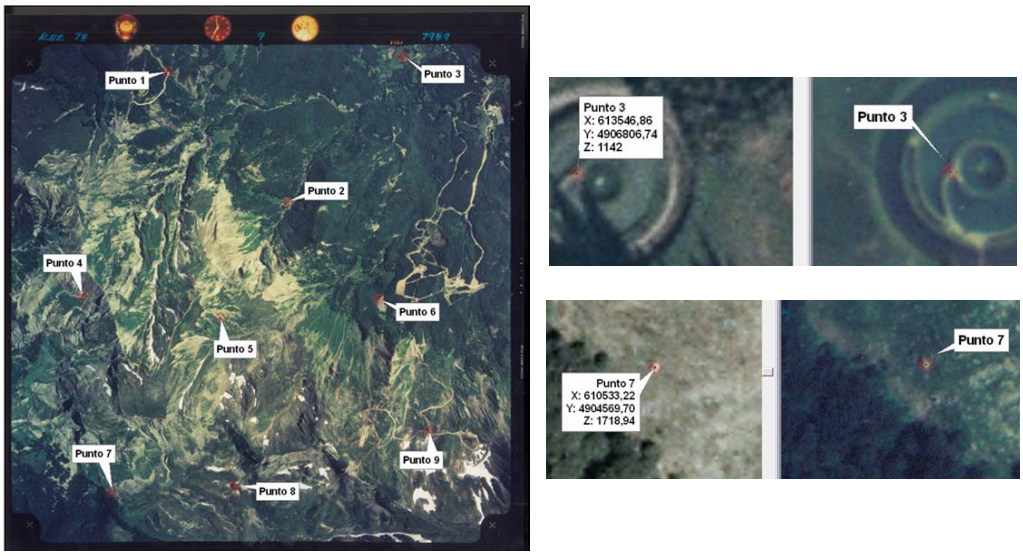

Punto 1


Punto 2

(d)



(e)



(f)

Figura 4.6: fotogrammi (a) 1907 e (b) 1908, strisciata 53, foglio 96; fotogrammi (c) 5157 e (d) 5158, strisciata 52b, foglio96, volo GAI; fotogrammi (e) 7988 e (f) 7989, volo RER.

4.3.4 L'orientamento dei fotogrammi

Per la creazione dell'ortofotogramma a partire dalle immagini a disposizione, necessario per poter effettuare operazioni di tipo metrico, i fotogrammi sono stati elaborati all'interno del *software* di fotogrammetria digitale *Socet-Set v.5.1* sviluppato dalla *Bae System*.

La fase di orientamento si divide in due parti successive:

1°. Orientamento interno, ossia stabilire come è posizionato il fotogramma rispetto alla camera al momento dello scatto, tenendo in debita considerazione anche le eventuali deformazioni dell'immagine;

2°. Orientamento esterno, cioè determinare la posizione della macchina rispetto all'oggetto fotografato al momento dello scatto.

L'operazione di orientamento interno ha presentato delle difficoltà legate alla mancanza di alcuni dati significativi relativi ai fotogrammi. In particolare per il volo del '54 non si è potuto disporre del certificato di calibrazione della camera aerea dal quale ricavare la costante della camera, le coordinate delle marche fiduciali e i parametri di distorsione radiale per la correzione delle deformazioni. L'unica informazione disponibile è stata la lunghezza focale nominale della camera, pari a $153{,}89 mm$, riportata sugli stessi fotogrammi.

Non essendo stato possibile, malgrado una lunga ricerca, recuperare questa informazione, si è proceduto in maniera meno rigorosa andando a determinare le coordinate suddette per via sperimentale, utilizzando un restitutore analitico, con il quale si è ottenuto in ogni modo un buon risultato in termini di accuratezza numerica. Le coordinate così ricavate sono state confrontate dal *software*, durante la fase di orientamento, con quelle desunte dalla collimazione manuale delle marche fiduciali. Il residuo medio finale è stato di *3 pixel*.

Per quanto riguarda i parametri di distorsione radiale non c'è stato modo di recuperare alcuna informazione che ne permettesse una modellazione, per cui non sono state applicate correzione in questo senso.

L'operazione di orientamento esterno è stata condotta attraverso il metodo del vertice di piramide, utilizzando i punti di appoggio determinati in precedenza ed orientando singolarmente ciascun fotogramma.

Si è così ricostruita la posizione della camera da presa rispetto al sistema di riferimento oggetto al momento dello scatto, individuata dalle tre coordinate (X, Y, Z) del centro di presa e dai tre angoli di rotazione della camera (ω, γ, k), indicatori rispettivamente del fenomeni di rollio, beccheggio e deriva dell'aereo. Si riportano di seguito in tabella 4.2 i residui, espressi in metri, sui punti di appoggio derivanti dall'operazione di orientamento esterno per i fotogrammi dei voli *GAI* e *RER*, e in tabella 4.3 i valori medi dei residui della Triangolazione Aerea sulle coordinate dei *GCP* per ciascun fotogramma degli stessi voli.

Point ID 1907	X residual	Y residual	Z residual
1	-1.79	0.81	0.84
2	-1.68	-13.61	-6.71
3	4.91	-11.39	-2.38
4	-14.86	3.86	5.31
5	7.01	-2.95	-0.34
6	10.04	4.61	5.47
7	-10.10	13.14	-5.10
8	-3.74	-5.89	3.01
9	10.21	11.23	-0.10

(a)

Point ID 1908	X residual	Y residual	Z residual
1	-15.63	-17.40	-0.75
2	2.15	-14.59	-9.86
3	16.79	5.97	9.74
4	-1.52	5.80	0.31
5	-1.48	-8.06	-1.35
6	6.50	1.43	2.33
7	-18.56	10.73	2.10
8	-0.89	0.99	-0.55
9	12.64	15.12	-1.98

(b)

Point ID 5157	X residual	Y residual	Z residual
1	-14.29	-4.81	5.21
2	-5.45	-13.10	-4.56
3	10.35	-1.21	2.03
4	-5.38	-2.11	3.76
5	15.89	-7.26	-4.31
6	8.67	-15.62	1.28
7	-12.67	25.29	-3.45
8	-7.32	-1.60	0.51
9	10.19	20.41	-0.48

(c)

Point ID 5158	X residual	Y residual	Z residual
1	-16.76	-7.10	1.49
2	-5.05	2.27	2.84
3	10.43	-16.21	-0.69
4	0.87	-2.90	-0.53
5	-6.60	-4.87	-3.32
6	10.26	-3.98	5.90
7	-0.63	17.12	-5.31
8	-4.54	9.78	-4.85
9	12.01	5.89	4.48

(d)

Point ID 7988	X residual	Y residual	Z residual
1	-0.049	0.931	3.018
2	0.503	-1.484	1.525
3	-0.945	-2.030	-5.935
4	1.662	-0.739	0.243
5	-0.235	-0.484	0.159
6	-1.514	0.613	3.346
7	1.007	0.016	-0.796
8	1.148	0.852	-1.987
9	-1.576	2.325	0.426

(e)

Point ID 7989	X residual	Y residual	Z residual
1	-1.442	0.926	4.536
2	1.473	-0.905	0.329
3	0.502	-1.336	-2.501
4	0.921	0.536	-2.159
5	-2.469	-0.762	1.952
6	-0.469	1.698	-2.293
7	0.052	0.017	-0.234
8	0.866	-0.297	-0.451
9	0.567	0.122	0.823

(f)

Point ID 7992	X residual	Y residual	Z residual
1	-2.194	-1.044	-1.761
2	0.504	-1.089	-3.332
3	1.205	-1.696	-0.498
4	-1.543	-0.264	4.776
5	2.272	1.564	1.341
6	1.126	1.733	4.799
7	-0.531	-1.618	4.677
8	-0.127	1.848	-7.015
9	-0.711	0.566	-2.988

(g)

Point ID 7994	X residual	Y residual	Z residual
1	-3.844	1.423	2.455
2	2.942	1.721	-5.499
3	1.792	-1.73	3.122
4	-0.362	0.595	0.751
5	-0.362	0.595	0.751
6	0.132	-1.051	2.984
7	-1.635	-1.784	3.104
8	-1.504	0.455	-4.662
9	2.479	0.372	-2.25

(h)

Point ID 8024	X residual	Y residual	Z residual
1	2.033	0.467	-2.437
2	-0.088	2.059	5.214
3	-0.143	-0.613	-1.327
4	0.05	-1.156	-1.617
5	non è stato usato		
6	-0.067	2.359	-2.658
7	0.045	-2.213	2.152
8	-1.926	-0.565	0.358
9	0.095	-0.338	0.318

(i)

Point ID 8026	X residual	Y residual	Z residual
1	-1.425	2.926	-0.347
2	5.542	-1.014	3.594
3	non è stato usato		
4	-1.053	0.051	3.151
5	-1.504	1.359	-6.998
6	0.082	0.403	0.171
7	-1.454	2.394	-1.275
8	1.959	-3.4	-10.024
9	-2.147	-2.719	11.73

(l)

Point ID 8027	X residual	Y residual	Z residual
1	non è stato usato		
2	1.486	-0.037	-2.442
3	-0.497	3.323	2.601
4	1.697	0.454	-0.708
5	-0.005	1.919	-2.009
6	-2.782	-0.774	1.222
7	0.701	-1.521	-2.81
8	-0.467	-1.749	6.653
9	-0.133	-1.615	-2.511

(m)

Point ID 8054	X residual	Y residual	Z residual
1	-11.696	1.902	6.071
2	3.026	0.133	1.456
3	-4.359	-2.706	5.507
4	3.441	1.472	-1.92
5	2.195	-2.618	1.982
6	1.089	-0.65	-0.112
7	-1.401	-1.015	-6.368
8	1.247	-1.91	2.029
9	6.458	5.391	-8.644

(n)

Point ID 8056	X residual	Y residual	Z residual
1	-2.052	-0.166	2.844
2	1.026	-0.465	-0.473
3	2.145	-1.25	-1.48
4	-2.247	3.059	-5.391
5	non è stato usato		
6	non è stato usato		
7	-1.274	1.531	0.116
8	2.342	-2.792	4.047
9	0.061	0.084	0.337

(o)

Point ID 8060	X residual	Y residual	Z residual
1	1.127	0.277	-0.531
2	-1.008	-0.044	-0.971
3	non è stato usato		
4	1.187	0.008	-2.527
5	-0.096	1.735	0.197
6	-0.748	-0.313	1.823
7	-0.655	-2.125	1.478
8	-0.125	0.053	-0.485
9	0.318	0.409	1.017

(p)

Point ID 8091	X residual	Y residual	Z residual
1	-0.322	0.787	3.636
2	-0.35	-4.286	-9.572
3	-4.736	1.17	-0.609
4	1.182	-0.854	0.143
5	-0.01	1.464	-1.632
6	0.508	1.538	-1.995
7	0.968	0.301	0.524
8	non è stato usato		
9	2.76	-0.12	9.504

(q)

Point ID 8093	X residual	Y residual	Z residual
1	-0.396	-0.616	0.052
2	-0.074	0.042	0.239
3	0.143	-0.306	-1.27
4	0.956	0.192	-0.736
5	-1.169	0.715	1.889
6	0.899	0.312	1.493
7	0.428	-0.677	1.317
8	0.151	0.05	-0.814
9	-0.939	0.287	-2.171

(r)

Point ID 8094	X residual	Y residual	Z residual
1	-0.463	-1.09	0.097
2	1.974	0.457	3.661
3	non è stato usato		
4	-1.324	2.433	-5.252
5	-0.786	-0.787	2.793
6	0.126	0.809	1.242
7	0.939	-0.689	0.199
8	0.535	-0.085	1.035
9	-1.002	-1.047	-3.777

(s)

Point ID 8096	X residual	Y residual	Z residual
1	2.884	-0.268	5.209
2	-0.029	-1.188	-1.556
3	-2.055	-0.336	-1.078
4	-1.639	0.637	-7.117
5	non è stato usato		
6	0.906	-0.301	1.38
7	0.769	0.854	0.401
8	-0.886	1.145	0.874
9	0.05	-0.542	1.884

(t)

Point ID 8098	X residual	Y residual	Z residual
1	-3.019	1.834	11.157
2	1.476	-4.507	-11.749
3	non è stato usato		
4	-4.173	-1.614	-1.093
5	3.787	-2.057	-2.095
6	2.18	-0.857	5.797
7	-2.82	4.327	-6.799
8	2.616	1.389	5.246
9	-0.047	1.485	-0.464

(u)

Tabella 4.2: residui sui punti d'appoggio dei fotogrammi del 1954 (a-d); e del 1978 (e-u)

ID Immagine	σX (m)	σY (m)	σZ (m)
1907	8.3	8.8	4
1908	10.9	10.5	4.8
5157	10.6	13.1	3.3
5158	9	9.3	3.7
7988	1.1	1.3	3.1
7989	1.2	0.9	2.6
7992	1.3	1.4	4
7994	2.2	1.3	3.4
8024	1	1.5	2.5
8026	2.4	2.1	6.2
8027	1.3	1.7	3.1
8054	5	2.4	4.7
8056	1.8	1.7	3.8
8060	0.8	1	1.3
8091	2	1.8	5
8093	0.7	0.4	1.3
8094	1	1.1	2.9
8096	1.5	0.7	3.3

Tabella 4.3: residui della triangolazione aerea sulle coordinate dei GCP (Ground Control Points) per le immagini del volo RER e GAI.

Dall'analisi dei residui si sono riscontrati, specialmente per i fotogrammi del volo *GAI*, dei valori più elevati in corrispondenza dei *PFA* (Punti Fotogrammetrici di Appoggio) vicino ai bordi dei fotogrammi, molto probabilmente a causa dell'influenza dell'effetto di distorsione radiale, che, come visto, non è stato possibile eliminare con le informazioni a disposizione.

4.3.5 L'ortofotogramma finale

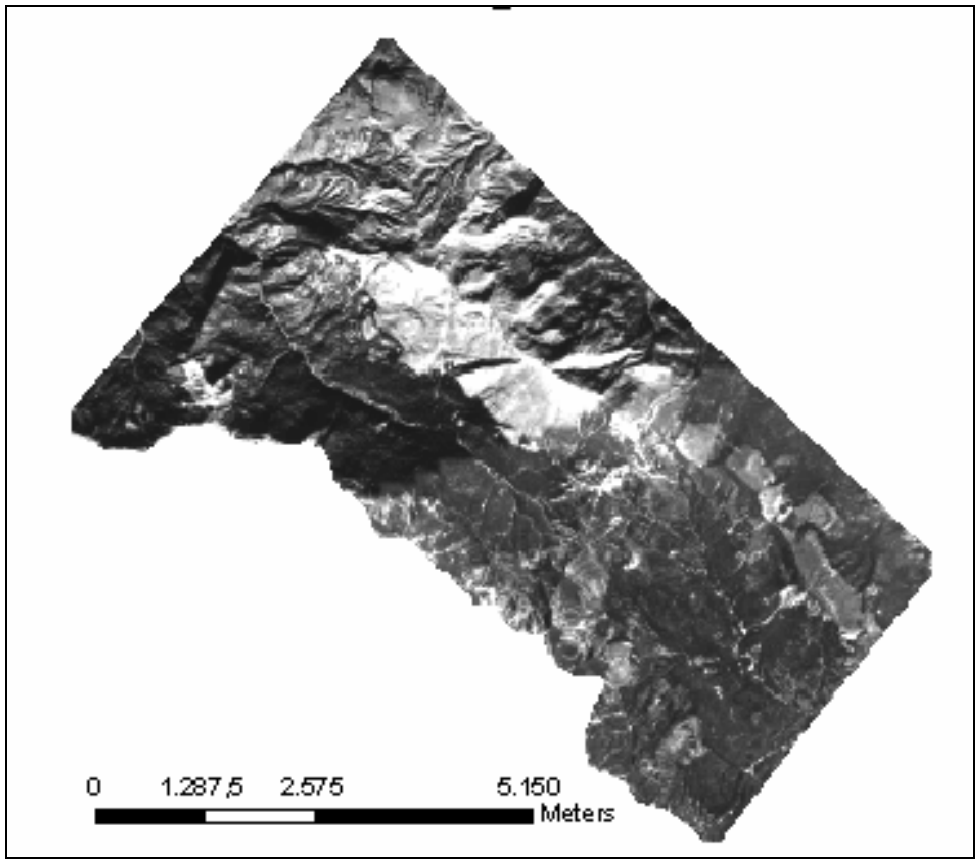
I fotogrammi orientati secondo la procedura fin qui descritta sono stati utilizzati per creare l'ortofotogramma finale, ossia un fotogramma esente da tutti i vari tipi di deformazione indotti dalla proiezione centrale, con cui una normale fotografia viene generata, e dagli effetti dell'altimetria.

A tal fine è necessario fornire un'informazione di tipo altimetrico e per tale ragione è stato utilizzato il *DTM* della zona di interesse, determinato per interpolazione lineare delle curve di livello in formato vettoriale ricavate dalla CTR a disposizione.

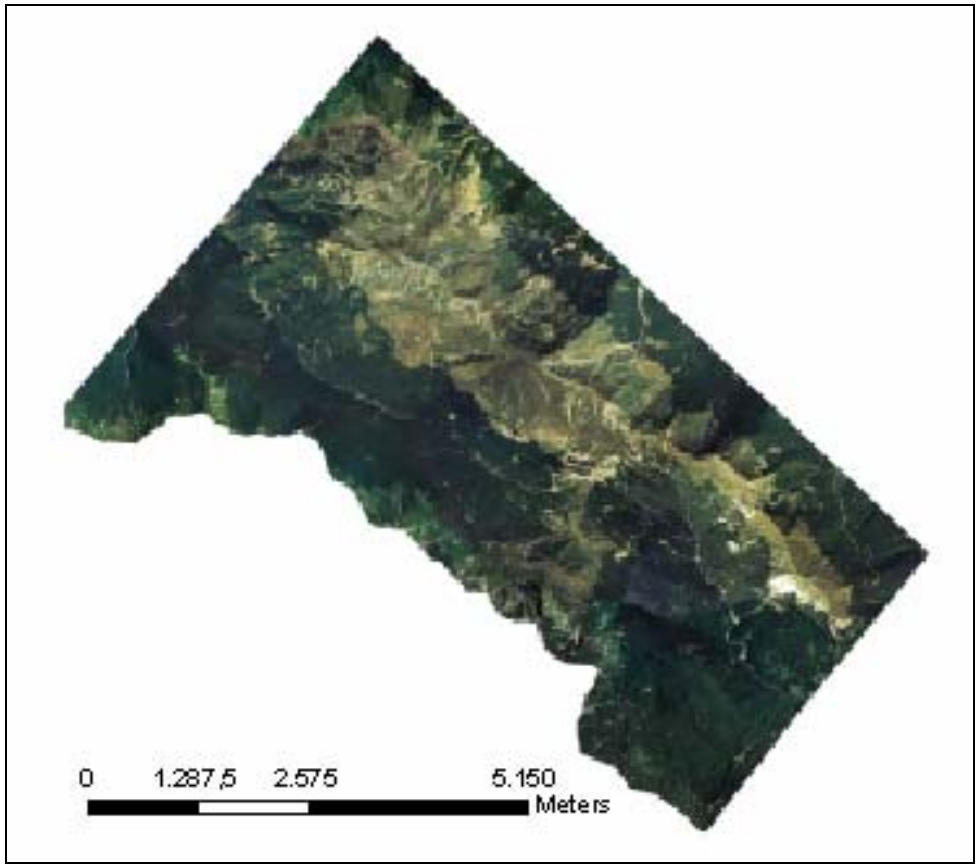
A questo punto si è passati al processamento dei dati attraverso il *software Socet-Set*; il prodotto finale, riportato in figura 4.7, è stato ottenuto mediante mosaicatura dei singoli ortofotogrammi ottenuti.

Occorre precisare che l'immagine mosaicata, generata mediante ricampionamento bilineare in un'unica fase di orientamento e mosaicatura, è caratterizzata nel caso delle foto del '54 da una dimensione del *pixel* a terra (*GSD, Groung Sample Distance*) pari a 2 metri, ossia ogni singolo elemento costituente l'immagine equivale ad una lunghezza sul terreno pari a 2 metri per 2 metri, mentre nel caso del volo *RER* da una dimensione pari a 1,2 metri.

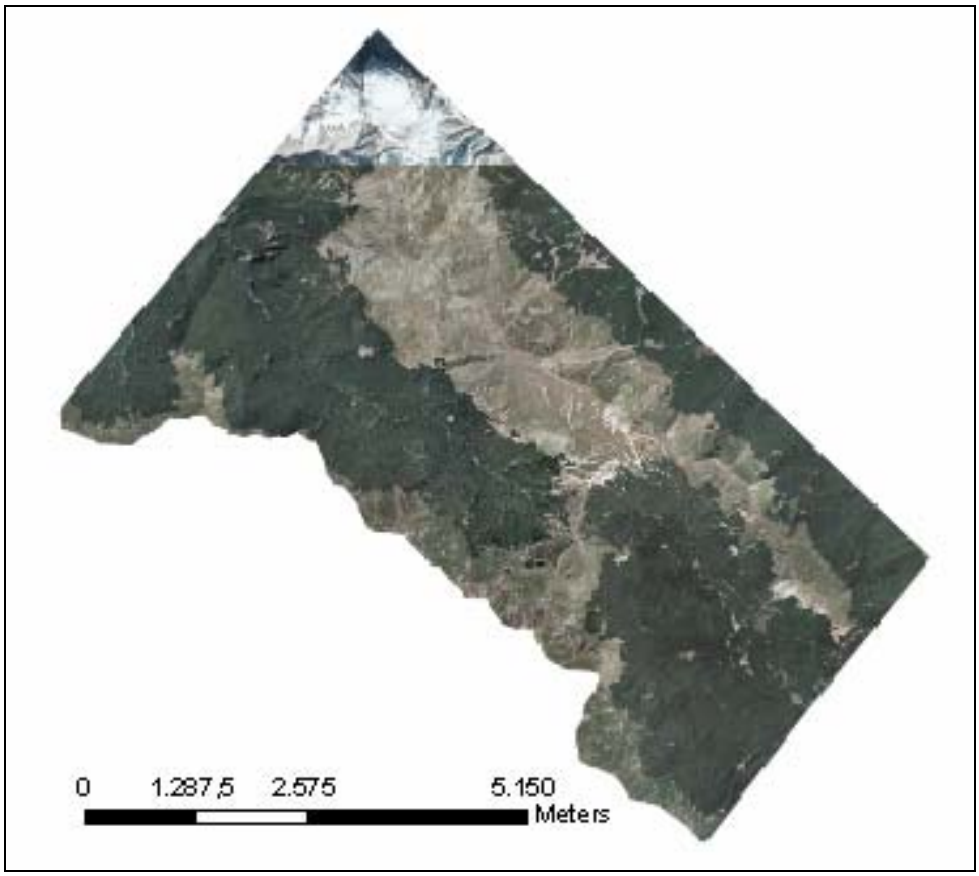
Nella figura 4.7 (c) è stato riportato il mosaico delle ortofoto digitali del Volo IT2000 che è stato utilizzato per il confronto multitemporale con gli ortofotogrammi mosaicati degli altri voli (Figura 4.7 (a) e (b)).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: ortofotogramma finale mosaicato dei voli GAI (a), RER (b) e IT2000 (c), relativo all'area studiata.

4.4 ELABORAZIONI EFFETTUATE

L'attuale limite altitudinale del bosco nell'area Prado-Cusna si sviluppa per $140-150 Km$ circa. Il limite si presenta generalmente netto (Figura 4.2(a)), ma si possono osservare individui isolati e/o in piccoli gruppi. L'ambito altitudinale in cui è possibile evidenziare il limite è compreso fra i $1538 m$ e i $1804 m$ (Figura 4.8); la maggior parte (*80%*) della sua estensione si sviluppa tra quote comprese fra i $1651 m$ e i $1775 m$. Prevalgono le esposizioni (Figura 4.9) nord-orientali (*23%*), settentrionali (*17%*) e orientali (*15%*); la maggior parte del limite del bosco si trova in siti ad elevata pendenza media (Figura 4.10).

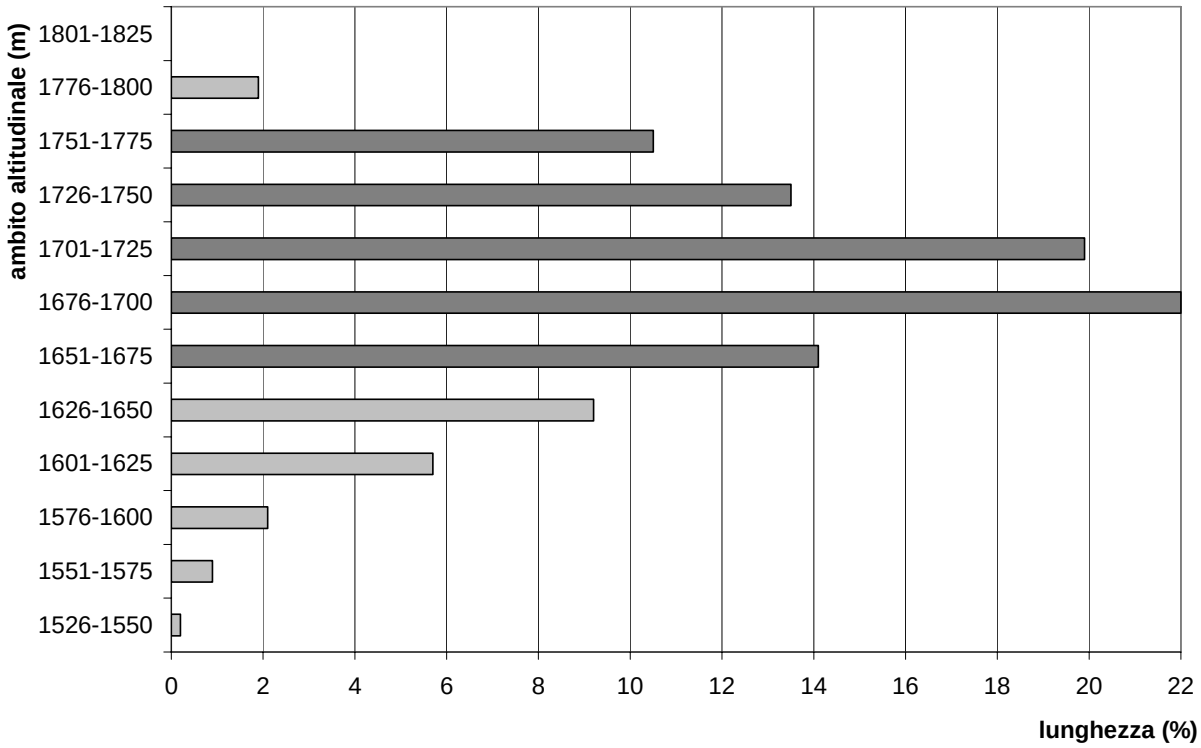


Figura 4.8: limite altitudinale del bosco nel gruppo Prado-Cusna. Distribuzione alle diverse quote (dati del 2000).

Figura. 4.9: limite altitudinale del bosco nel gruppo Prado-Cusna (dati del 2000). Distribuzione delle esposizioni.

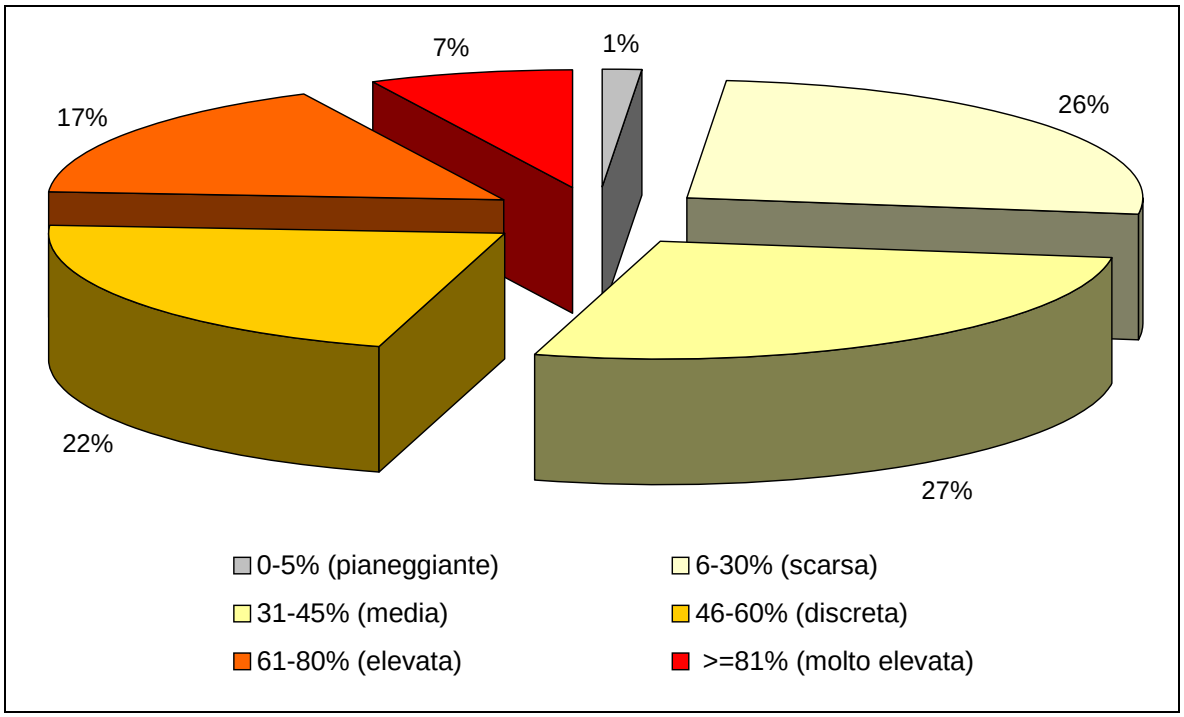
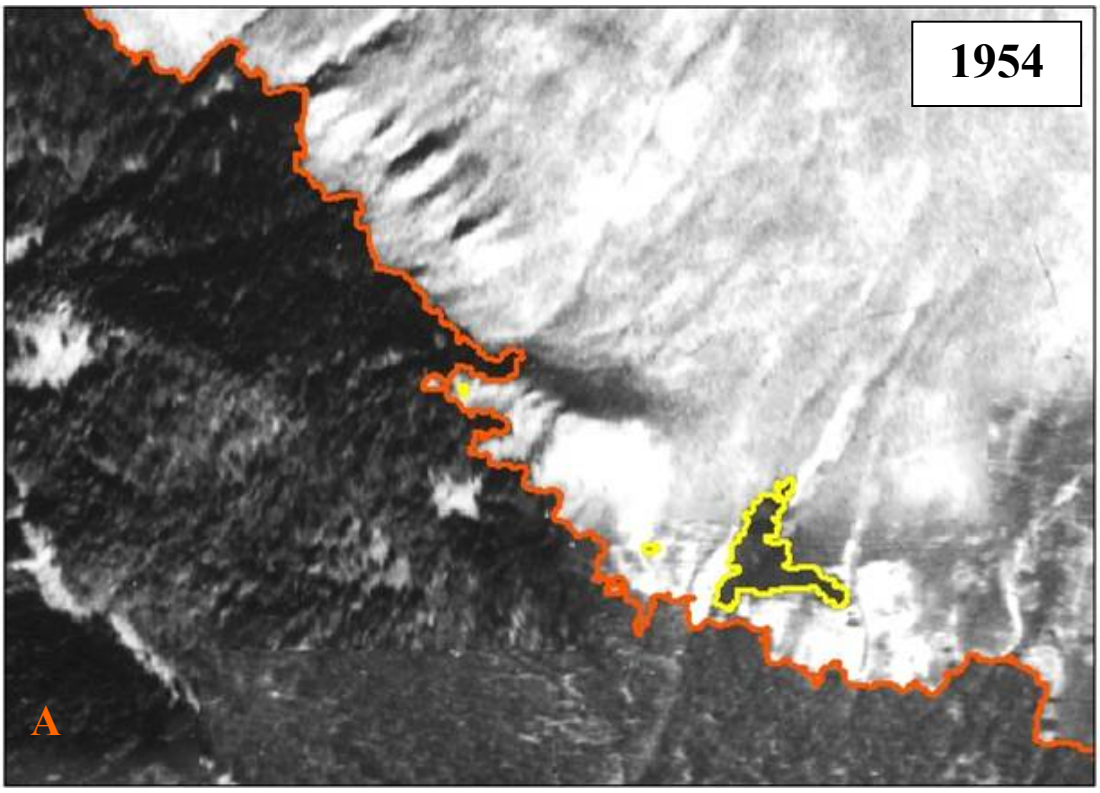


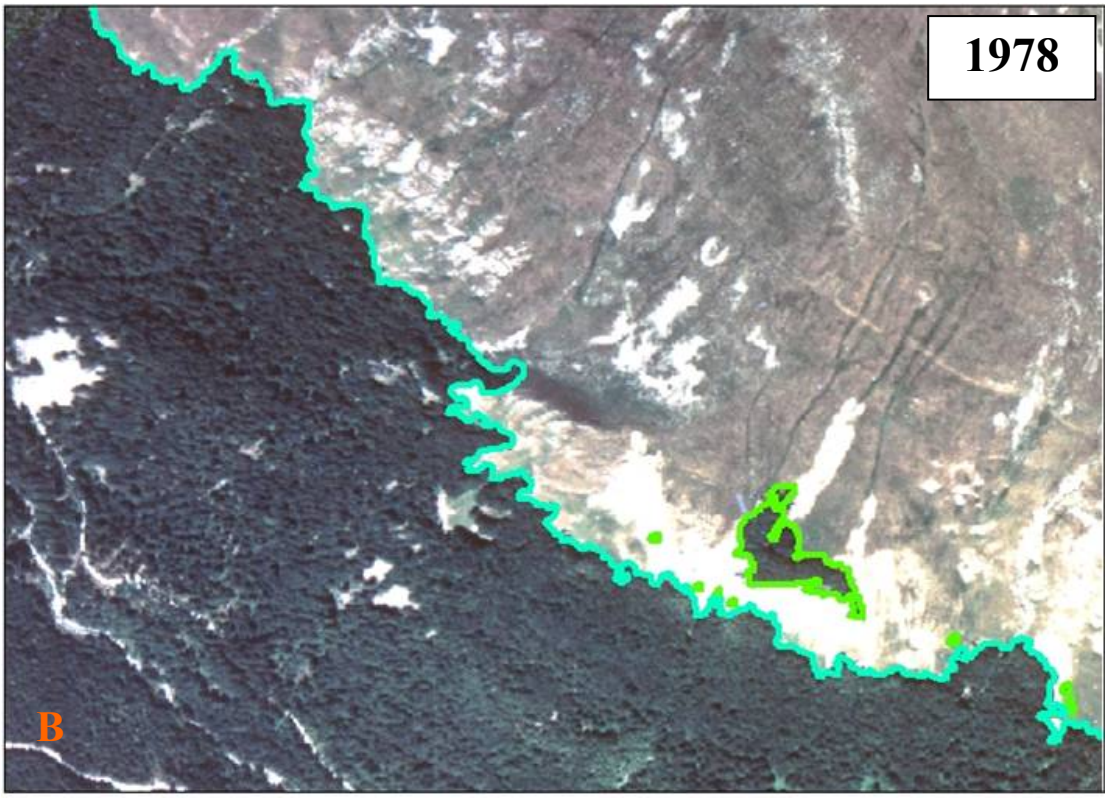
Figura. 4.10: limite altitudinale del bosco nel gruppo Prado-Cusna (dati del 2000). Distribuzione delle pendenze medie.

E' difficile descrivere la variazione del limite del bosco dal 1954 ad oggi utilizzando un sistema automatico di classificazione, sia a causa della differenza di scala dei voli sia per la bassa qualità dei fotogrammi del 1954, la cui analisi richiede una interpretazione manuale a video. Le ortofoto del 2000 mostrano (Figura 4.11(c)) una debolissima variazione del limite altitudinale del bosco rispetto agli ortofotogrammi del '54 (Figura 4.11(a)) e del '78 (Figura 4.11(b)). Dal 1954 al 2000 i maggiori cambiamenti possono essere osservati nella fascia immediatamente sottostante il limite e sono effetto di una ricolonizzazione della vegetazione forestale in "chiarie". Gli unici cambiamenti rilevanti possono essere evidenziati in alcuni siti in seguito a riforestazione a conifere (*Pezzi et al., 2007).*

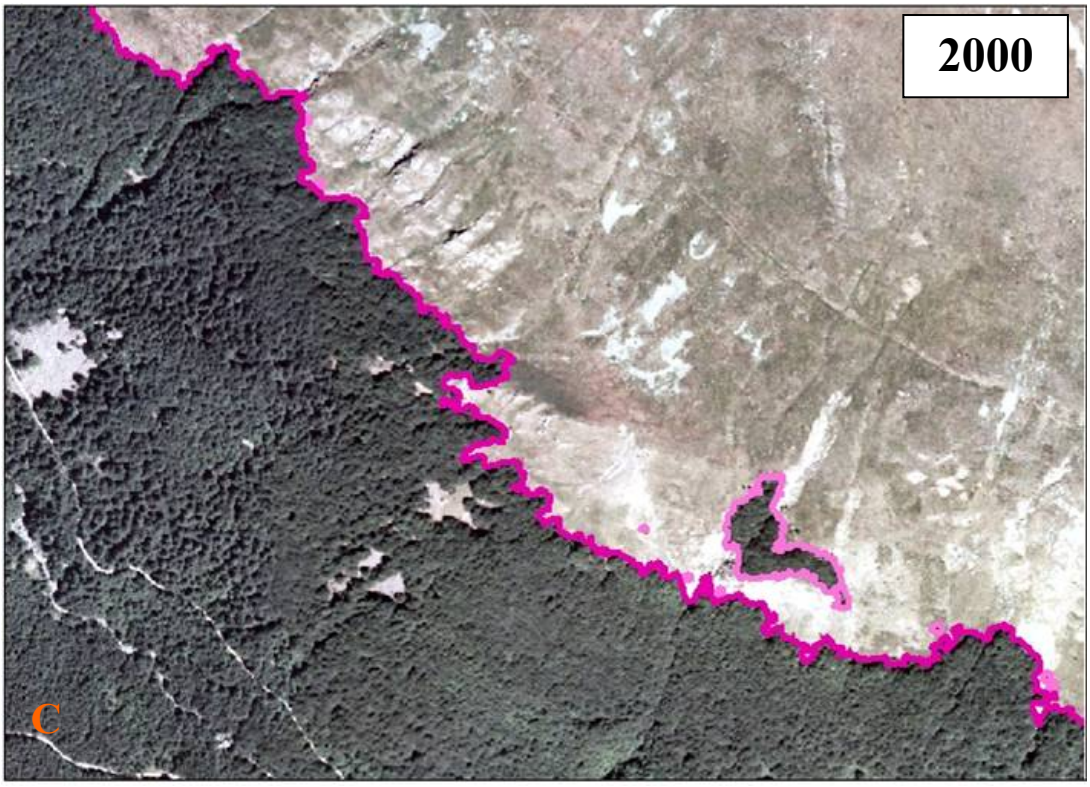
Confrontando i valori in tabella 4.3 si nota come ci sia una differenza di circa un ordine di grandezza fra i residui delle coordinate planimetriche dei voli del '54 e del '78, dovuta principalmente alla scarsa qualità dei fotogrammi più vecchi e alla conseguente difficoltà di individuare con precisione i *GCP*; per questo il confronto multitemporale, da un punto di vista statistico, è avvenuto solamente fra gli ortofotogrammi del 1978 e del 2000.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.11: il limite del bosco nel versante meridionale del Monte Cusna. Ortofoto del 1954 (a); 1978 (b); 2000 (c). Vengono evidenziati anche gli alberi o i gruppi di alberi isolati. Le immagini si riferiscono all'area di figura 4.2.

I residui più precisi e stabili della triangolazione aerea sui fotogrammi del volo *RER* hanno consentito una accurata descrizione della variazione del limite del bosco nell'ultimo ventennio. Nell'ipotesi cautelativa di considerare sia sui fotogrammi del 1978 che del 2000 un errore dell'ordine di circa $\pm 4m$, si sono ottenuti dal confronto fra i due *dataset* i risultati riportati in Figura 4.12.

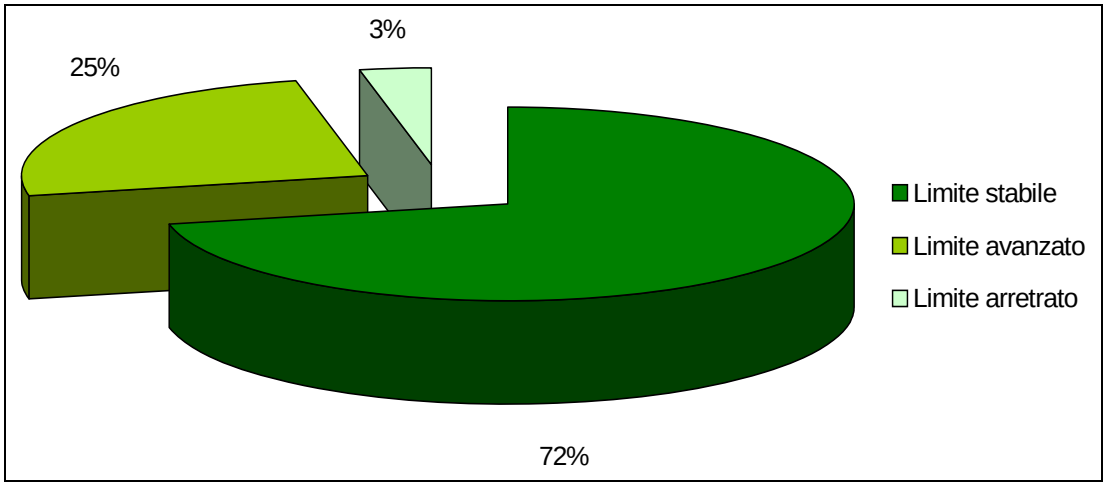


Figura 4.12: variazioni altitudinali del limite del bosco (1978-2000) in termini percentuali.

Nell'ambito dell'ipotesi fatta, per il 72% della lunghezza del limite del bosco non è possibile affermare con certezza un effettivo spostamento, per il 25% si può constatare uno spostamento verso quote superiori, ed infine per il rimanente 3% si ha una variazione verso quote inferiori. Pur nella loro approssimazione i dati confermano una prevalente stabilità del limite altitudinale del bosco, con una percentuale comunque non trascurabile di avanzamento del bosco verso quote più elevate.

4.5 CONSIDERAZIONI

I dati riguardanti l'ambito altitudinale de limite del bosco nell'area del gruppo del Prado-Cusna lo localizzano tra i $1538m$ e i$1804m$, in accordo con quelli di *Bernetti* (*1998*) che situano il limite altitudinale del bosco nell'Appennino settentrionale a quote comprese tra i $1600-1800m$. *Ferrari e Piccoli* (*1997*), *Lausi e Pignatti* (*1973*) suggeriscono dei valori un po' più alti ($1700-1800m$). Questa opinione concorda con l'interpolazione di dati meteorologici riferiti alle zone temperate a *44°N* di latitudine (*Körner, 1998*).

La geomorfologia gioca un ruolo fondamentale nel determinare questa ampia distribuzione altitudinale. Inoltre, il limite altitudinale del bosco mostra aspetti peculiari (Figura 4.2) in relazione a differenti condizioni di sito e micro-sito (aree ricche/povere di neve, calde/fredde, ventose/protette dal vento esposte al sole/protette dal sole) e microtopografiche (convesse/concave).

Gli strumenti della fotogrammetria digitale hanno permesso l'uso di dati storici digitalizzati per un confronto con immagini recenti al fine di individuare eventuali cambiamenti nel limite del bosco.

In questo tipo di analisi devono essere considerate le differenti caratteristiche e i problemi legati all'uso di fotogrammi storici rispetto a quelli più recenti. Nel caso in esame, le immagini del volo *GAI* (1954) sono relativamente di bassa qualità e non sono stati reperiti i dati necessari ad un loro orientamento interno rigoroso. Esse tuttavia costituiscono un documento storico

imprescindibile in quanto rappresentano il primo volo che ha coperto quasi tutto il territorio italiano.

Si è rilevato in generale che, se da una parte sono preferibili immagini più nadirali possibile per l'applicazione di algoritmi di *change detection*, dall'altra l'interpretazione visuale è semplificata usando immagini non nadirali, che permettono, ad esempio, di riconoscere le altezze degli alberi, la loro tipologia e condizione, analizzando le ombre degli stessi; la presenza di ombre rende tuttavia difficoltosa la definizione di una procedura automatica per la classificazione delle coperture boschive.

Dall'analisi visiva del limite del bosco dal 1954 al 2000 se ne deduce una sostanziale stabilità nell'andamento. Un'analisi più precisa per individuare eventuali cambiamenti nell'ambito altitudinale del limite è stata condotta fra le foto del 1978 e del 2000 – escludendo dall'analisi le immagini del '54 per la loro scarsa qualità.

Il risultato ha evidenziato un leggero spostamento del limite verso quote più elevate. Sul versante meridionale del monte Cusna (Figura 4.2(b); Figura 4.11) questo risultato è conforme a quello ottenuto con analisi dendrocronologiche effettuate sul campo. Gli alberi al limite altitudinale del bosco hanno la stessa età o addirittura sono un poco più vecchi di quelli posti a quote più basse. Su questo versante le ultime operazioni di gestione del bosco datano XIX secolo e, fino a qualche decennio fa, il limite del bosco è stato utilizzato come fascia di confine tra i pascoli alti e i boschi sottostanti. Plantule di faggio sono state osservate al di sotto della chioma delle piante madri al limite del bosco. Questo fenomeno non è rilevabile alla scala delle immagini, ma documenta l'inizio di una lenta risalita altitudinale del bosco da monitorare ad un livello di scala più dettagliato. Gli ortofotogrammi rivelano i maggiori cambiamenti di copertura forestale nella fascia immediatamente sottostante al limite del bosco per effetto di diminuite utilizzazioni e di riforestazioni da ritenersi spontanee.

E' stato stimato (*Mercalli et al., 2003*) che tra il 1951 e il 2002 la temperatura media nell'Appennino settentrionale sia aumentata di 1.3°C, mentre sulle Alpi di circa 1.0°C (*Bohm et al., 2001*). Dopo la metà del 1980 si è avuto un

riscaldamento ancora in atto. Il limite del bosco, tuttavia, non riflette questa tendenza. Questo perché nelle aree montuose fortemente influenzate dall'impatto antropico, come nel caso dell'Appennino settentrionale, gli effetti negativi dell'azione umana, storica e recente, sul limite altitudinale del bosco tendono a compensare gli effetti del riscaldamento climatico (*Woodward, 1998*, *Holtmeier e Broll, 2005*). Questo limite, quindi, tende a descrivere la storia dei luoghi piuttosto che le attuali condizioni climatiche a causa del "*long life span*" degli alberi costituenti il limite del bosco e dell'inerzia che ne risulta nella comunità forestale. I dati dendrocronologici di *Ferrari et al*. (*2005*), relativi all'area di studio, supportano questa idea.

Il monitoraggio delle variazioni del limite altitudinale del bosco è, per questi motivi, un'analisi ambientale di lungo periodo. La creazione di banche dati georeferenziate, come nel caso di interesse, è cruciale per il successo delle analisi. Per questo è necessario ampliare la base dati mediante immagini ricavate da cartografia catastale storica e da immagini satellitari a differente risoluzione.

5 IL CASO DI STUDIO DEL MONTE GIOVO

5.1 INTRODUZIONE

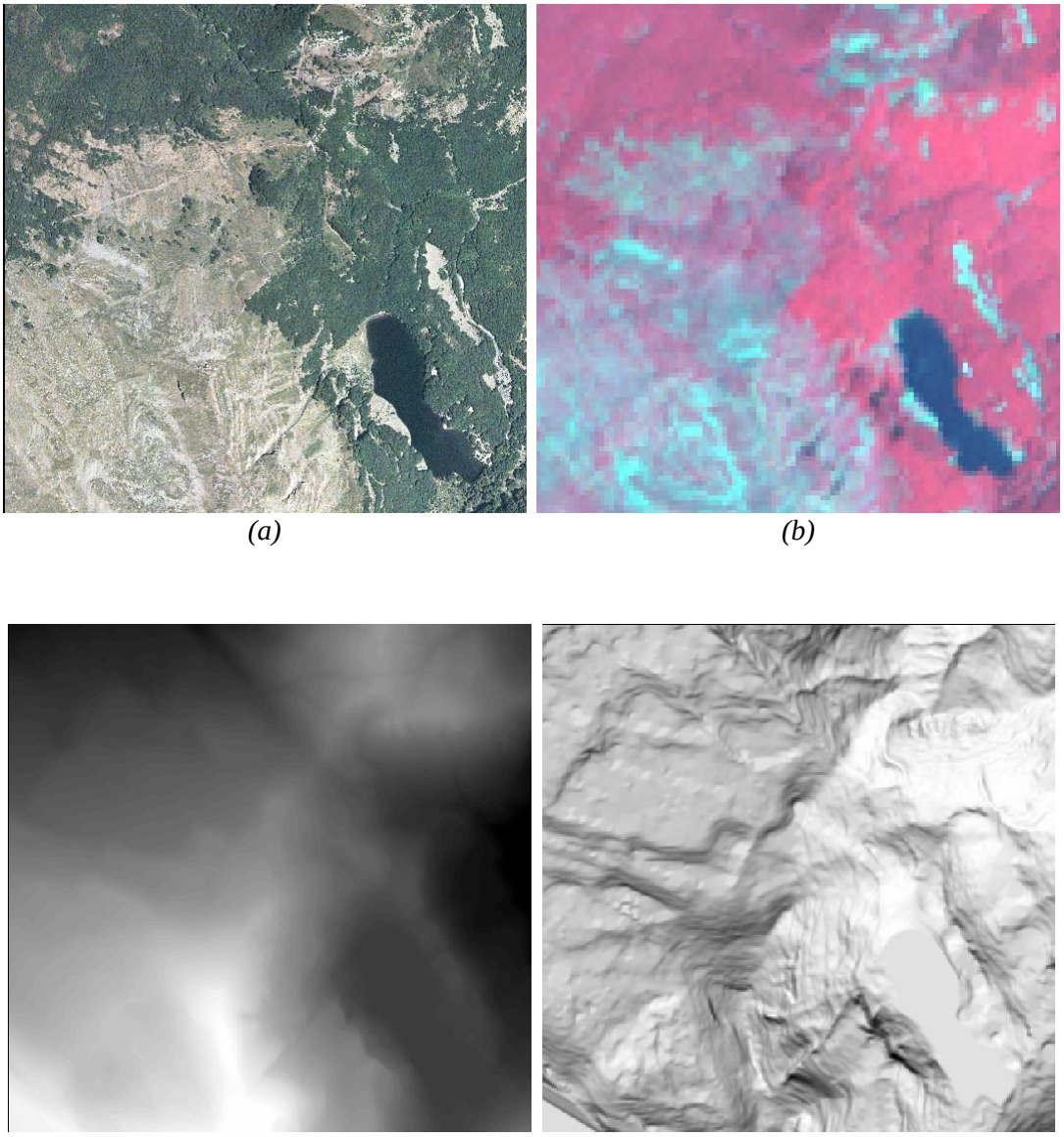
Le tecniche di classificazione delle immagini sono l'obiettivo principale di questo capitolo. In particolare vengono affrontate le procedure si classificazione *object-based*, utilizzando il *software eCognition Professional 4*.0 di *Definiens Imaging*, basate su una preventiva segmentazione delle immagini in poligoni/oggetti significativi.

Si è scelto un approccio ad oggetti in quanto negli ultimi anni si è dimostrato, sia sulla base di esperienze in letteratura (*De Kok et al., 1999, Rego, 2003, Benz et al., 2004, Gusella et al., 2005, Bitelli et al., 2005*) sia in occasione di diversi convegni nazionali e internazionali, più efficace nell'estrazione delle coperture al suolo rispetto ai metodi classici basati sui *pixel*.

Il lavoro è stato suddiviso in tre fasi. Nella prima sono stati valutati diversi valori dei parametri di segmentazione, utilizzando le 3 classi di copertura principali, sulla base del confronto con una classificazione di riferimento. Il risultato migliore è stato usato come punto di partenza della fase 2, in cui si è voluto verificare come cambiassero i risultati di una classificazione supervisionata al variare del numero di *sample* di *training*. Infine, nella terza fase si è cercato di estrarre i diversi tipi di coperture, concentrandosi in particolare sulla vegetazione soprasilvatica.

In quest'ultima fase si sono utilizzate tutte le immagini disponibili (Figura 5.1), costituite da ortofoto aeree del volo IT2000, immagini satellitari *ASTER*, *DTM* e suoi derivati (*aspect, slope, shaded relief*), cercando di determinare la

migliore combinazione di questi dati al fine di ottenere valori di accuratezza il più elevati e stabili possibile.



(a) *(b)*

(c) *(d)*

Figura 5.1: (a) ortofoto aerea RGB del volo IT2000; (b) immagine ASTER bande 321; (c) DTM; (d) mappa di "ombreggiatura"(shaded relief), ottenuta dal DTM una volta noti l'elevazione e l'azimut del Sole; queste informazioni si ricavano dai dati contenuti nel metafile che accompagna le immagini satellitari ASTER.

Per quanto riguarda le immagini *ASTER* la tabella 5.1 riporta le caratteristiche principale del sistema.

Subsystem	Band No.	Spectral Range (µm)	Spatial Resolution, m	Quantization Levels
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
	9	2.360-2.430		
TIR	10	8.125-8.475	90	12 bits
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

Tabella 5.1:caratteristiche dei 3 sistemi di sensori ASTER. (Fonte: Aster Users Handbook)..

Per gli obiettivi preposti si è deciso di considerare il solo sistema *VNIR*, costituito anche da bande nell'infrarosso e caratterizzato dalla risoluzione spaziale più elevata fra i tre sistemi *ASTER*. Si è scelto di utilizzare questa tipologia di dati in quanto gli unici, al momento del lavoro, disponibili contenenti informazioni multispettrali nel campo dell'infrarosso, zona dello spettro molto sensibile alla presenza di vegetazione. L'unico inconveniente derivante dalla loro integrazione con le immagini aeree è rappresentato dalla diversa risoluzione spaziale (*15m* delle immagini *ASTER* contro *1m* delle ortofoto); per questo le prove effettuate nella terza fase hanno avuto anche lo scopo di verificare se il beneficio derivante dalla maggior quantità di informazioni multispettrali venisse meno a causa della peggiore risoluzione spaziale.

Il caso di studio riguarda il versante emiliano del gruppo del monte Giovo ($1.991m$) nell'alto Appennino Modenese (Figura 5.2), in cui il limite altitudinale del bosco coincide con il limite superiore delle formazioni forestali di faggio (*Fagus sylvatica*). In particolare viene affrontata la classificazione della vegetazione soprasilvatica, dominata da brughiere a mirtilli e praterie con prevalenza di quelle secondarie a nardo e brachipodio. In alcune aree sono inoltre

presenti comunità che colonizzano accumuli detritici stabilizzati e le rupi arenacee.

Figura 5.2: veduta del Gruppo del Monte Giovo.

5.2 SEGMENTAZIONE E CLASSIFICAZIONE

La segmentazione non è una tecnica nuova, ma esiste da molti anni (*Haralick et al., 1973*). A causa della possibilità di segmentare una immagine in molti modi diversi, un suo utilizzo pratico è stato inizialmente molto difficoltoso, per questo si è sentita la necessità di ridurre l'elevato numero di gradi di libertà a pochi parametri significativi e specifici per un obiettivo quale la classificazione delle immagini.

Il processo di classificazione di immagini digitali in un *software* ad oggetti implica una pre-classificazione dell'immagine basata sulle caratteristiche di omogeneità della stessa. Questo processo è denominato segmentazione ed implica la costituzione di poligoni ("oggetti simili"), sulla base dei valori assunti da parametri spettrali e di forma (*Herold et al., 2002*). Questi oggetti permettono una generalizzazione dell'immagine da classificare (Figura 5.3).

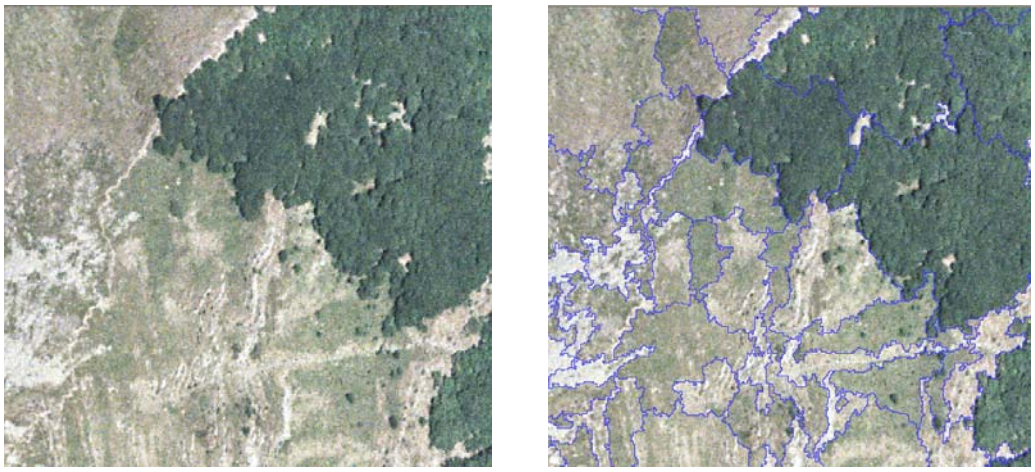


Figura 5.3: a sinistra un'ortofoto del volo IT2000 non segmentata; a destra gli oggetti ottenuti dalla segmentazione della stessa immagine.

Il processo di segmentazione coinvolge diversi parametri fra loro interconnessi (*eCognition User Guide, 2004*). Per primo occorre stabilire il parametro *scale*, che determina la dimensione media degli oggetti che saranno creati. In altre parole, se il valore di *scale* è 20, significa che gli oggetti prodotti conterranno almeno 20 *pixel*, con differenti valori, che saranno raggruppati a formare un oggetto, in termini vettoriali, una *feature*. In questo modo, in quella parte di una immagine caratterizzata da elevata omogeneità, come in un campo, si genereranno oggetti relativamente grandi, mentre dove è presente una elevata eterogeneità, come in una foresta, si produrranno oggetti relativamente piccoli, come si può vedere in figura 5.4.

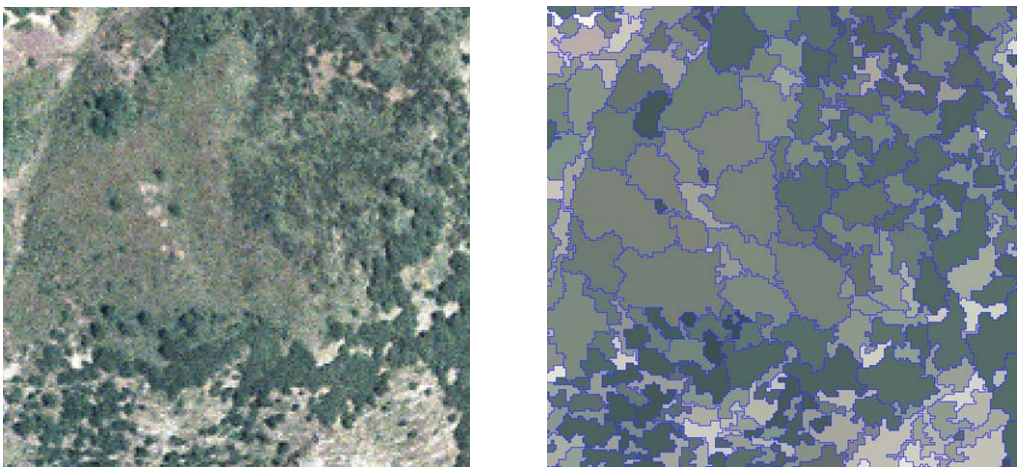


Figura 5.4: l'immagine a sinistra è costituita da zone di terreno omogenee e da zone a foresta eterogenee. Il risultato della segmentazione, a destra, mostra oggetti più grandi per le aree di terreno e oggetti più piccoli per quelle a foresta.

Dal punto di vista matematico il parametro *scale* si può esprimere come segue:

$$Scale = w_{color} \cdot h_{spectral} + (1 - w_{color}) \cdot h_{shape}$$

Il valore *scale* è quindi una media pesata (w_{color} esprime il peso) tra un fattore di eterogeneità spettrale ($h_{spectral}$) ed un valore di eterogeneità di forma (h_{shape}). Se si pone w_{color} pari ad 1 significa dare peso solamente all'eterogeneità spettrale, mentre se si pone uguale a 0 si privilegia solo la forma. Il fattore spettrale (o di colore) $h_{spectral}$ si definisce come la sommatoria della deviazione standard (σ_c) dei *pixel* costituenti un oggetto, moltiplicata per un fattore di peso relativo alle diverse bande (w_c). Grazie a questo è possibile utilizzare dati provenienti da fonti diverse, caratterizzate da differenti risoluzioni spaziali e radiometriche, come, ad esempio, un *DTM* insieme ad una immagine multispettrale.

$$h_{spectral} = \sum w_c \cdot \sigma_c$$

Anche l'omogeneità di forma (h_{shape}) è una media pesata, mediante il peso $w_{compactness}$, tra un fattore di compattezza ($h_{compact}$) ed un fattore di *smoothness* (h_{smooth}). Il fattore di compattezza è dato dal rapporto tra la lunghezza del perimetro (l) dell'oggetto e la radice quadrata del numero di *pixel* compresi nello stesso (n). Il fattore di *smoothness* è il rapporto tra il perimetro dell'oggetto e il perimetro del *bounding box* (b) che lo contiene.

$$h_{shape} = w_{compactness} \cdot h_{compact} + (1 - w_{compactness}) \cdot h_{smooth}$$

$$h_{compact} = \frac{l}{\sqrt{n}}$$

$$h_{smooth} = \frac{l}{b}$$

(da *Gusella et al., 2005*)

Quindi, come si è visto dalle formule, oltre al parametro *scale* il sistema introduce altri criteri che prendono in considerazione l'omogeneità dell'immagine, chiamati *color* e *shape*. Essi fondamentalmente permetto la creazione di oggetti sulla base di una maggiore o minore influenza legata ai valori di riflettanza dei *pixel* costituenti un oggetto e alla forma dello stesso.

La figura 5.5 rappresenta una zona caratterizzata da terreno incolto e terreno coltivato a vite, in cui è stato possibile discriminare i filari dalle strisce di terreno interfila ponendo un valore di *shape* basso, e di conseguenza un valore di *color* elevato, dando così maggior peso alle informazioni di tipo spettrale (*Vincini e Frazzi*, 2005).

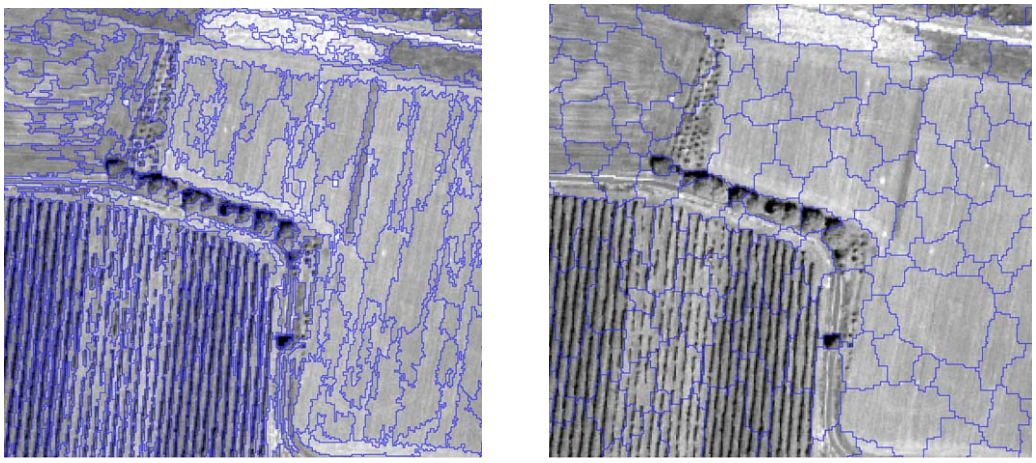


Figura 5.5: variazione nella forma e dimensione degli oggetti creati utilizzando diversi valori dei parametri di color e shape per una immagine QuickBird pancromatica, a parità di scale (=20), compactness (=0.5) e smoothness (=0.5): immagine a sinistra shape = 0.1, color = 0.9; immagine a destra shape = 0.9, color = 0.1;

Di seguito sono riportate in figura 5.6 le differenze fra gli oggetti prodotti utilizzando valori diversi dei parametri *compactness* e *smoothness*, a parità di *scale* (*=20*), *shape* (*=0.9*) e *color* (*=0.1*).

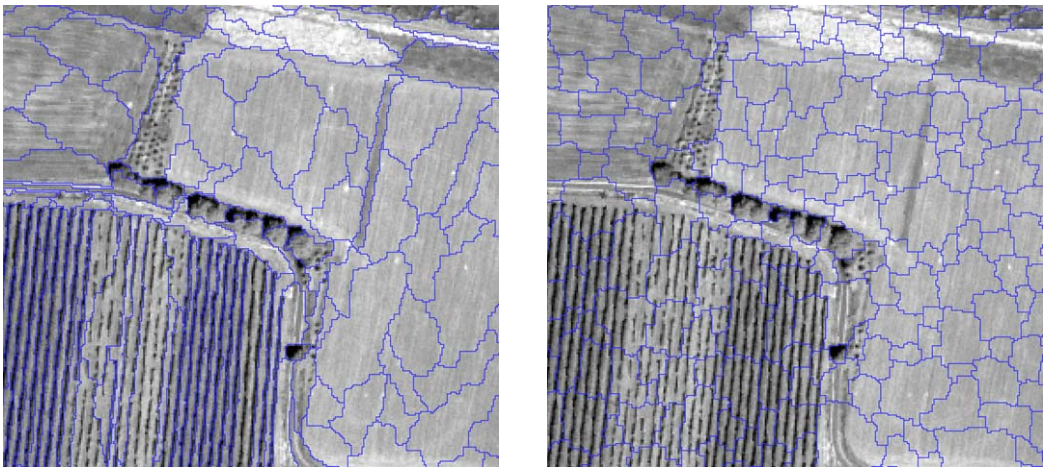


Figura 5.6: variazioni degli oggetti prodotti utilizzando diversi valori dei parametri di compactness e smoothness su un'immagine QuickBird pancromatica: a sinistra compactness = 0.1, smoothness = 0.9; a destra compactness = 0.9, smoothness = 0.1.

Una cosa interessante che si può notare osservando le immagini delle figura precedenti è che si ottengono risultati simili (almeno nell'ottica dell'individuazione di oggetti a filari come i vigneti) con parametri di segmentazione diversi, a parità di *scale*: da una parte, *shape = 0.1*, *color = 0.9*, *compactness = 0.5*, *smoothness = 0.5*; dall'altra, *shape = 0.9*, *color = 0.1*, *compactness = 0.1*, *smoothness = 0.9*.

In pratica, la segmentazione ha lo scopo di formare degli aggregati di *pixel* che corrispondano agli oggetti che si vogliono classificare. In questa maniera la possibilità di settare diversi parametri di scala e di assegnare loro dei pesi permette di percepire come "tangibili" nell'immagine oggetti identificati come "cose" della realtà (*Hofmann, 2001*).

Osservando il territorio, ad esempio, è possibile identificare in una immagine due gruppi principali di oggetti, come un'area boscosa e un'area urbanizzata. Se si ingrandisce la parte osservata si nota la presenza di vegetazione nell'area urbana, ma anche la presenza di edifici nella zona boscosa. Quindi, a seconda di ciò che si vuole ottenere, si identificano livelli di analisi a diverse scale di osservazione.

In *eCognition* si possono creare vari gradi di segmentazione con differenti valori di scala, costituendo un insieme di piani sovrapposti che contengono ognuno oggetti che descrivono le "cose" della realtà a diversi livelli di dettaglio. Un tale gruppo di strati informativi è chiamato *network* gerarchico (*eCognition User Guide, 2004*). La creazione di una gerarchia di questo tipo, costituita da oggetti di diverse dimensioni, permette di sviluppare un processo di classificazione dal generico allo specifico. Il processo si approfondisce da livello a livello in accordo al numero di classi necessarie e al livello di dettaglio richiesto dalla classificazione.

5.2.1. Fase 1

L'obiettivo di questa fase è valutare le classificazioni prodotte a partire da immagini segmentate a differenti livelli di scala e di parametri di *color* e *shape*, utilizzando il classificatore *Nearest Neighbor*.

Si sono scelti i seguenti valori rappresentativi del parametro *scale*: 20, 50, 70 e 100, in quanto ritenuti i più significativi per gli obiettivi prefissati. Per ognuno di essi si sono variati i pesi assegnati agli altri parametri secondo la tabella 5.2.

Prove	shape	compactness	smoothness
A	0.3	0.5	0.5
B	0.3	0.1	0.9
C	0.3	0.9	0.1
D	0.5	0.5	0.5
E	0.5	0.1	0.9
F	0.5	0.9	0.1
G	0.7	0.5	0.5
H	0.7	0.1	0.9
I	0.7	0.9	0.1

Tabella 5.2: prove effettuate per l'analisi dei parametri di segmentazione.

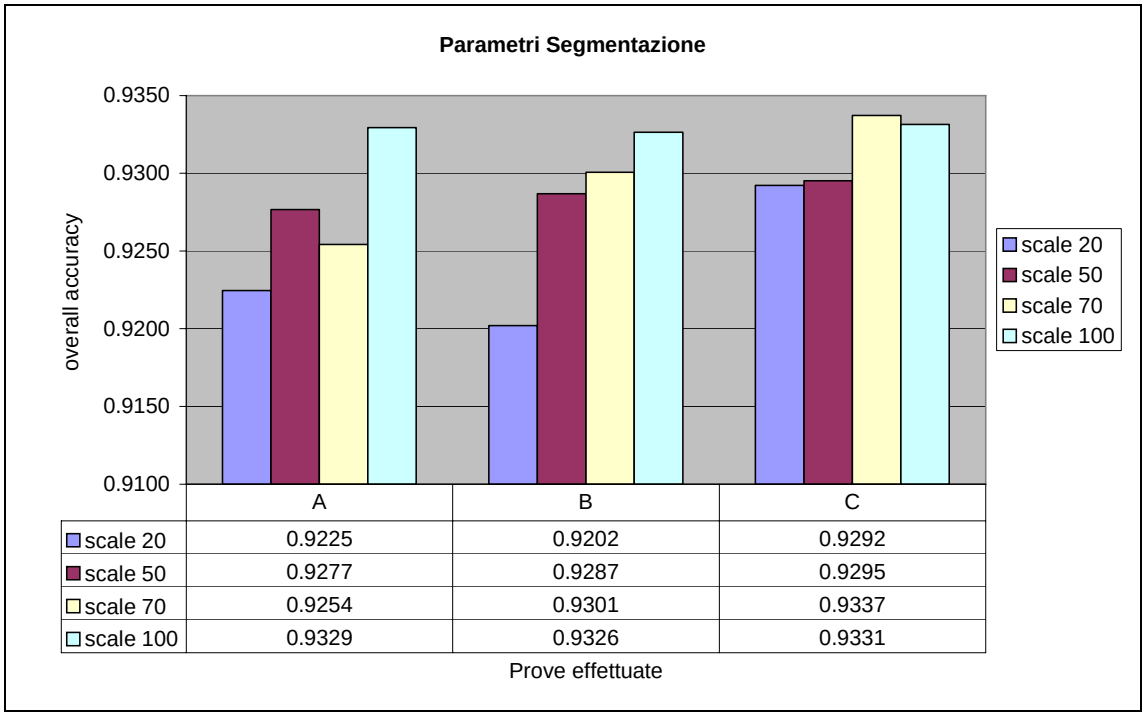
I test sui parametri sono eseguiti sulla base di una ortofoto del volo IT2000; vengono classificate tre classi principali (bosco, non-bosco, acqua) a partire da 4 *sample* significativi per ciascuna. I risultati delle prove sono valutati mediante il procedimento di *accuracy* implementato nel *software*, prendendo come mappa di riferimento la carta della vegetazione della zona per le classi esaminate. Tale carta è stata ottenuta a partire dalla carta originale esistente, corretta in seguito a rilievi fatti sul campo nel 2006 e da fotointerpretazione delle immagini aeree. La sua creazione è avvenuta in ambiente *GIS* sulla base dell'ortofoto precedentemente segmentata e classificata in *eCognition* come spiegato nel paragrafo 5.3.

Tramite il procedimento di verifica dell'accuratezza si vuole determinare quale sia il parametro di scala più adatto per una classificazione al variare del livello di dettaglio della mappa di riferimento. Infatti, la mappa è stata aggiornata per ciascuno dei quattro valori di scala (20, 50, 70, 100), con valori di *shape* e *color* standard, e in seguito utilizzata come base di confronto per l'*accuracy* nei corrispondenti livelli.

Si è applicata una procedura di *accuracy* basata sul confronto con una "maschera" ("*ttamask"*) rappresentante la carta della vegetazione ai diversi livelli; questo significa fare un confronto per area test, ossia un confronto per

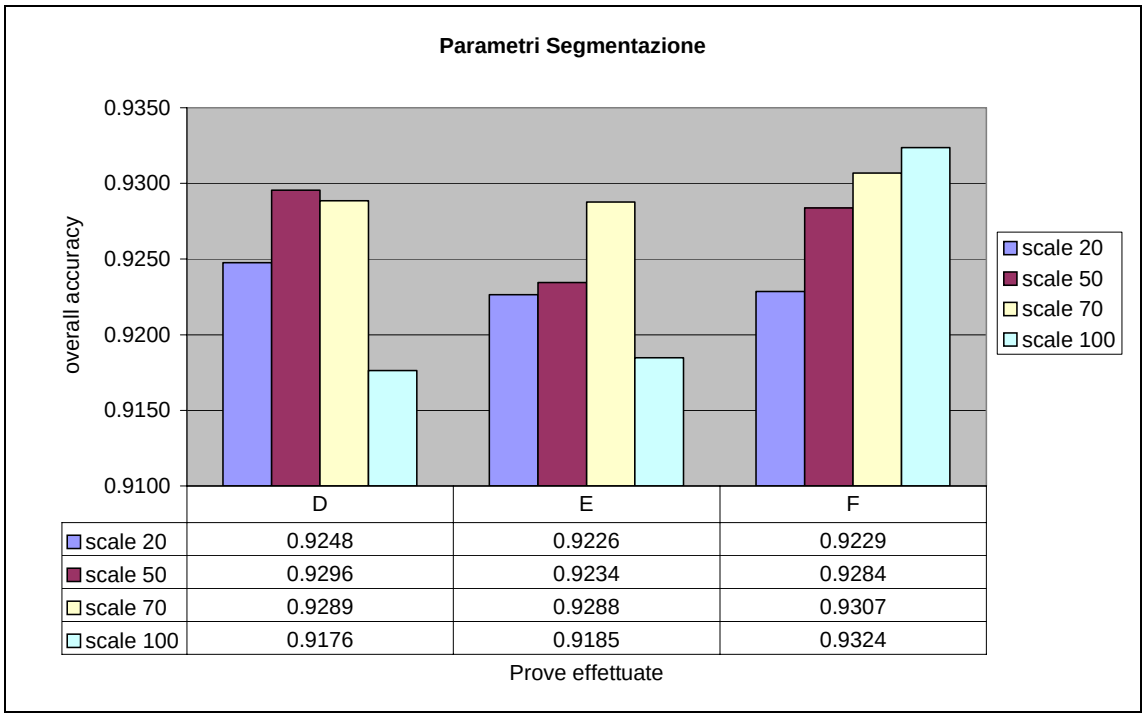
pixel: è sembrata la scelta migliore per definire i parametri di segmentazione che meglio identificano gli oggetti rappresentanti le classi. Infatti, è possibile fare anche una *accuracy* per *sample*, cioè un confronto fra oggetto classificato e oggetto di riferimento; questo vuol dire creare dei *sample* a partire dalla carta della vegetazione, ma tali *sample* saranno diversi a seconda dei parametri di segmentazione usati nelle diverse prove, e perciò, soprattutto nelle zone di confine fra una classe ed un'altra, spesso diventa difficile definire con certezza a quella classe appartiene il poligono di bordo. Questo fatto implica che nelle diverse segmentazioni non si utilizzerà lo stesso numero di *sample* per la procedura di verifica, perché ci saranno ogni volta poligoni diversi, inficiando così l'obiettivo preposto in questa fase.

I grafici seguenti (Figura 5.6) illustrano i risultati ottenuti in termini di accuratezza globale (*overall accuracy*) e indice *K* (*KIA, Kappa Index of Accuracy*).



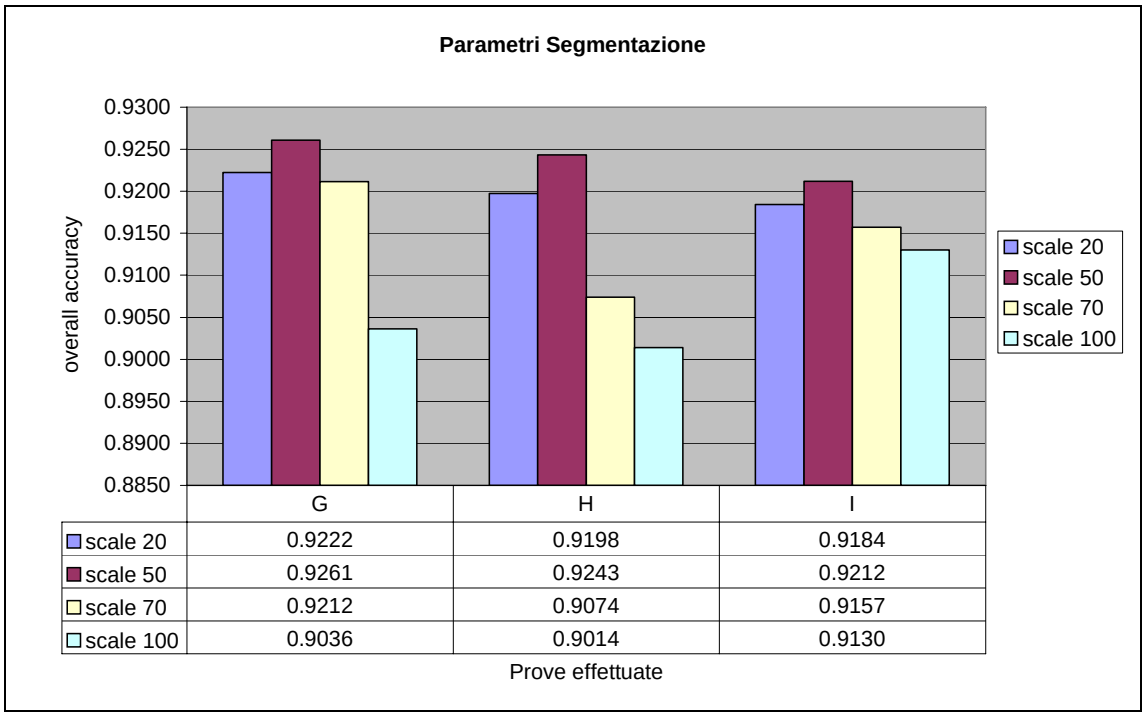
	A	B	C
scale 20	0.9225	0.9202	0.9292
scale 50	0.9277	0.9287	0.9295
scale 70	0.9254	0.9301	0.9337
scale 100	0.9329	0.9326	0.9331

(a)



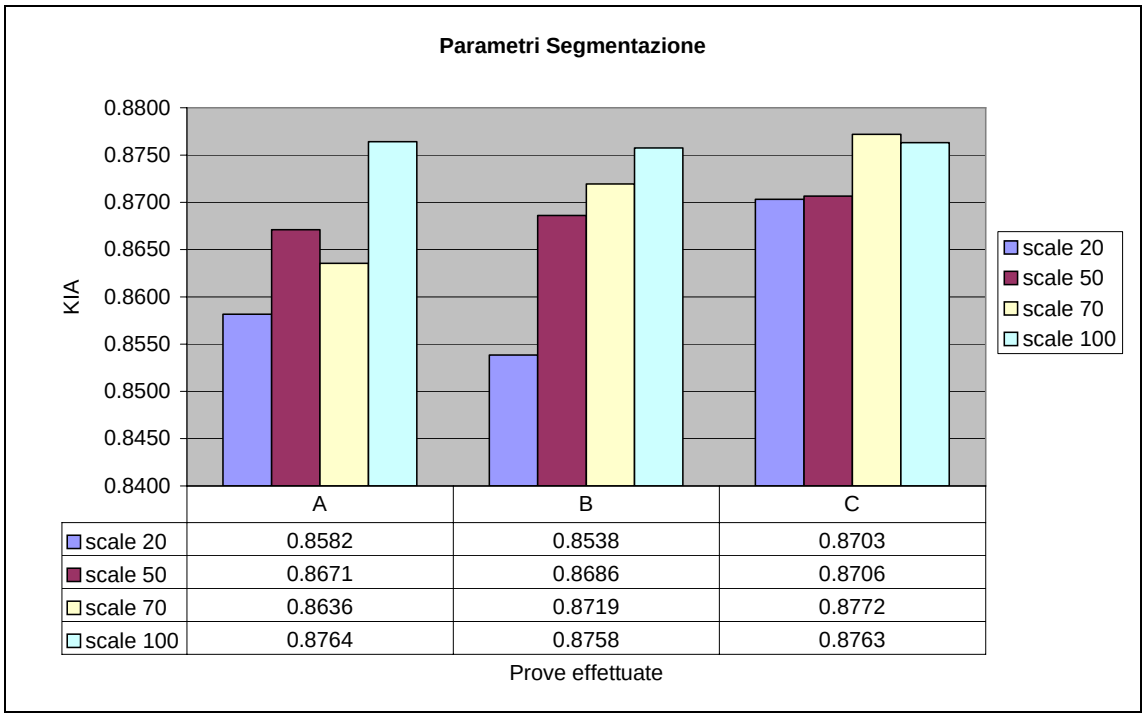
	D	E	F
scale 20	0.9248	0.9226	0.9229
scale 50	0.9296	0.9234	0.9284
scale 70	0.9289	0.9288	0.9307
scale 100	0.9176	0.9185	0.9324

(b)



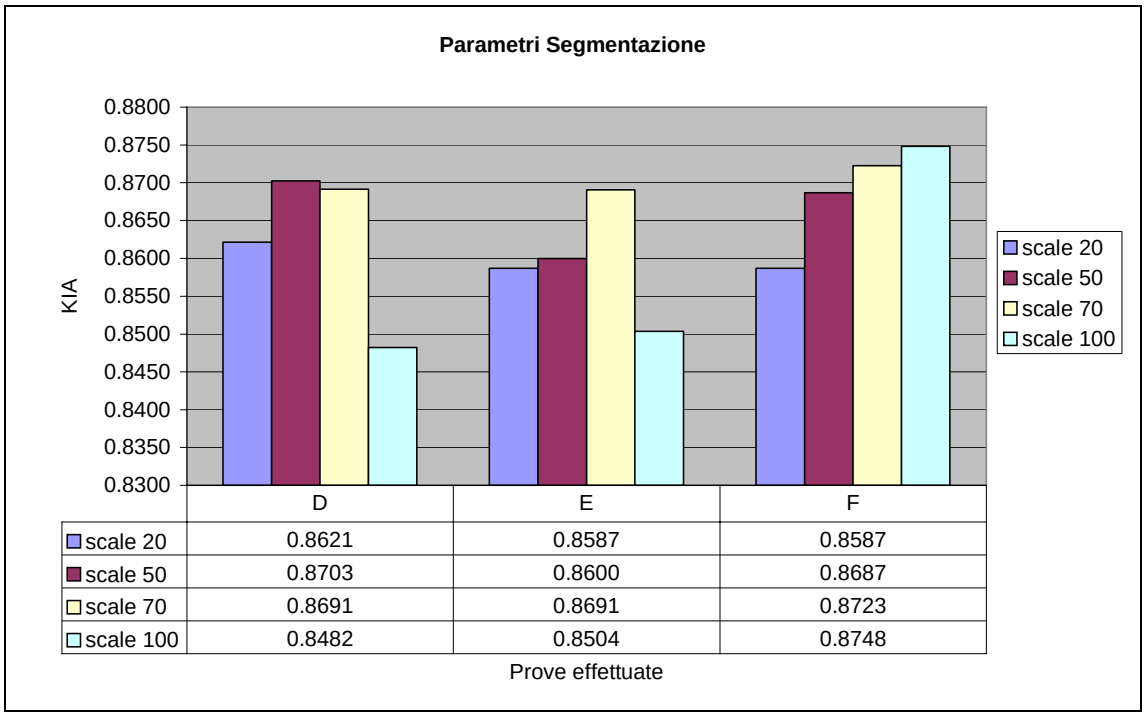
	G	H	I
scale 20	0.9222	0.9198	0.9184
scale 50	0.9261	0.9243	0.9212
scale 70	0.9212	0.9074	0.9157
scale 100	0.9036	0.9014	0.9130

(c)



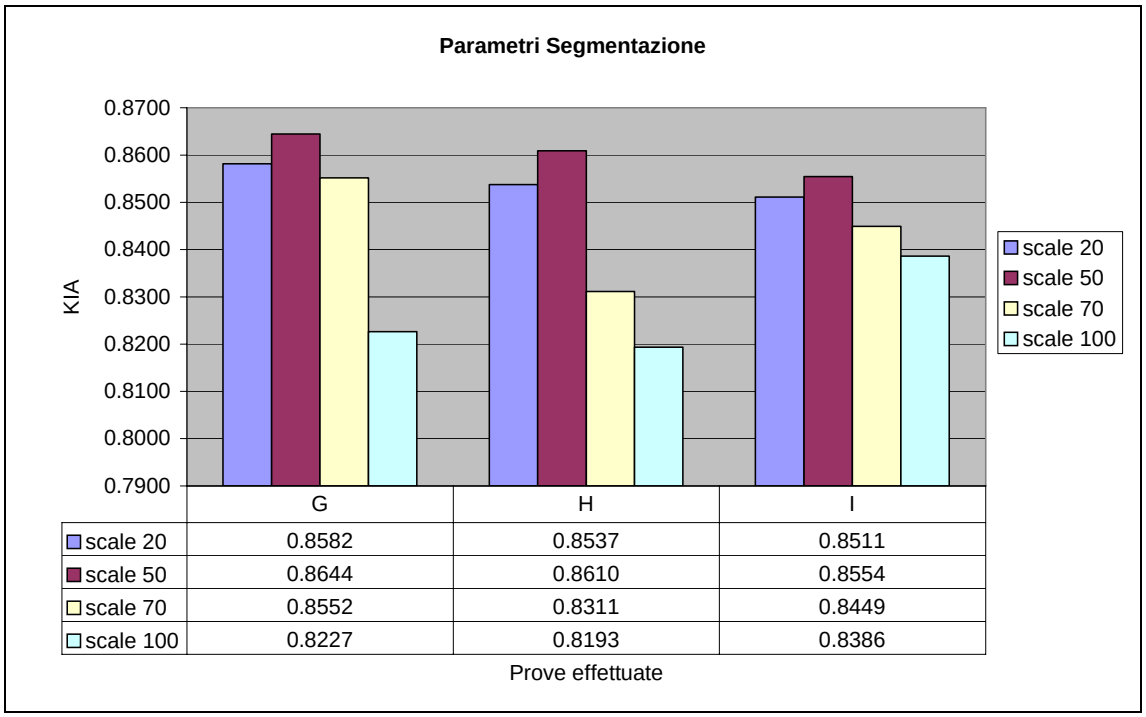
	A	B	C
scale 20	0.8582	0.8538	0.8703
scale 50	0.8671	0.8686	0.8706
scale 70	0.8636	0.8719	0.8772
scale 100	0.8764	0.8758	0.8763

(d)



	D	E	F
scale 20	0.8621	0.8587	0.8587
scale 50	0.8703	0.8600	0.8687
scale 70	0.8691	0.8691	0.8723
scale 100	0.8482	0.8504	0.8748

(e)



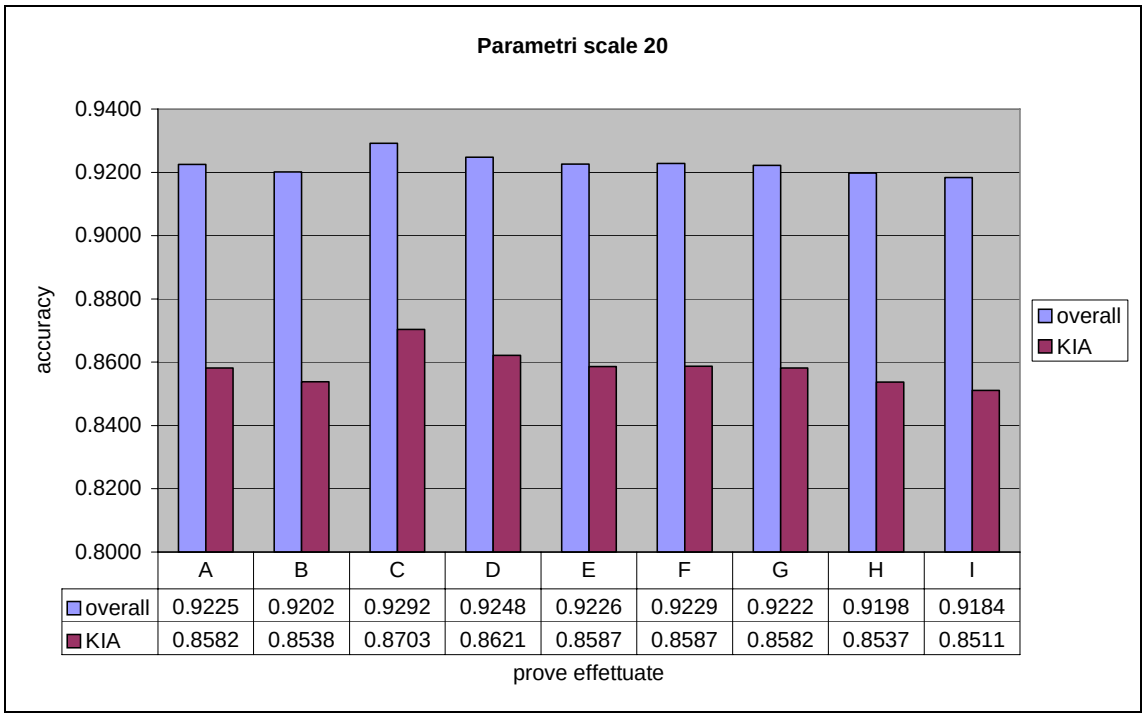
	G	H	I
scale 20	0.8582	0.8537	0.8511
scale 50	0.8644	0.8610	0.8554
scale 70	0.8552	0.8311	0.8449
scale 100	0.8227	0.8193	0.8386

(f)

Figura 5.6: variazioni nei valori di overall accuracy (a ,b ,c) e KIA (d, e f) al variare del parametro scale e dei parametri di forma e colore secondo le prove effettuate.

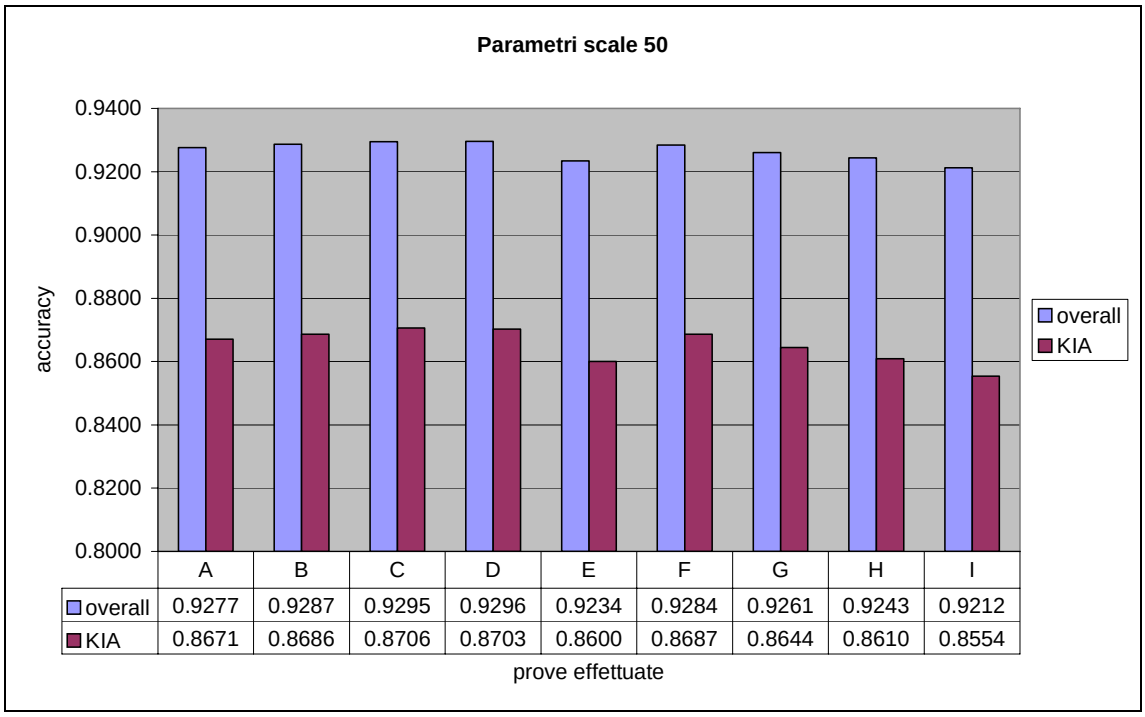
Dai grafici si osserva nel complesso una precisione leggermente migliore nelle prime tre prove (*A,B,C*), quindi per valori di *shape* pari a 0.3 e *color* pari a 0.7, con i risultati "peggiori" nelle ultime tre (*G,H,I*). Analizzando tutte le prove le differenze risultano comunque minime in termini percentuali, individuabili bene solo alla terza cifra decimale, rendendo ambigua la scelta del livello di segmentazione migliore. Questo fatto è dovuto principalmente alle caratteristiche dell'area presa in esame, cioè una zona montuosa con una parte di foresta e una parte soprasilvatica senza presenza di alberi in cui non sono individuabili *feature* specifiche come può accadere in un ambito urbano – con la presenza di edifici, strade, e altre tipologie di costruzioni – e dove le differenze in termini di colore fra le tre classi scelte sono evidenti. Si è deciso, comunque, di prendere il risultato migliore in termini di *accuracy* (prova C, *scale* 70) e di usarlo come base di partenza per la seconda fase, in cui si sono testati i risultati della classificazione in funzione del numero di *sample* rappresentativi delle classi.

La figura 5.7 mostra i grafici dei risultati ottenuti in precedenza ordinati per valore del parametro *scale*.



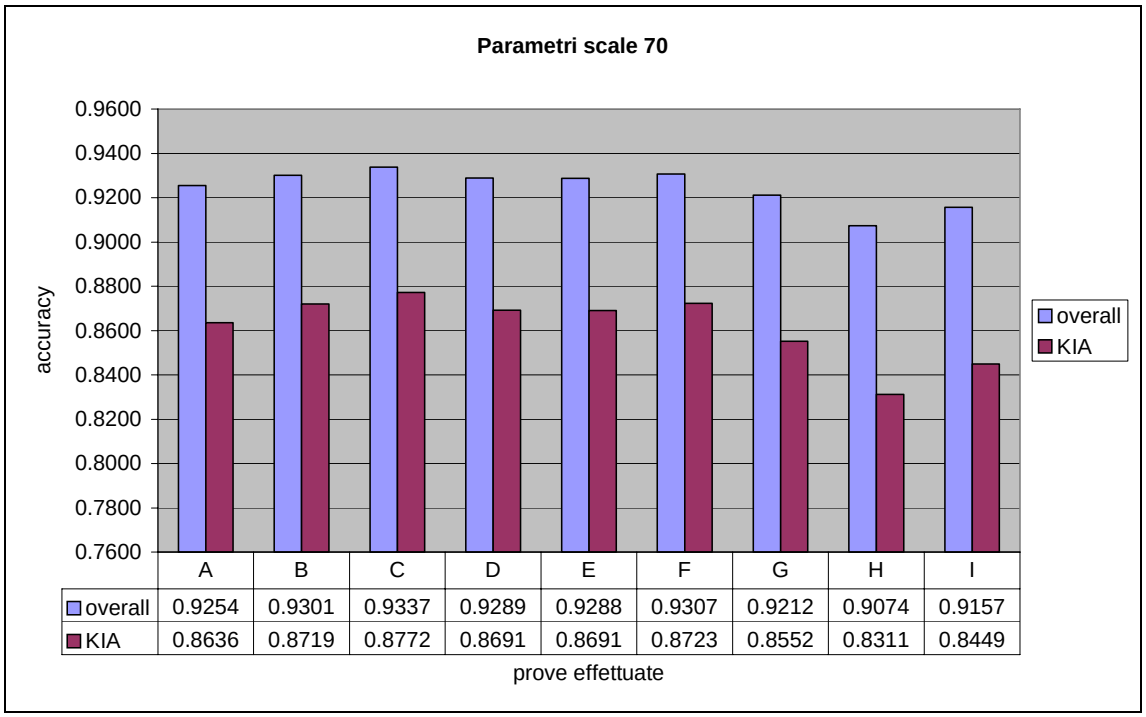
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
overall	0.9225	0.9202	0.9292	0.9248	0.9226	0.9229	0.9222	0.9198	0.9184
KIA	0.8582	0.8538	0.8703	0.8621	0.8587	0.8587	0.8582	0.8537	0.8511

(a)



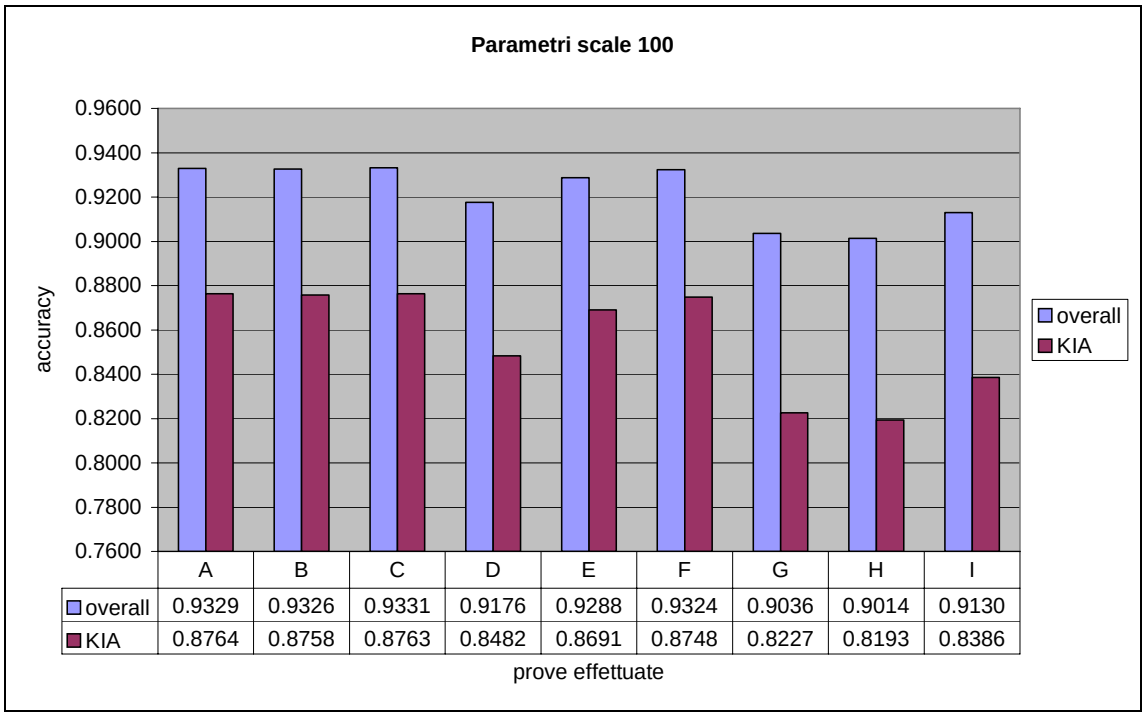
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
overall	0.9277	0.9287	0.9295	0.9296	0.9234	0.9284	0.9261	0.9243	0.9212
KIA	0.8671	0.8686	0.8706	0.8703	0.8600	0.8687	0.8644	0.8610	0.8554

(b)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
overall	0.9254	0.9301	0.9337	0.9289	0.9288	0.9307	0.9212	0.9074	0.9157
KIA	0.8636	0.8719	0.8772	0.8691	0.8691	0.8723	0.8552	0.8311	0.8449

(c)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
overall	0.9329	0.9326	0.9331	0.9176	0.9288	0.9324	0.9036	0.9014	0.9130
KIA	0.8764	0.8758	0.8763	0.8482	0.8691	0.8748	0.8227	0.8193	0.8386

(d)

Figura 5.7: variazioni nei valori di overall accuracy e KIA ordinati per valore del parametro scale: (a) = 20; (b) = 50; (c) = 70; (d) = 100.

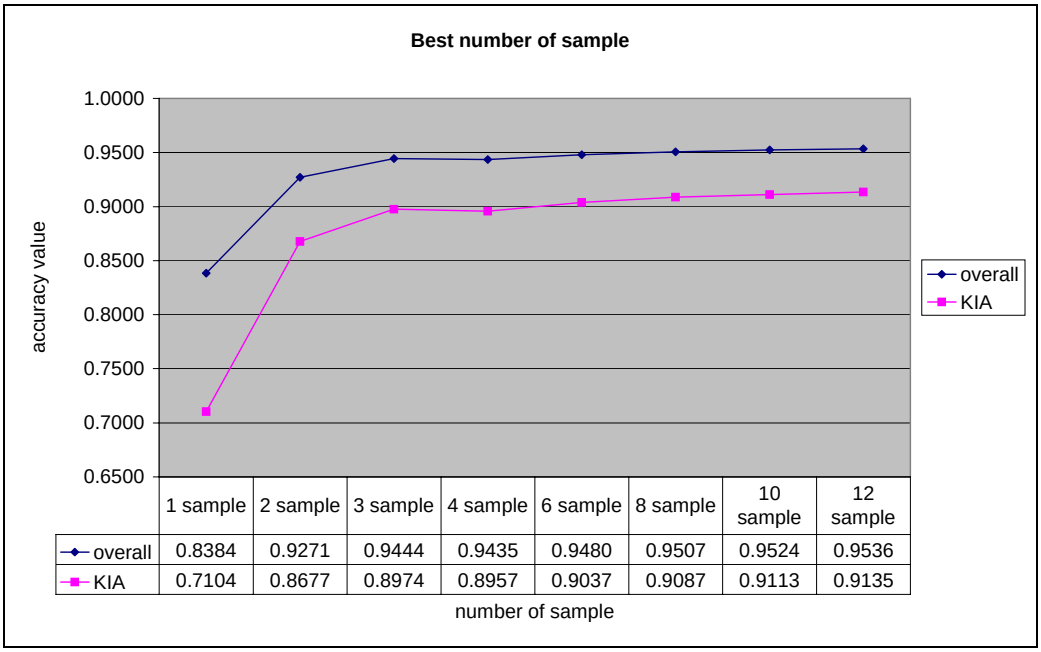
5.2.2 Fase 2

L'operatore di classificazione utilizzato in questa fase è il *Nearest Neighbor* implementato nel *software*. Utilizzando gruppi di oggetti come *sample* rappresentativi delle classi, il programma cerca fra gli altri oggetti appartenenti al medesimo livello di segmentazione quelli fra loro più vicini e li classifica in base ad un valore di prossimità (*eCognition User Guide, 2004*).

L'obiettivo prefissato è l'individuazione dell'influenza nel processo di classificazione del numero di *sample* per classe, a diversi livelli gerarchici. A tal fine è stata compiuta un'analisi dell'accuratezza sui risultati ottenuti.

Sono stati testati 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 12 *sample* per ogni classe, prendendo come punto di partenza il risultato migliore ottenuto nella prima parte.

Il grafico seguente illustra l'andamento dell'accuratezza in funzione del numero di *sample* usati (Figura 5.8).



	1 sample	2 sample	3 sample	4 sample	6 sample	8 sample	10 sample	12 sample
overall	0.8384	0.9271	0.9444	0.9435	0.9480	0.9507	0.9524	0.9536
KIA	0.7104	0.8677	0.8974	0.8957	0.9037	0.9087	0.9113	0.9135

Figura 5.8: variazioni nei valori di overall accuracy e KIA in funzione del numero di sample, per la classificazione di tre classi significative (bosco, non-bosco e acqua).

Si può osservare che il numero di *sample* è fondamentale per ottenere un elevato valore di *accuracy* dalla classificazione. In particolare da 3 *sample* per classe in su i risultati tendono a stabilizzarsi – risultato in linea con *Rego, 2003*.

5.2.3 Fase 3

L'obiettivo di questa fase è la classificazione delle coperture vegetative, in particolare quelle soprasilvatiche, mediante classificazione supervisionata a partire da *training site* significativi individuati sulle ortofoto aeree. Il processo di è sviluppato a partire dai risultati ottenuti in precedenza, con la classificazione dell'area di studio in tre grandi classi principali: bosco, non-bosco, acqua. Nello specifico, si è cercato di suddividere la classe non-bosco, rappresentata prevalentemente dalla vegetazione soprasilvatica, eccetto alcune aree al di sotto del limite del bosco, nelle diverse tipologie di coperture che la costituiscono. Queste si possono individuare dalla carta della vegetazione, presa da riferimento anche in questa fase, come fatto all'inizio, per il procedimento di verifica dell'accuratezza della classificazione.

La figura che segue riporta la gerarchia di livelli e le classi usate nel procedimento di classificazione (Figura 5.9).

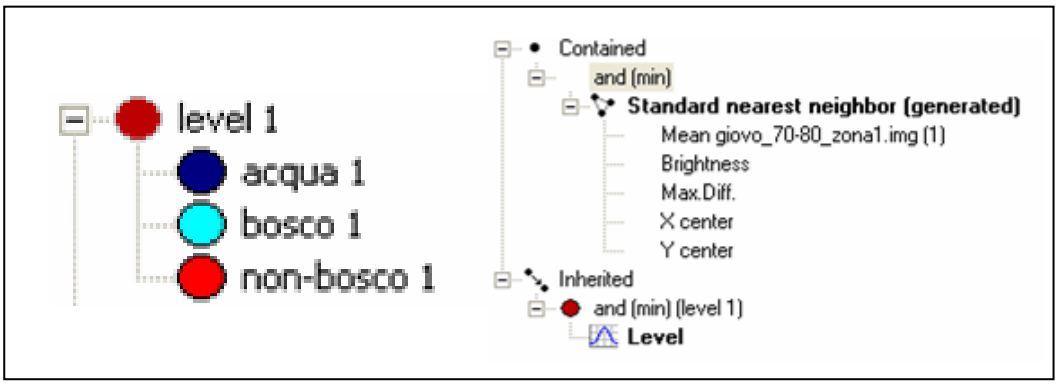


Figura 5.9: a sinistra, le classi principali del livello 1; a destra, le bande implementate nel classificatore Nearest Neighbor.

Si sono creati diversi livelli gerarchici (Figura 5.10) a partire dal livello 1 contenente le tre classi principali individuate tramite il classificatore *Nearest Neighbor*.

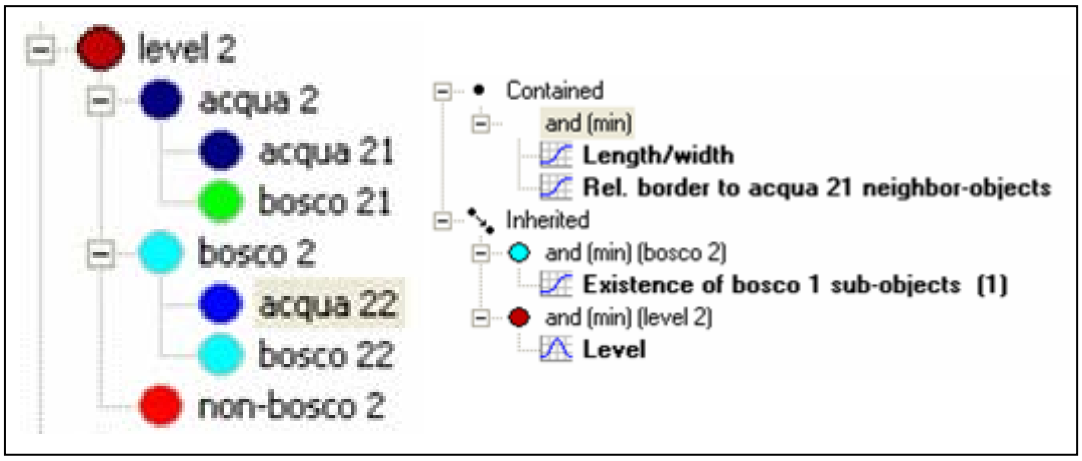
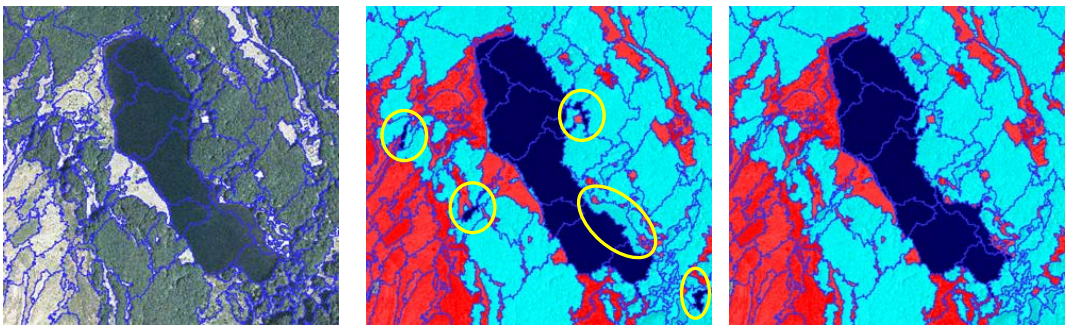


Figura 5.10: a sinistra, le sottoclassi del livello 1; a destra, le regole di classificazione usate nel livello 2 per correggere la classificazione di alcuni poligoni mal classificati nel livello 1.

Nel livello 2 si sono corretti eventuali errori di classificazione dei poligoni mediante l'introduzione di regole di classificazione legate alla forma e alle relazioni fra gli oggetti nei diversi livelli. Questo tipo di procedura utilizza gli attributi propri degli oggetti, permettendo di definire le classi sulla base di valori precisi di tali attributi, con la possibilità di coniugare più di una regola in relazione ad uno o a più oggetti. Questa funzione del *software* prende il nome di *Membership Function* (*eCognition User Guide, 2004*).
La figura 5.11 illustra i risultati grafici dell'applicazione di tali regole.



(a) (b) (c)

Figura 5.11: (a) immagine segmentata; (b) immagine classificata con cerchiati i poligoni mal classificati; (c) la stessa immagine con i poligoni riclassificati correttamente sulla base delle regole di figura 5.10. Legenda: rosso = non-bosco; azzurro = bosco; blu = acqua.

Con le stesse tre classi è stato creato un nuovo livello 3, in cui si sono corretti manualmente eventuali poligoni mal classificati non individuati dalle operazioni precedenti: in questa maniera si è ottenuta una classificazione il più precisa possibile della zona in esame che è servita come punto di partenza per la

definizione di un ulteriore livello 4 contenente le nuove classi costituenti la classe generale *non-bosco*.

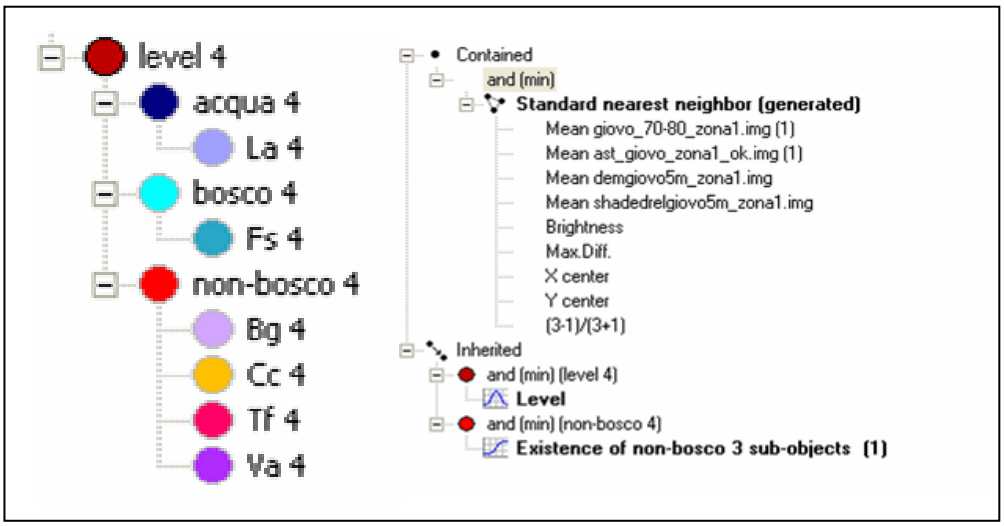


Figura 5.12: a sinistra, le sottoclassi delle tre classi principali; a destra, le bande implementate nel classificatore Nearest Neighbor.

Le classi sono nominate secondo la seguente legenda (estratto dalla Carta della Vegetazione del monte Giovo-Rondinaio, *Cacchi, 2007*; vedi Appendice):

- La = Specchi lacustri privi di vegetazione macrofitica;
- Fs = Boschi di faggio (*Fagus sylvatica*),
- Bg = Praterie xerofitiche di origine secondaria, con dominanza di *Brachypodium genuense* (brachipodieti) e prevalenza di specie dei *Nardo-Callunetea* ed elevata frequenza di specie acidofile e di entità dei vaccinieti;
- Cc = Vegetazione a dominanza di *Cryptogramma crispa* ed elevata frequenza di altre pteridofite. Colonizza accumuli detritici completamente stabilizzati formati da clasti di dimensioni da decimetriche a metriche, dal livello della faggeta fino al crinale;
- Tf = Pascoli pingui subalpini a *Trifolium thalii* e *Festuca violacea* subsp. *puccinellii* con elevata frequenza e copertura di *Crepis aurea* subsp. *glabrescens*;
- Va = Vegetazione arbustiva con dominanza di mirtilli (*Vaccinium myrtillus* e *V. gaultherioides*).

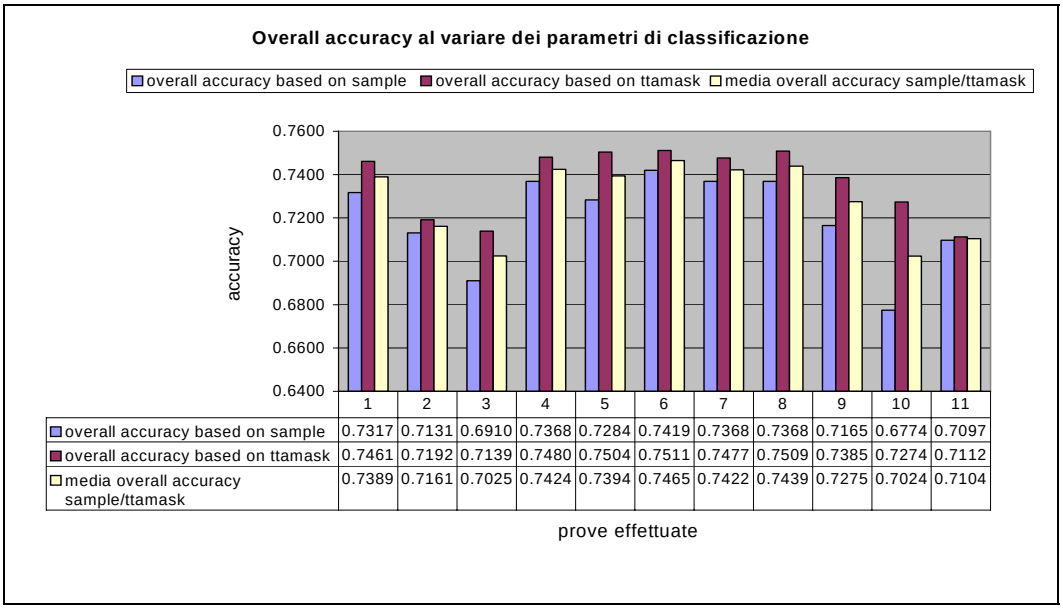
In questa parte l'attenzione si è focalizzata sulle sottoclassi della classe non-bosco: dopo aver individuato dei *sample* rappresentativi delle classi *Bg*, *Cc*, *Tf*, e *Va*, si sono effettuate una serie di prove di classificazione testando all'interno del classificatore *Nearest Neighbor* diverse combinazioni di bande e valutando i risultati con il solito procedimento di *accuracy*. La base di partenza è stato il risultato migliore della fase 1, cioè un progetto ottenuto con i seguenti parametri di segmentazione: *scale = 70*, *shape = 0.3*, *color = 0.7*, *compactness = 0.9*, *smoothness = 0.1*. La tabella 5.5 riassume le bande usate nelle varie prove.

prove	bande usate
prova 1	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center
prova 2	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Standard Dev. orto-banda1; Ratio orto-banda1
prova 3	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; mean Aster-bande1,2,3
prova 4	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM
prova 5	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster-banda1
prova 6	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster-banda1; Mean Shaded Relief
prova 7	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster-banda1; Mean Shaded Relief; GLCM mean all dir. Orto-banda1
prova 8	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster-banda1; Mean Shaded Relief; GLCM mean all dir. Aster-banda1
prova 9	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster bande1,3; Mean Shaded Relief
prova 10	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Mean orto-banda1; Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster bande1; Mean Shaded Relief; Customize (aster_banda3 - aster_banda2)/(aster_banda3 + aster_banda2)
prova 11	Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1); Brightness; MaxDiff, (X,Y) center; Mean DEM; Mean Aster-banda1; Mean Shaded Relief

Tabella 5.5: bande implementate nel classificatore Nearest Neighbor per ciascuna della prove effettuate; per la spiegazione di ciascuna si veda la User Guide di eCognition.

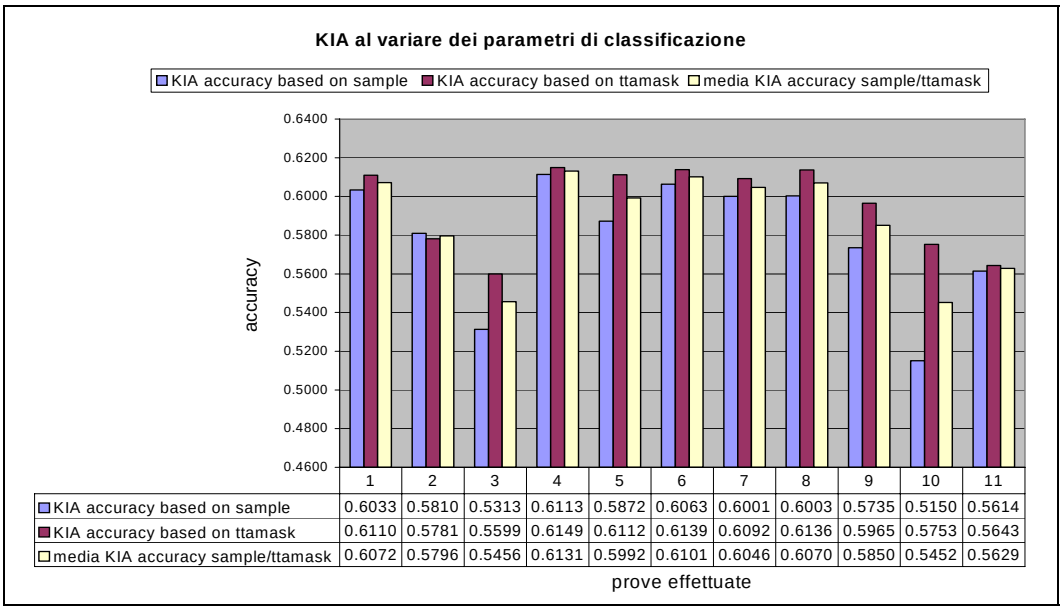
Le bande "Customize(orto_banda3-orto_banda1)/(orto_banda3+orto_banda1)" e "Customize(aster_banda3-aster_banda2)/(aster_banda3+aster_banda2)" sono state create utilizzando un *tool* specifico offerto dal *software* che dà la possibilità

all'utente di creare *feature* "customizzate". In questo caso, la prima delle due calcola il rapporto fra, al numeratore, la differenza tra la banda 3 (rosso) e la banda 1(blu) delle ortofoto e, al denominatore, la somma delle stesse bande; la seconda, calcola il rapporto tra, al numeratore, la differenza tra la banda 3 e la banda 2 delle *ASTER* e, al denominatore, la somma delle stesse bande. Quest'ultima è una "specie" di *NDVI*, come quello utilizzato per le immagini *LANDSAT*. I risultati delle prove sono riportati nei grafici della figura 5.13.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
overall accuracy based on sample	0.7317	0.7131	0.6910	0.7368	0.7284	0.7419	0.7368	0.7368	0.7165	0.6774	0.7097
overall accuracy based on ttamask	0.7461	0.7192	0.7139	0.7480	0.7504	0.7511	0.7477	0.7509	0.7385	0.7274	0.7112
media overall accuracy sample/ttamask	0.7389	0.7161	0.7025	0.7424	0.7394	0.7465	0.7422	0.7439	0.7275	0.7024	0.7104

(a)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
KIA accuracy based on sample	0.6033	0.5810	0.5313	0.6113	0.5872	0.6063	0.6001	0.6003	0.5735	0.5150	0.5614
KIA accuracy based on ttamask	0.6110	0.5781	0.5599	0.6149	0.6112	0.6139	0.6092	0.6136	0.5965	0.5753	0.5643
media KIA accuracy sample/ttamask	0.6072	0.5796	0.5456	0.6131	0.5992	0.6101	0.6046	0.6070	0.5850	0.5452	0.5629

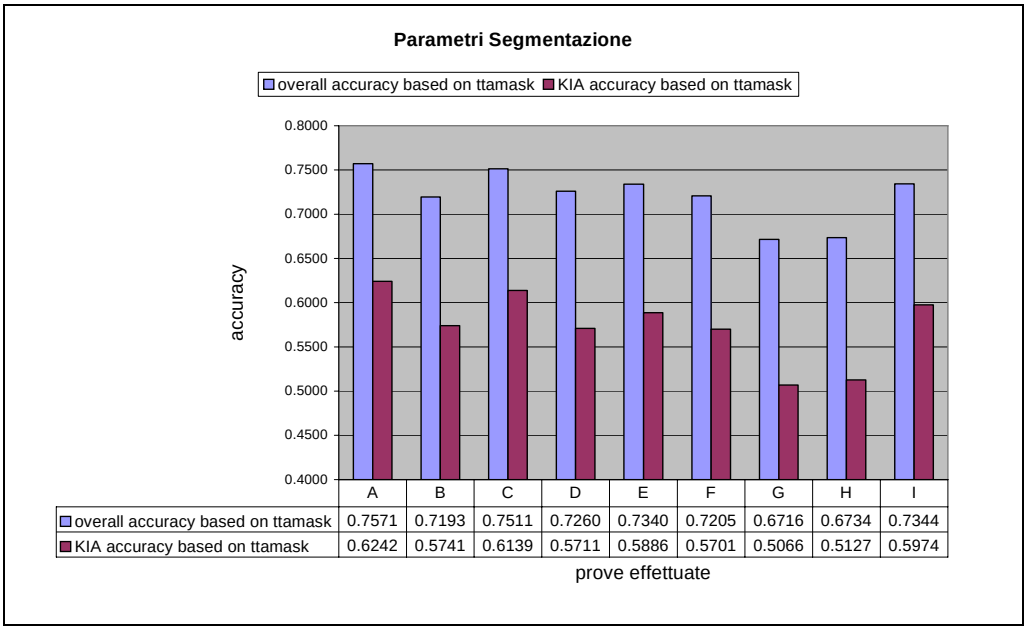
(b)

Figura 5.13: valori di overall accuracy (a) e KIA (b) nelle prove effettuate.

Si è effettuata la stima dell'accuratezza sia in termini di *ttamask* che di *sample* per verificare la presenza di eventuali differenze significative fra i due metodi. L'andamento dei risultati è praticamente lo stesso in entrambi i casi, con i valori di accuratezza basata sui *sample* generalmente inferiori rispetto a quelli di accuratezza basata sulla *ttamask*. Per quanto riguarda l'accuratezza globale gli esiti migliori si sono ottenuti dalla prova 6, anche se le differenze fra le varie prove sono al massimo dell'ordine del 6-7%, a dimostrazione di una certa stabilità nei risultati indipendentemente dall'uso di una o l'altra combinazione di bande – almeno nell'ambito delle grandezze prese in considerazione.

Come ulteriore *test* sui dati ottenuti, considerando la combinazione di bande della prova 6, si sono effettuate una serie di classificazioni su immagini segmentate secondo i parametri della fase 1, con valore di *scale* pari a 70. In pratica il procedimento è lo stesso di quello effettuato nella prima fase, con la differenza che in questo caso le classi da estrarre sono molto più complicate rispetto alla semplice differenziazione fra *bosco*, *non-bosco* e *acqua*.

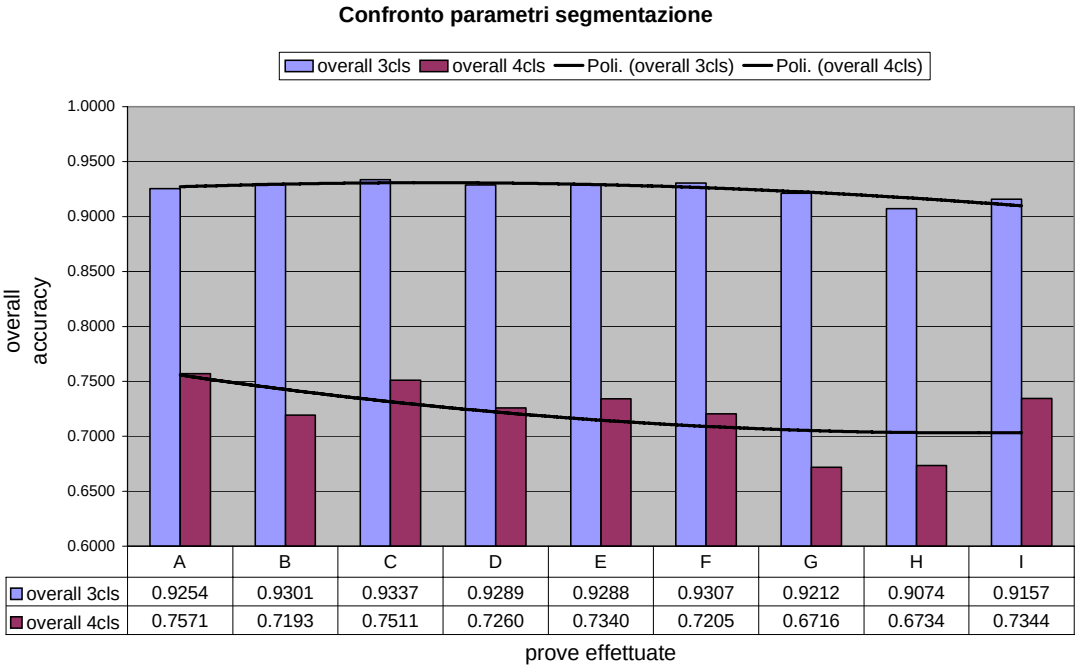
Il grafico seguente illustra i valori ottenuti dal procedimento di *accuracy* in quest'ultima analisi:



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
overall accuracy based on ttamask	0.7571	0.7193	0.7511	0.7260	0.7340	0.7205	0.6716	0.6734	0.7344
KIA accuracy based on ttamask	0.6242	0.5741	0.6139	0.5711	0.5886	0.5701	0.5066	0.5127	0.5974

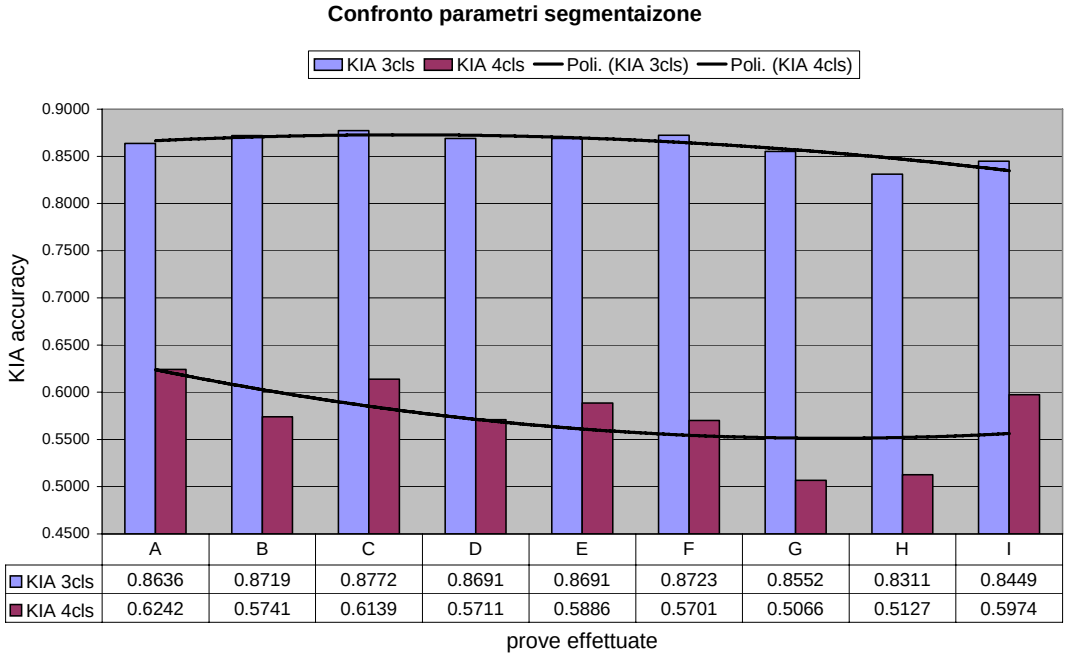
Figura 5.14: valori di overall accuracy e KIA per la classificazione effettuata con scale = 70, bande del Nearest Neighbor relative alla prova 6, al variare dei parametri di forma e colore secondo le prove della prima fase.

Di seguito (Figura 5.15) sono confrontati i risultati del grafico (c) di figura 5.7 con quello di figura 5.14 in termini di *overall accuracy* e *KIA*:



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
overall 3cls	0.9254	0.9301	0.9337	0.9289	0.9288	0.9307	0.9212	0.9074	0.9157
overall 4cls	0.7571	0.7193	0.7511	0.7260	0.7340	0.7205	0.6716	0.6734	0.7344

(a)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
KIA 3cls	0.8636	0.8719	0.8772	0.8691	0.8691	0.8723	0.8552	0.8311	0.8449
KIA 4cls	0.6242	0.5741	0.6139	0.5711	0.5886	0.5701	0.5066	0.5127	0.5974

Figura 5.15: valori di overall accuracy (a) e KIA (b) per la classificazione delle tre classi principali fatta nella fase 1 (in blu) e delle 4 classi Bg, Cc, Tf, e *Va (in viola). In nero la linea di tendenza dei due istogrammi.*

Si può notare la maggiore variabilità nei valori per la classificazione delle 4 classi rappresentanti le coperture appartenenti alla classe *non-bosco*, dovuta principalmente alla maggiore difficoltà nel distinguere fra loro queste coperture, rispetto alla semplice distinzione *bosco/non-bosco* della fase 1.

Osservando i valori di entrambi gli indici di accuratezza i risultati migliori sembrano aversi nelle prime tre prove, in linea con i risultati della prima fase. In questo caso, le differenze in termini percentuali con i valori delle altre prove sono leggermente maggiori.

Inoltre, la linea di tendenza per gli istogrammi di figura 5.15 riferiti alle 4 classi *Bg*, *Cc*, *Tf*, e *Va* evidenzia un peggioramento dei valori di *accuracy* all'aumentare del valore del parametro *shape* (a partire dalla prova *A* fino alla *I*) più marcato rispetto a quello che si potrebbe intuire dai valori di accuratezza riferiti alla classificazione delle tre classi principali ricavati nella prima fase.

La figura 5.16 riporta l'immagine finale classificata e la carta della vegetazione usata come riferimento.

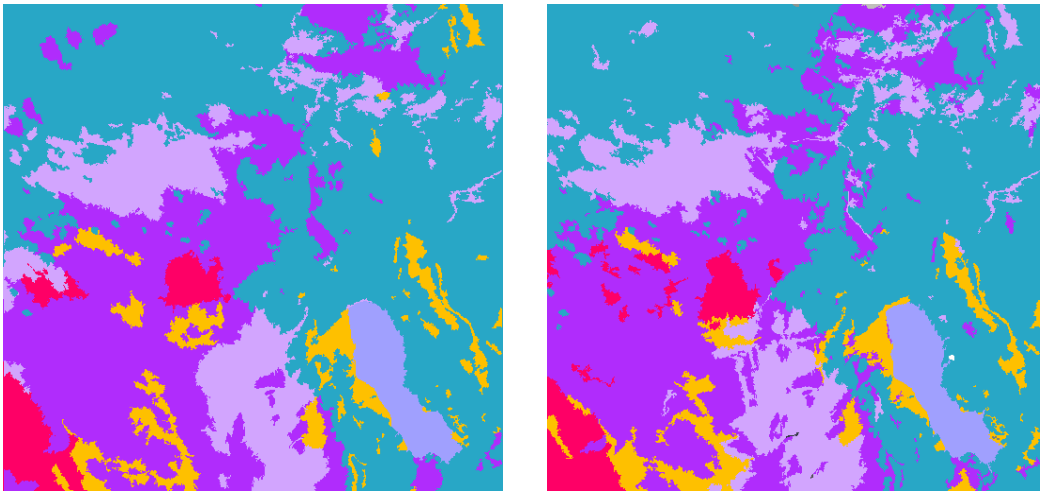


Figura 5.16: a destra, l'immagine finale classificata; a sinistra, la carta della vegetazione usata come mappa di riferimento nel procedimento di verifica dell'accuratezza.

La tabella 5.6 riporta le operazioni statistiche di base, riferita alla prova *A* di figura 5.15, eseguite sul miglior grado di appartenenza degli oggetti segmentati a ciascuna classe (numero di oggetti, media, deviazione standard, valore minimo e valore massimo).

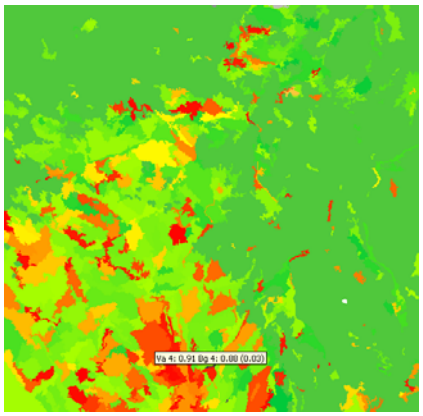
Class	Objects	Mean	StdDev	Minimum	Maximum
Fs 4	272.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000
La 4	13.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Bg 4	198.0000	0.7862	0.1564	0.3773	1.0000
Tf 4	33.0000	0.9037	0.0850	0.5899	1.0000
Va 4	297.0000	0.7447	0.1789	0.2058	1.0000
Cc 4	84.0000	0.7413	0.2070	0.2863	1.0000

Tabella 5.6: valori statistici dei migliori risultati della classificazione per gli oggetti segmentati.

A causa della classificazione di tipo *fuzzy* di *eCognition*, agli oggetti viene assegnato un valore di appartenenza a più di una classe. La classificazione con il più alto valore determina l'assegnazione dell'oggetto a quella classe, ossia il suo miglior risultato di classificazione (*best classification result*). In tabella l'esito migliore è valutato per classe. In questa maniera è possibile stimare quanto l'oggetto di una classe soddisfi la descrizione della classe stessa (*eCognition User Guide, 2004*).

Utilizzando il classificatore *Nearest Neighbor*, un alto valore di appartenenza ad una classe indica la vicinanza ad uno dei *sample* scelti per la classificazione. Per ogni oggetto nell'immagine, il miglior risultato della classificazione può essere aumentato nel caso del *Nearest Neighbor* aumentando la cosiddetta "*Nearest Neighbor function slope*", cioè aumentanod la distanza che un oggetto può avere dal *sample* più vicino. Bisogna stare attenti a cambiare tale valore in quanto può portare ad una diminuzione della stabilità della classificazione.

In questo senso, i valori di appartenenza non esprimono probabilità di appartenenza. Perciò, un alto grado di appartenenza ad una classe non indica necessariamente l'assegnazione definitiva a tale classe. Nel caso ci sia una piccola differenza tra il migliore e il "secondo miglior" valore, il risultato della classificazione diventa poco chiaro. Questa differenza può essere analizzata per ogni oggetto tramite il *tool* "*Classification stability*" che appunto determina la stabilità di una classificazione (Figura 5.17 e Tabella 5.7).



Class	Objects	Mean	StdDev	Minimum	Maximum
Fs 4	272.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000
La 4	13.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Bg 4	198.0000	0.1821	0.1183	0.0018	0.5408
Tf 4	33.0000	0.1262	0.0840	0.0010	0.3201
Va 4	297.0000	0.1659	0.1300	0.0003	0.6845
Cc 4	84.0000	0.1913	0.1416	0.0040	0.6097

Figura 5.17 (a sinistra): output grafico del tool "classification stability".
Tabella 5.7 (a destra): output statistico del tool "classification stability".

L'output grafico riporta i poligoni colorati con una tonalità che va dal verde (differenza massima tra il migliore e il secondo migliore risultato) al rosso (differenza minima tra il migliore e il secondo migliore risultato). Si può notare, quindi, come per molti dei poligoni rappresentanti le coperture sovrasilvatiche (in particolare nel caso della classi *Bg* e *Va*), la probabilità di appartenenza ad una classe o a un'altra sia quasi la stessa. La causa è individuabile nella breve distanza fra i *sample* di tali classi nel *feature space* utilizzato dal classificatore *Nearest Neighbor* (*eConigion User Guide*).

5.3 AGGIORNAMENTO CARTOGRAFICO

Nell'analisi e nella gestione delle dinamiche territoriali la cartografia tematica, ed in particolare la cartografia della vegetazione, assume un ruolo centrale. La ricerca sulla cartografia tematica si sta impostando verso una maggiore accuratezza, precisione e rigore degli *standard*, oltre che verso una maggiore velocità ed accessibilità nell'estrazione di informazioni dalle fonti rappresentate da immagini aeree o satellitari. Un ruolo centrale ha la classificazione *object-based*.

Come già detto, la classificazione ad oggetti si compone dell'estrazione di *feature* dalle immagini e della loro classificazione, in base sia a parametri spettrali sia a caratteristiche di tipo contestuale, quali vicinanza ed appartenenza.

In pratica, la classificazione di un'immagine avviene non in base ad una digitalizzazione dei limiti delle categorie da definire, ma in base all'estrazione automatica degli oggetti di interesse e dei loro confini direttamente dalle immagini. Inoltre, le informazioni necessarie per la classificazione non verranno estratte dai singoli *pixel*, come nella maggior parte dei sistemi di classificazione automatica di immagini, ma dai gruppi di *pixel* costituenti gli oggetti risultanti dalla segmentazione. Il vantaggio dell'utilizzo di tali oggetti risiede nella possibilità di riconoscere aree a contenuto semantico omogeneo, e dunque di utilizzare strati informativi preesistenti, quali mappe di uso del suolo o carte della vegetazione, definendo un processo di classificazione ibrido supervisionato e non supervisionato, che permetta di fatto un aggiornamento della cartografia esistente, con una migliore coerenza geometrica della nuova carta con le immagini di origine e un controllo di qualità in tutte le fasi della produzione.

Questa procedura presenta, rispetto ad interpretazioni di tipo tradizionale, una minore soggettività nel porre i limiti ed è basata su un approccio semi-automatico.

I dati esistenti (carte di uso del suolo, della vegetazione, forestali) sono migliorati geometricamente, utilizzando riprese più recenti, ed inoltre ne viene aggiornato il contenuto informativo.

Sono utilizzati per la definizione del cambiamento i parametri spettrali e di forma, con l'intervento dell'operatore per il controllo e la validazione finale del risultato.

L'obiettivo, in questo caso, è ottenere una carta della vegetazione quanto più precisa possibile, in quanto deve essere utilizzata come mappa di riferimento nel procedimento di *accuracy* per la classificazione supervisionata.

Come dati in ingresso sono stati presi l'ortofoto aerea del VoloIT2000 e la carta della vegetazione esistente, corretta in parte in seguito a recenti rilievi condotti a terra e per fotointerpetazione (*Cacchi, 2007*).

La figura 5.18 riporta la carta esistente e la nuova carta aggiornata.

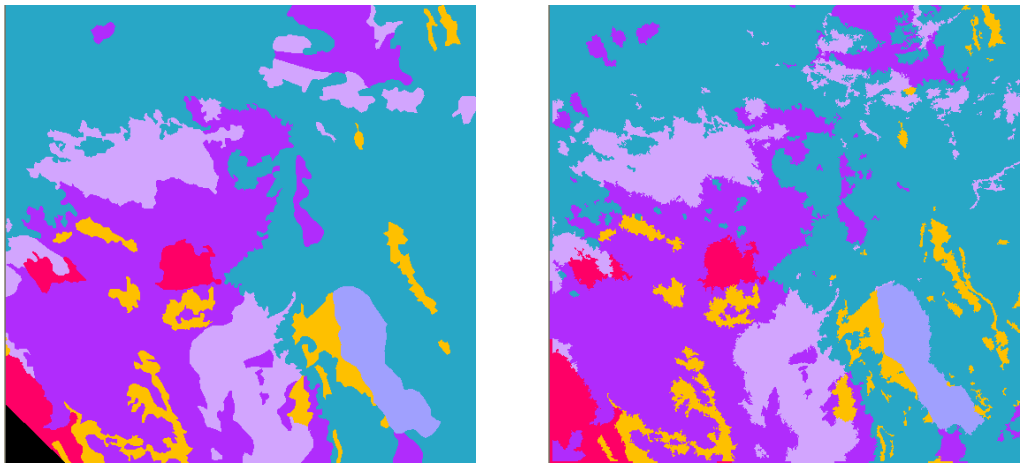


Figura 5.18: a sinistra, carta della vegetazione esistente; a destra, la stessa carta aggiornata.

In seguito alla segmentazione, sono estratti dalle immagini le aree a contenuto informativo omogeneo. La carta della vegetazione preesistente viene importata all'interno del sistema e vengono creati, a partire da questa, i *sample* rappresentativi delle classi di copertura; viene applicato una procedura di classificazione supervisionata che permette di aggiornare e riclassificare i poligoni, con il contenuto della mappa preesistente, sulla base delle informazioni spettrali contenute nelle foto aeree (Figura 5.19).

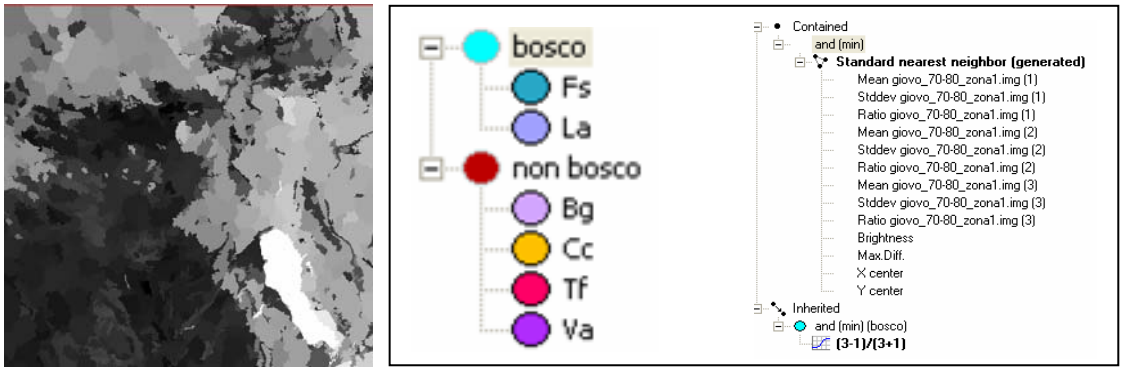


Figura 5.19: a sinistra, l'immagine costruita come combinazione delle bande del rosso e del blu delle ortofoto (Customize (orto_banda3 - orto_banda1)/(orto_banda3 + orto_banda1)); a destra, parametri utilizzati nel procedimento di classificazione.

In risultato sarà coerente dal punto di vista geometrico ed informativo con la carta della vegetazione esistente. L'intervento dell'operatore sarà necessario per definire nuove classi di interesse ed eventuali errori di classificazione. Il risparmio di tempo è notevole, in quanto non è necessario eseguire alcuna digitalizzazione di limiti a mano (Figura 5.20).

La scala della carta aggiornata dipende direttamente dalla qualità delle foto impiegate; in questo caso la dimensione del *pixel* è pari a 1 metro, dunque la scala dovrebbe essere un 5.000. In realtà, si potrebbe considerare prudenzialmente una scala analoga a quella della carta originale ($1:25.000$) nella quale il contenuto informativo sia aggiornato alla scala delle ortofoto o delle immagini satellitari utilizzate.

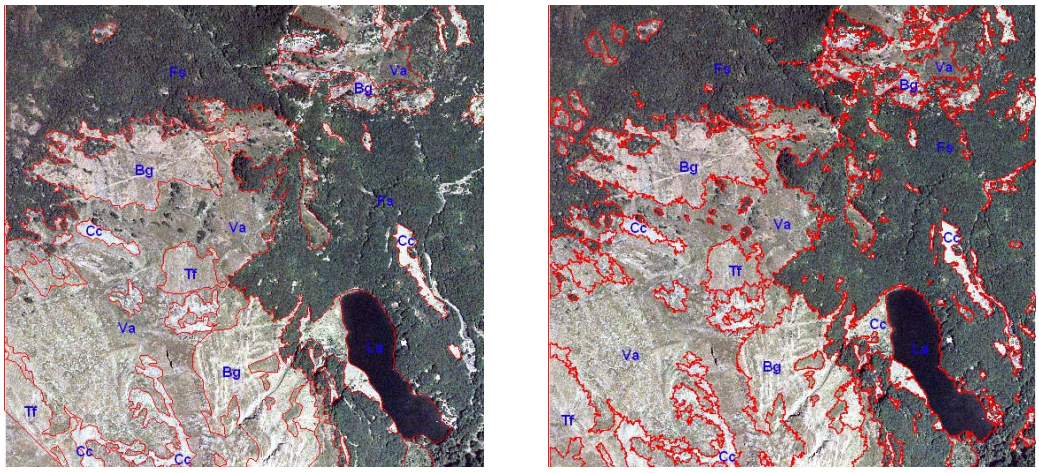


Figura 5.20: a sinistra, i limiti delle coperture della carta preesistente; a destra, i nuovi limiti della carta aggiornata, coerenti con i limiti naturali individuabili nelle ortofoto.

In generale, la scelta del valore di scala e dei parametri di segmentazione dipende dall'obiettivo del lavoro. Infatti, la segmentazione può essere condotta a diverse scale sulle stesse immagini o su immagini registrate a diverse risoluzioni.

5.4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI

L'utilizzo della segmentazione, come operazione preliminare all'elaborazione di un'immagine, insieme alla definizione di diversi livelli e oggetti di differenti dimensioni integrati in un *network* gerarchico aumenta le potenzialità della procedura di classificazione.

In un ambiente segmentato, ogni oggetto è caratterizzato da una vasta serie di attributi, spettrali e di forma, che possono essere utilizzati per definire relazioni fra gli oggetti stessi. Queste informazioni servono a descrivere le singole classi all'interno del *network* gerarchico. Il processo di classificazione

diventa più flessibile, mettendo a disposizione dell'utente un numero elevatissimo di attributi e parametri da integrare fra loro nei diversi livelli al fine di risolvere gli obiettivi prefissati. Nella pratica questo si rivela essere molto problematico, in quanto non è semplice stabilire quale livello di scala sia il più adatto a rappresentare un certo fenomeno o oggetto, o quale sia la combinazione di attributi migliore per distinguere un tipo di copertura da un altro.

Nel caso della classificazione delle coperture soprasilvatiche, in ciascuna delle zone corrispondenti ai 4 tipi di coperture analizzate, è sempre presente una mescolanza di specie vegetative di uno o dell'altro tipo, e la zona esaminata viene classificata nella carta della vegetazione sulla base della specie dominante. Per questo, l'approccio ad oggetti è sembrato più adatto rispetto ai classici metodi basati sui *pixel*. Infatti, ogni oggetto segmentato contiene il valore medio della riflettanza di tutti i *pixel* che lo contengono; quindi, oggetti rappresentati un'area caratterizzata dalla prevalenza di un certo tipo di vegetazione tenderanno ad avere valori simili, semplificando così la successiva operazione di classificazione. Ovviamente, nel caso di oggetti contenenti tipologie di copertura molto simili fra loro le cose si complicano.

Per quanto riguarda l'utilizzo di immagini a diversa risoluzione spaziale, *eCognition* permette di gestire agevolmente l'integrazione di tali dati nel processo di classificazione. Una corretta georegistrazione fra i dati è comunque necessaria per una giusta interpretazione delle informazioni contenute. Nel caso delle immagini *ASTER*, se da una parte esse portano con sé maggiori informazioni spettrali, dall'altra la differente dimensione del *pixel* rispetto alle ortofoto aeree comporta degli errori di registrazione che annullano i vantaggi offerti dalla multispettrealità.

Si sente, quindi, la necessità di individuare metodi che definiscano parametri e procedure affidabili da utilizzare, in relazione ai dati disponibili. A seconda dei casi, occorre cercare i valori di segmentazione che meglio rappresentano il fenomeno studiato, verificarne la stabilità e ripetibilità, andando a vedere se possono essere riutilizzati in situazioni simili.

6 INTEGRAZIONE DI DATI TELERILEVATI E *GPS* IN UN *GIS*

6.1 INRODUZIONE

Il rapido sviluppo negli ultimi anni delle tecnologie spaziali ha reso disponibili nuovi strumenti e metodologie per la gestione dei dati spaziali. In particolare lo sviluppo dei Sistemi Informativi Geografici (*GIS, Geograpghic Information Systems*), del Sistema di Posizionamento Globale (*GPS, Global Positioning System*), e del Telerilevamento (*RS, Remote Sensing*) ha permesso la raccolta e l'analisi di una vasta e diversificata quantità di dati riguardanti le realtà a terra, operazione che non sarebbe stata possibile senza l'ausilio delle nuove tecnologie.

I *GIS* "*sono sistemi automatici per immagazzinare, analizzare e manipolare dati geografici. Questi dati rappresentano oggetti e fenomeni per i quali la posizione geografica è una caratteristica essenziale all'informazione e indispensabile per analizzarli"* (*Arnoff, 1989*).

Un *GIS* è un ambiente digitale dove sono inseriti e immagazzinati dati ed informazioni reali, sui quali è possibile compiere manipolazioni, analisi, azioni diverse per ottenere dei risultati specifici.

In un *GIS* viene creta una rappresentazione virtuale del territorio, composta da diversi strati informativi a seconda del tipo di analisi da condurre. Questo permette di integrare fra loro le informazioni contenute nei vari strati per mezzo di procedure di interconnessione, intersezione e sovrapposizione spaziale, come pure di ricavare informazioni da modelli spaziali indicanti aree sensibili, tendenze e potenzialità.

Un *GIS* non fornisce delle soluzioni, esso crea un ambiente di lavoro multidisciplinare in cui informazioni che sembrano difficili da integrare si distinguono per la loro posizione spaziale.

Per esempio, in una regione a rischio, si può facilmente verificare il pericolo di rimanere senza tetto in seguito a pesanti precipitazioni piovose utilizzando i seguenti dati: popolazione (densità e livello di reddito), precipitazioni pluviometriche e distribuzione dei pendii. Con queste informazioni si è in grado di stabilire relazioni del seguente tipo: maggiore è la pioggia in una zona caratterizzate da un elevato pendio e abitata da una popolazione molto povera (cioè, più basso è il livello di reddito e inferiore sarà la presenza di infrastrutture), più grande sarà la probabilità di avere un elevato numero di senza tetto.

Quanto detto può facilmente essere "validato" o contestualizzato in un "ambiente spaziale". Per prima cosa viene creato un modello comprendente tutte le variabili in gioco; il modello dà origine ad una mappa del rischio che deve essere confrontata con la situazione reale delle zone colpite dalle alluvioni e con un'alta percentuale di senza tetto.

Gli strati informativi che descrivono un territorio sono immagazzinati in un *GIS* in *file* contenenti due tipi di informazioni: una di tipo spaziale ed una qualitativa. Ad esempio, un poligono che rappresenta la vegetazione ha le coordinate geografiche che definiscono la sua posizione nello spazio e ha un attributo che lo qualifica come vegetazione: due lati della stessa medaglia con funzioni differenti che insieme riferiscono *"dove e cosa"* (*Mendronho, 1995*).

La realtà può essere rappresentata in un *GIS* in due modi fra loro complementari: in forma vettoriale o matriciale. Questi due tipi di rappresentazione spaziale si basano su metodologie differenti e, allo stesso tempo, sono complementari in quanto lasciano che ci sia flessibilità nell'immagazzinamento e nel processo di analisi dei dati. Rappresentazioni in formato vettoriale possono essere convertite in formato matriciale e viceversa.

Il formato vettoriale consiste di oggetti con un preciso impiego nello spazio, con una propria geometria e forma. Un oggetto può essere rappresentato da tre

diverse grandezze geometriche: il punto, la linea e il poligono. Ognuna di queste è adatta a rappresentare nel modo migliore un certo fenomeno, in funzione anche della scala di rappresentazione. In questo modo, su una mappa in scala 1:10.000 una strada può venir raffigurata mediante una linea e la sua lunghezza misurata sulla carta. Questa stessa strada su una mappa in scala 1:2.000 può venir rappresentata da un poligono che permette di misurare sulla carta anche la larghezza della strada.

Una rappresentazione vettoriale è molto utile per descrivere e rappresentare fenomeni in cui è fondamentale conoscere chiaramente i confini fra un oggetto ed un altro. Inoltre, facilita l'immagazzinamento di molte informazioni relative agli oggetti rappresentati.

La rappresentazione matriciale è la riproduzione di un attributo della realtà sottoforma di unità discrete chiamate *pixel*; si parla in questo caso di formato *raster*. Ogni *pixel* è caratterizzato da una determinata risoluzione spaziale, che ne definisce le dimensioni, e da un unico valore che qualifica l'informazioni in esso contenuta. Contrariamente al formato vettoriale in cui esistono oggetti di dimensioni differenti e in cui è possibile descrivere un oggetto con più di un attributo, una griglia (come lo è una matrice di *pixel*) non contiene oggetti ma solo celle della stessa dimensione e con l'informazione relativa ad un unico attributo.

Questa rappresentazione permette a quei fenomeni spaziali non descrivibili da limiti precisi di essere riprodotti in modo soddisfacente. Perciò, elementi come la distribuzione delle precipitazioni piovose, le tipologie di suolo, i tipi di vegetazione e pendio, che sono fenomeni contraddistinti da una elevata ambiguità riguardante il limite di una classe rispetto ad un'altra, possono essere rappresentati in maniera adeguata e integrati con informazioni precise dal punto di vista spaziale come lo sono le rappresentazioni vettoriali.

Per quanto riguarda la raccolta di dati da utilizzare in un *GIS*, oltre ad ottenere informazioni da immagini satellitari o da foto aeree, è anche possibile collezionare dati direttamente dalla realtà, sul campo, convertendoli successivamente in formato vettoriale o raster.

In questo senso, attualmente è di grande aiuto l'uso del *GPS*, che consente di accompagnare all'acquisizione di vari tipi di informazioni (ad esempio, campioni di terreno, indici di inquinamento, tipologie di alberi, ecc.) una precisa informazione sulla loro posizione geografica. Queste informazioni, corredate da un insieme di coordinate, possono essere facilmente convertite in un formato utilizzabile all'interno di un ambiente *GIS*.

Con un *GPS*, l'identificazione di realtà a terra per la definizione, ad esempio, di *samples* per una classificazione supervisionata o di punti di riferimento per la stima dell'accuratezza risulta semplificata.

Virtualmente, qualsiasi tipo di dato legato in qualche maniera allo spazio geografico può essere trasferito in un ambiente *GIS*. Informazioni precise ("statiche") come, ad esempio, un albero di un certo tipo lungo una strada di una città, o informazioni "dinamiche" come la valutazione del livello di conservazione dell'asfalto su un'autostrada, possono essere convertite in uno dei formati di rappresentazione disponibili e integrate con i dati esistenti su una certa zona.

Informazioni precise ottenute mediante *GPS* riguardanti il livello delle precipitazioni, le altimetrie o anche campioni di salinità permettono, in seguito all'applicazione di tecniche geo-statistiche di interpolazione, di sviluppare griglie contenenti superfici continue riportanti le variazioni degli elementi sopraccitati. Questo tipo di processo è estremamente utile nella produzione, integrazione e aggiornamento di informazioni ambientali quando si vuole monitorare un certo fenomeno.

La rappresentazione matriciale non ha oggetti, ma celle (*Tomlin, 1990*). Così, se un piano informativo costituito dalla distinzione in bosco/non-bosco di una zona montuosa è convertito in forma matriciale, esso avrà celle di una certa dimensione contenenti un valore che qualificherà una cella come bosco o come non-bosco. In una rappresentazione di questo tipo, di solito, la zona classificata come bosco sarà costituita da *pixel* con la stessa dimensione e lo stesso valore.

Un piano informativo, come l'informazione altimetrica, in formato matriciale sarà costituito da celle contenenti ciascuna un valore di altitudine, che andranno a formare una superficie raffigurante la forma del rilievo nello spazio.

Forme ben definibili, come il perimetro di un bosco che ne definisce il limite altitudinale, convertite in formato *raster* o matriciale si possono confrontare con forme difficilmente definibile come i pendii. Ogni *pixel* nella griglia del bosco ha la sua controparte, nella stessa posizione, nella griglia del pendio. Le differenze di forma fra i "poligoni bosco" e i "poligoni pendio" diventa omogenea nel passaggio a formato matriciale a causa della forma invariabile del *pixel* che costituisce la loro controparte nell'ambiente *raster*.

Una griglia prodotta usando un piano informativo riguardante il limite del bosco, può essere confrontata con una griglia contenete il pendio o la quota, rendendo possibili relazioni"cella a cella" fra le due griglie, permettendo, ad esempio, di individuare quali celle hanno una pendenza maggiore del *30%* o una quota superiore ad un certo valore. Il risultato di questa analisi sarà una griglia con le celle che soddisfano la condizione ricercata contenenti il valore 1, e quelle che non la soddisfano contenenti il valore 0 (questa stessa procedura è stata utilizzata per l'elaborazione dei dati effettuata nel paragrafo 4 del quarto capitolo).

Questo genere di analisi spaziale permette lo sviluppo di modelli basati sull'integrazione di diversi tipi di informazioni come mappe del rischio (incendi, deforestazione, ecc.), del potenziale agricolo e del potenziale di espansione urbana, fra le altre.

In generale, l'uso di tecnologie *GPS*, *GIS* e di telerilevamento, da sole o integrate, apre la strada ad un'ampia gamma di applicazioni di diversa natura. Alcune possono coinvolgere la determinazione della localizzazioni di siti campione, oppure il tracciamento di mappe da usare sul campo, o ancora l'analisi delle tipologie di terreno in relazione al raccolto e alla produttività. Applicazioni più complesse sfruttano le capacità analitiche dei software *GIS* e di telerilevamento; queste includono, fra le altre, operazioni di classificazione della vegetazione, al fine di studiare, ad esempio, lo sviluppo degli ecosistemi naturali

o creare mappe aggiornate delle coperture al suolo, come visto nel capitolo quinto.

6.2 OBIETTIVI E METODI

In questo capitolo viene affrontato il tema dell'integrazione di dati telerilevati e dati provenienti da rilievi a terra eseguiti mediante tecniche *GPS*. In particolare viene riportata l'esperienza condotta su una zona montuosa dell'Appenino Tosco-Emiliano (la stessa trattata nel capitolo 5). L'obiettivo dello studio è la definizione del limite altitudinale del bosco e l'individuazione di gruppi di alberi isolati al di sopra di esso mediante procedure di segmentazione e classificazione *object-based* di ortofoto aeree. La classificazione ottenuta è stata corretta mediante fotointerpretazione sulla base delle foto aeree della zona; in seguito, i risultati sono stati implementati in un sistema *GIS* al fine di verificarli e "validarli" mediante il confronto con dei profili *GPS*, fatti sul campo, del limite del bosco e degli alberi isolati. Le foto utilizzate sono le ortofoto digitali del Volo IT2000, del mese di luglio, con una dimensione del *pixel* a terra pari a $1m$. Per quanto riguarda il rilievo *GPS*, questo è stato compiuto mediante un ricevitore a doppia frequenza (*L1* e *L2*) appoggiato ad una rete di stazioni permanenti.

6.3 FASI DEL PROCESSO

Il processo ha seguito le seguenti fasi:

1. Segmentazione e classificazione delle ortofoto aeree;
2. Rilievo *GPS* ed elaborazione dati;
3. Implementazione dei risultati in un *GIS*.

Di seguito ogni fase verrà analizzata nello specifico.

6.3.1 Segmentazione e classificazione

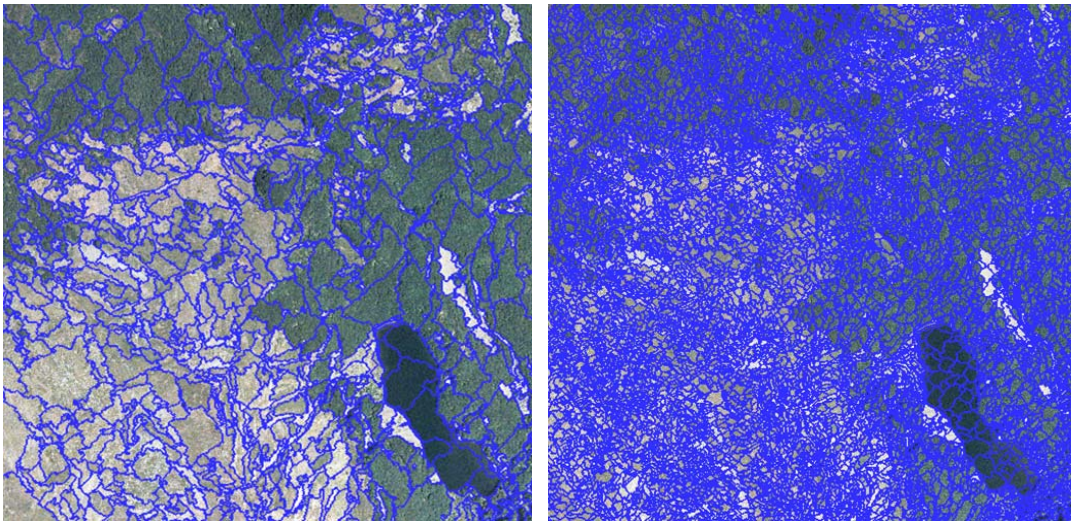
Lo scopo di questa fase è l'elaborazione delle immagini aeree al fine di determinare una procedura semi-automatica per l'estrazione del limite altitudinale del bosco e dei gruppi di alberi isolati al di sopra di esso. Si è scelto di procedere con una classificazione *object-based* in quanto è stata ritenuta più adatta per l'estrazione di *features* (limite del bosco ed alberi isolati) rispetto ai metodi classici basati sui *pixe*l; inoltre, si è cercato di definire una metodologia il più oggettiva possibile per la definizione della *timberline*, basata sull'utilizzo delle informazioni spettrali contenute nelle immagini e sulle relazioni esistenti tra gli oggetti definiti dal procedimento di segmentazione.

Questa procedura si basa, come detto nel capitolo quinto, sullo studio di diversi parametri: *scale*, *shape*, *color*, *compactness* e *smoothness* (*eCogniton User Guide, 2004*). Essi rappresentano le categorie di analisi dell'immagine: dimensione e forma dell'oggetto di interesse, grado di frammentazione del colore all'interno dell'oggetto e indicazione di quanto un oggetto sia compatto o "regolare".

Questi oggetti realizzano l'aggregazione in forma areale di più *pixel* adiacenti, andando così a costituire l'unità di base su cui si potrà operare una successiva procedura di classificazione, con la quale ad essi verrà assegnato un significato, cioè associata una categoria o classe.

I risultati della procedura di segmentazione sulle ortofoto sono riportati nelle figura 6.1 e 6.2.

Figura 6.1: ortofoto aerea RGB del Volo IT200, della zona studiata.



(a) (b)

Figura 6.2: ortofoto segmentate con diversi valori dei parametri: scale=70, shape=0.3, color=0.7, smoothness=0.5, compactness=0.5; (b) scale=20, shape=0.3, color=0.7, smoothness=0.5, compactness=0.5.

Una volta segmentata l'immagine si procede alla classificazione degli oggetti individuati. Il procedimento si sviluppa attraverso la definizione di diversi livelli gerarchici ad ognuno dei quali corrisponde un specifico livello di segmentazione definito dai parametri già citati.

Dopo una serie di prove con differenti valori dei parametri si è definita una struttura gerarchica riportata in figura 6.3.

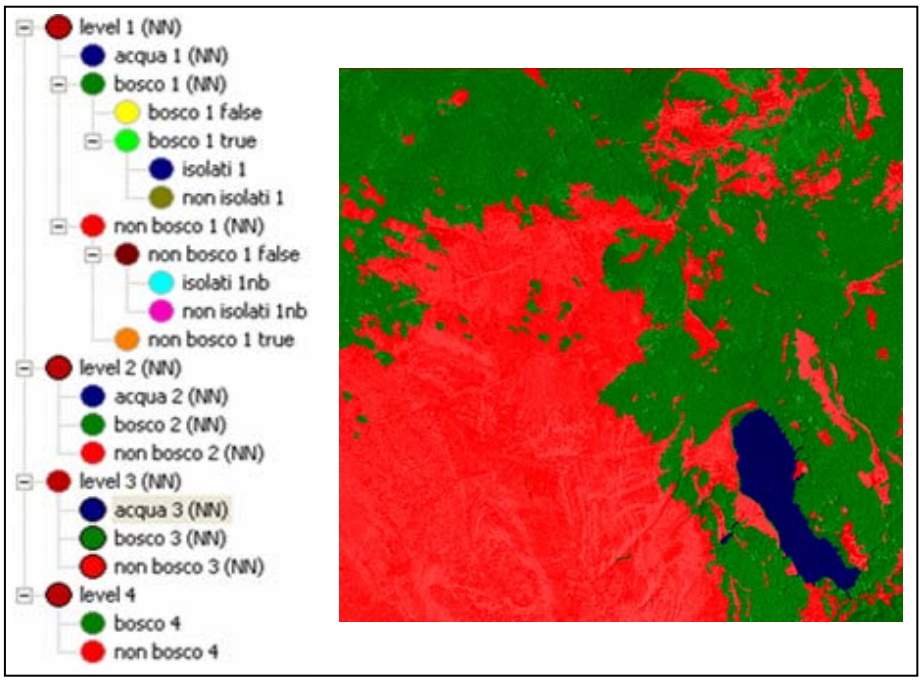


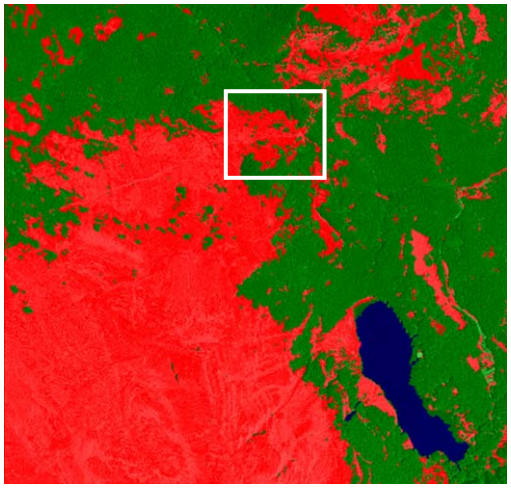
Figura 6.3: a sinistra la struttura gerarchica; a destra l'immagine classificata.

Inizialmente si è classificato il livello 3 per distinguere le classi "bosco", "non bosco" e "acqua". In questo modo si è determinata una prima distinzione fra tutto ciò che può essere considerato come "bosco" e tutto il resto. Per questa classificazione si è proceduto con il metodo supervisionato con la definizione di *training sites* significativi per ciascuna classe.

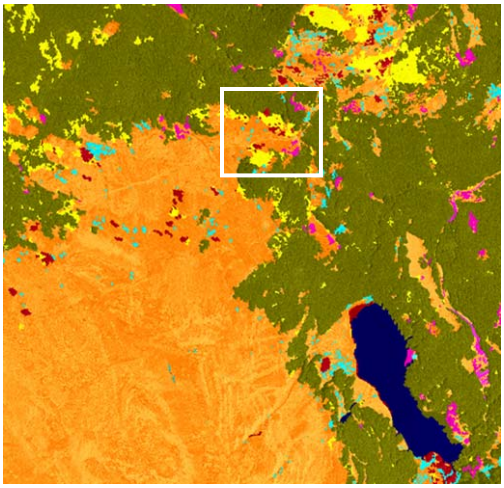
La classificazione del livello 3 presenta un buon grado di fedeltà con la realtà a terra osservabile sull'immagine aerea; sono comunque presenti delle aree erroneamente classificate, che corrispondono a poligoni assegnati ad una classe sbagliata. Perciò questa classificazione serve come punto di partenza per una "rifinitura" dei risultati al livello gerarchico inferiore, caratterizzato da un valore del parametro di scala più basso. In questo livello sono state create delle sottoclassi delle tre classi principali, in modo da distinguere all'interno di esse gli eventuali poligono mal classificati. Per raggiungere questo obiettivo sono stati implementati nella procedura di classificazione i seguenti parametri:

- E' stato definito, grazie agli strumenti messi a disposizione dal *software*, un indice "su misura", definito dalla seguente combinazione di bande delle ortofoto:
  - (banda rosso – banda blu)/(banda rosso + banda blu);
- E' stato creato e classificato un nuovo livello superiore prendendo in considerazione la relazione in termini di area con il livello inferiore:
  - (*Relations to sub objects* → *Relation area to class*);
- E' stato presa in considerazione la quota media del limite del bosco sulla base del *DEM*.

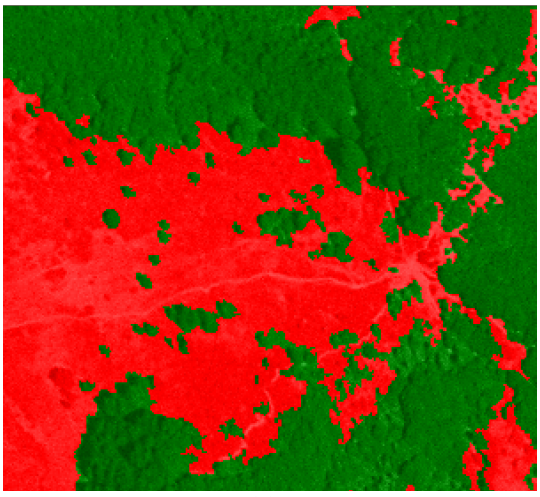
La classificazione finale è riportata nelle immagini di figura 6.4.



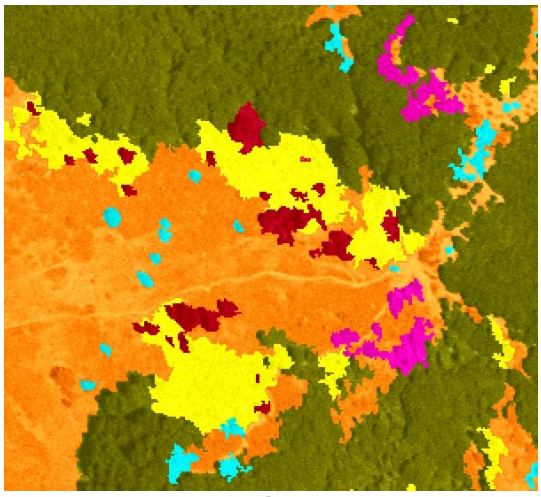
(a)



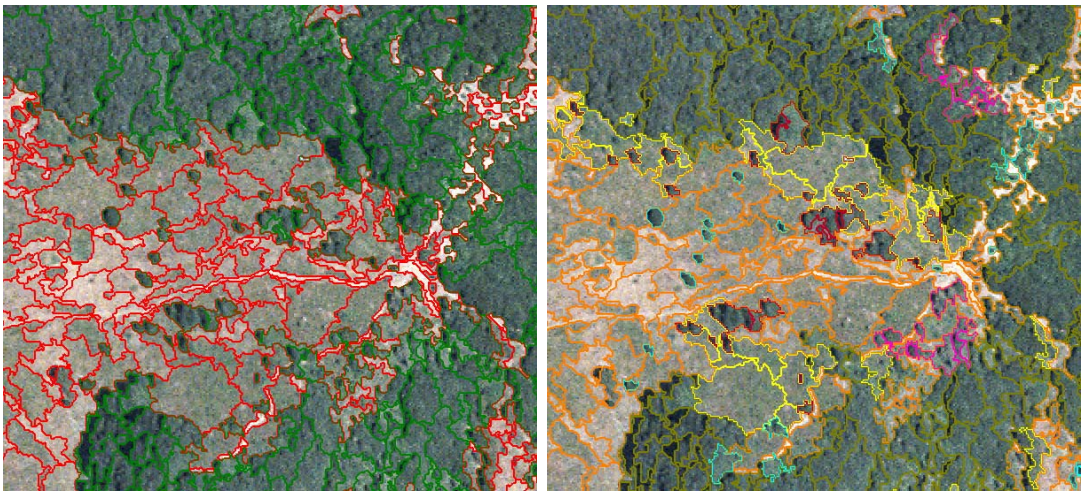
(b)



(c)



(d)



(e) (f)

Fig.6.4: classificazione livello 1: (a) bosco (verde)/non-bosco(rosso);(b) i colori evidenziano i poligoni corretti nel livello 1; (c), (d), (e), (f) subset significativo; legenda colori: il giallo rappresenta i poligoni del livello 3 classificati come bosco, e riclassificati come non-bosco nel livello 1; l'azzurro e il marrone rappresentano poligoni di alberi isolati; il viola poligoni bosco; l'arancione poligoni non-bosco.

Il risultato ottenuto nel livello 1 è più preciso e migliora la prima classificazione del livello 3. Si è cercato, utilizzando i parametri precedentemente indicati, di distinguere le zone a bosco dalle altre, e di separare all'interno delle prime i limite del bosco dai gruppi di alberi isolati al di sopra di esso. Anche in questo ultimo caso sono presenti degli errori di classificazione, che sono stati successivamente corretti mediante un *editing* manuale sugli oggetti.

6.3.2 Rilievo GPS ed elaborazione dati

Il sistema *GPS* (*Global Positioning System*) è un sistema satellitare in grado di determinare la posizione di punti sulla superficie terrestre con precisioni variabili dai 25 metri al centimetro, a seconda della metodologia utilizzata.

Esistono due categorie di ricevitori *GPS*: ricevitori mono-frequenza o L1, costituiti da sistemi portatili con precisione fino al metro; ricevitori a doppia frequenza L1-L2, rappresentati da sistemi con precisione centimetrica.

Nel rilievo compiuto è stato scelto un sistema a doppia frequenza per l'accuratezza offerta, per la possibilità di determinare la posizione di punti attraverso il calcolo, e per la maggiore affidabilità di posizionamento.

All'atto pratico, si è proceduto con un rilievo *GPS* a terra al fine di avere dei dati precisi riguardanti l'andamento del limite del bosco e la distribuzione dei gruppi di alberi isolati, da poter utilizzare per verificare l'efficacia del procedimento di segmentazione sulle ortofoto usate e, conseguentemente, la qualità della georeferenziazione delle stesse immagini.

Inoltre i dati sui profili del limite e degli alberi isolati permettono di capire quale sia l'unità minima mappabile distinguibile sulle ortofoto.

Poiché la risoluzione spaziale delle immagini è di 1 metro, si è scelto, come detto, un sistema *GPS* di alta precisione, con una risoluzione superiore a quella delle immagini, che offre la possibilità di determinare punti in prossimità della chioma fogliare e che permette di determinare la posizione di punti inaccessibili (come il tronco centrale di un albero) attraverso metodi operativi (Figura 6.10).

Il risultato del rilievo, contenente coordinate di punti di singoli alberi (isolati o appartenenti alla *timberline*) e di profili di gruppi di alberi isolati e del limite altitudinale del bosco, è stato usato come strumento per validare quanto ottenuto dalla procedure di segmentazione e classificazione.

Nello specifico, per il rilievo è stato effettuato un posizionamento in tempo reale *RTK* (*Real Time Kinematic, Cina, 2000*): tale tecnica permette di ricostruire la traccia puntuale di uno o più strumenti mobili rispetto ad uno o più stazioni fisse usando come osservabile principale la misura di fase. La trasmissione dei dati da un ricevitore all'altro e l'elaborazione avvengono in tempo reale.

Il rilievo è stato effettuato con un ricevitore *TRIMBLE 5800 VRS* (*Virtual Reference Station, Vollath et al., 2000*) appoggiandosi alla rete di stazioni permanenti *ASSOGEO* (Figura 6.5). L'uso di una rete di stazioni permanenti, al posto di una singola stazione, consente la realizzazione di un rilievo *GPS RTK* con un solo ricevitore e con una registrazione precisa del *Datum* del rilievo; in questo modo non è stato necessario effettuare il rilievo di punti noti, peraltro di difficile individuazione a causa delle caratteristiche del territorio rilevato (Figura 6.6). Inoltre, è possibile ridurre l'entità degli errori permettendo così di aumentare la distanza fra ricevitore e stazione oltre che migliorare l'affidabilità del sistema e ridurne i tempi di inizializzazione.

Figura 6.5: rete di stazioni permanenti ASSOGEO.

Il rilievo *RTK* è legato alla disponibilità di un segnale di correzione *RTK*, che può essere trasmesso o via radio o via telefono *GPRS*; quando tali condizioni sono state presenti si è potuto procedere al rilievo come segue:

a) Connessione ad un ricevitore base *RTK* o ad una rete (dove esistente);
b) Fissaggio delle ambiguità (circa 1 minuto);
c) Rilievo e calcolo dei punti.

Quando la copertura *GPRS* era assente, è stato necessario effettuare un rilievo in post processing come segue:

a) Rilievo;
b) Scarico di un file *rinex* di stazione virtuale;
c) Processamento dei dati tramite *software* dedicato.

Alla fine del rilievo, tutti i punti sono stati trasformati dal *datum WGS84-IGM95* della rete al *datum ED50* delle ortofoto utilizzando il software *VERTO3* dell'*IGM*. Tale *software* esegue una trasformazione fra sistemi di riferimento sia planimetrici che altimetrici. Per quanto riguarda i riferimenti planimetrici consente la conversione di coordinate in maniera univoca, basandosi

essenzialmente sulla definizione di griglie a passo regolare, di valori di differenze in coordinate geografiche, che coprono ampiamente il territorio nazionale (*Manuale Verto3*).

Figura 6.6: un momento del rilievo per l'individuazione del profilo della timberline.

Nella figura 6.7 è riportata parte della *timberline* rilevata tramite posizionamento *Stand Alone* (in rosso) e successivamente all'elaborazione dei dati di stazione virtuale (*Virtual Reference Station*, in verde). Si può notare come i dati elaborati tramite le correzioni *RTK* inviate dalla stazione, o post-processati successivamente, "combacino" meglio con il profilo del limite del bosco individuabile sulle immagini. Per il profilo del gruppo di alberi individuato dai puntini rossi sul bordo inferiore della figura, manca il corrispondente profilo corretto: in questo particolare caso, il rilievo è stato eseguito in *post-processing* e durante le operazioni a terra il segnale *GPS* è stato perso (ad esempio per la

presenza di chiome di alberi più elevate o altri ostacoli), impedendo così la risoluzione delle ambiguità

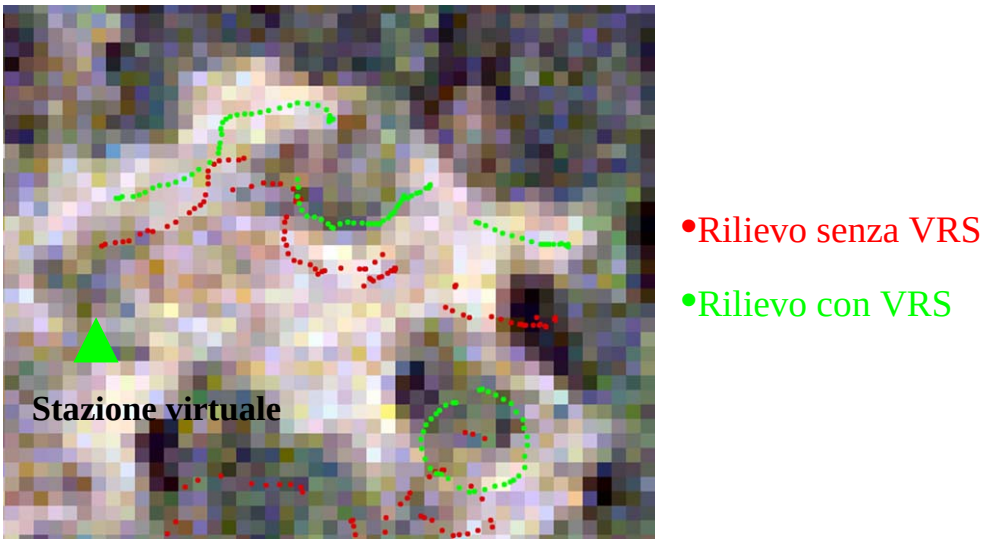


Figura 6.7: il triangolo verde rappresenta la posizione della stazione virtuale creata in prossimità del rilievo. I dati sono stati riportati nelle coordinate dell'ortofoto tramite Verto3.

6.3.3 Implementazione dei risultati in un GIS

I risultati ottenuti dal processo di segmentazione/classificazione e i dati elaborati del rilievo *GPS* sono stati inseriti in un *software GIS*, permettendo, da una parte, di confrontare il limite estratto in automatico con quello successivamente "editato" e corretto manualmente mediante fotointerpretazione dell'immagine, e, dall'altra, di ricostruire la posizione assoluta di punti inaccessibili a partire da punti *GPS* rilevati a terra. Inoltre, è stato possibile fare un confronto a video fra il limite del bosco ricavato tramite segmentazione e i profili rilevati sul campo, che dimostra un sostanziale accordo tra i due dati.

Sulla base dei poligoni segmentati, sono stati importati nel *GIS* (Figura 6.8), il limite del bosco ricavato dalla gerarchia di classi costruita e lo stesso limite corretto manualmente; la medesima procedura è stata applicata sui gruppi di alberi isolati (Figura 6.9). In ambiente *GIS*, si è cercato di fare una stima dell'accuratezza del limite estratto automaticamente rispetto a quello corretto. Per far ciò, si sono definite, sulla base del numero di *pixel* costituenti i due limiti, una *producer's* ed una *user's accuracy*.

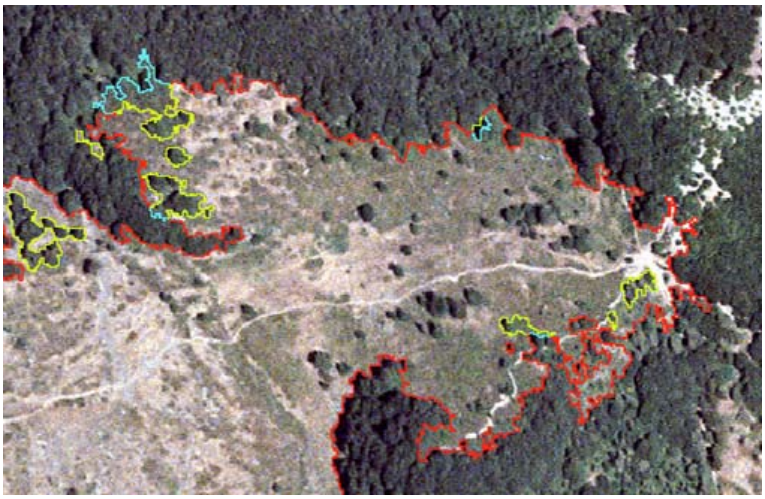


Figura 6.8: Confronto tra limite automatico e limite corretto, ottenuti dal processo di segmentazione/classificazione, in un subset significativo: in rosso le parti in cui i due limiti coincidono; in giallo il limite automatico; in azzurro il limite corretto.

In termini di errori di omissione, e quindi di *producer's accuracy*, si è ottenuto un valore percentuale del *93%*, a significare che il *93%* dei *pixel* del bosco di riferimento sono stati classificati dalla procedura automatica; riguardo agli errori di commissione, e quindi di *user's accuracy*, il risultato è stato dell'*80%*, cioè solo l'*80%* dei *pixel* costituenti il limite estratto in automatico sono effettivamente corretti. Le stesse considerazioni valgono per l'analisi compiuta sui gruppi di alberi isolati; in questo caso si è ottenuto un valore di *producer's accuracy* pari all'*87%* ed uno di *user's accuracy* pari all'*86%*.

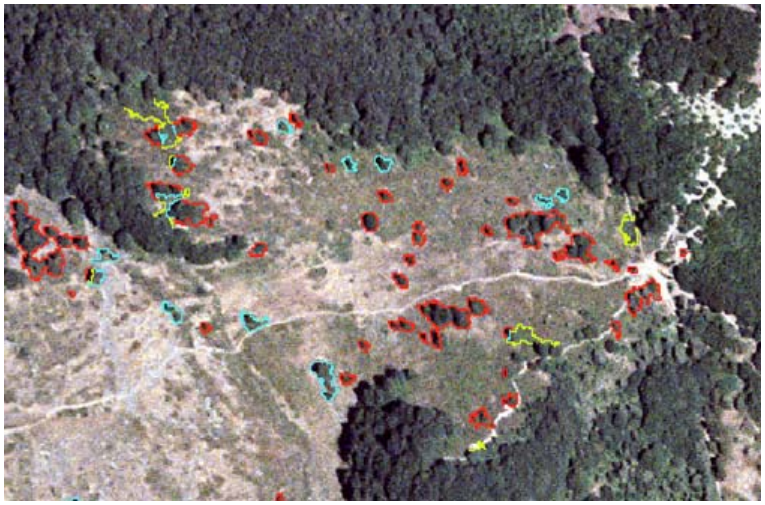


Figura 6.9: Confronto tra alberi isolati estratti in automatico e alberi "editati" a mano, ottenuti dal processo di segmentazione/classificazione, in un subset significativo: in rosso le parti in cui i due limiti coincidono; in giallo il limite automatico; in azzurro il limite corretto.

La posizione dei punti inaccessibili si è ricavata mediante le seguente procedura (Figura 6.10): nel caso (a), per ricostruire la posizione del Punto-1 (che corrisponde al tronco centrale dell'albero di cui si vogliono conoscere le coordinate) si è rilevato a terra il punto *GPS*-1a e di seguito il punto *GPS*-1b che si deve trovare lungo la linea immaginaria congiungente il punto *GPS*-1a con il Punto-1; avendo misurato sul campo con una cordella metrica la distanza *GPS*-1b/Punto-1 è stato possibile ricostruire la posizione del Punto-1 e ottenere le sue coordinate. Nel caso (b), la posizione del Punto-2 si ricava dall'intersezione delle due linee congiungenti i punti *GPS*-2a/*GPS*-2b e *GPS*-2c/*GPS*-2d.

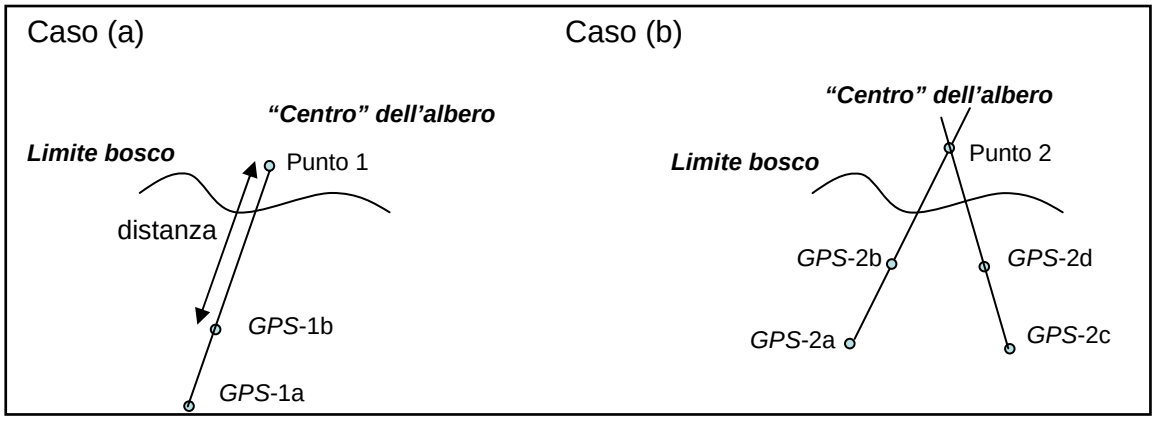
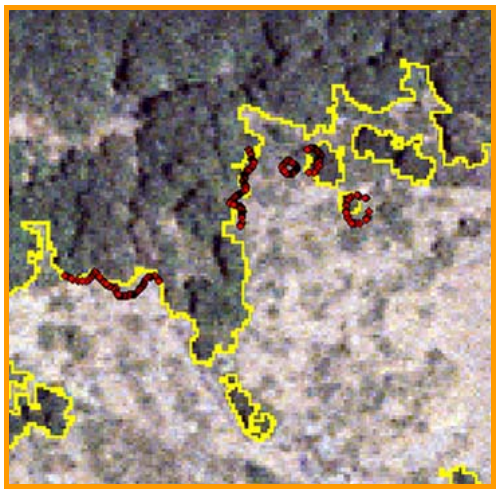


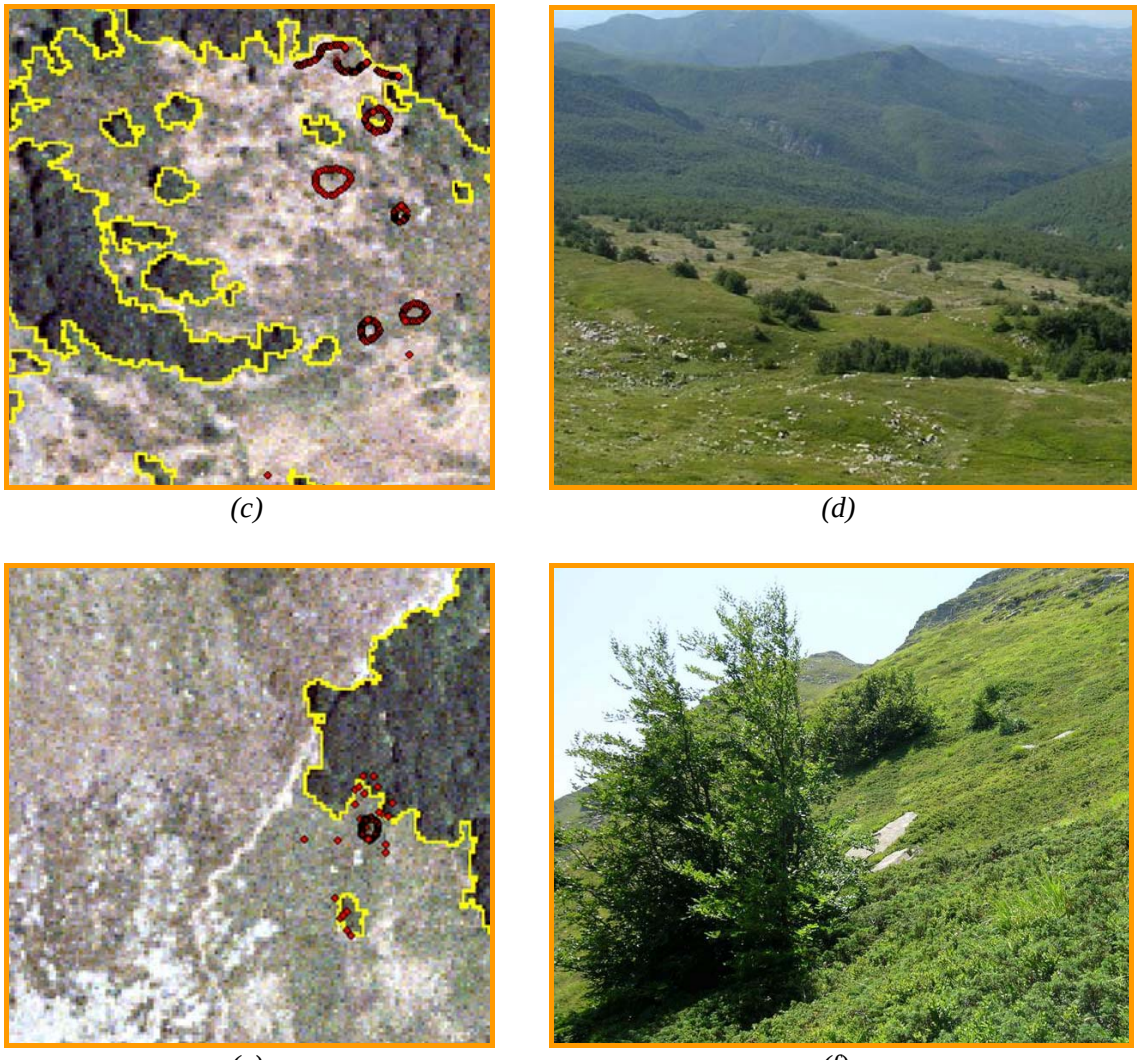
Figura 6.10: procedura di ricostruzione in ambiente GIS dei punti inaccessibili.

Infine, si sono sovrapposti a video il limite del bosco corretto, ricavato sulla base della segmentazione, con i profili *GPS* dello stesso (Figura 6.11).



(a)

(b)



(c) *(d)*

(e) *(f)*

Figura 6.11: (a), (c), (e) confronto visivo tra limite segmentato(in giallo) e profili calcolati (in rosso); (b), (d), (f) fotografie esemplificative delle zone riportate rispettivamente in (a), (c) e (e). I puntini rossi isolati rappresentano singoli alberi.

In questo modo si è potuto fare un controllo visivo della bontà del limite segmentato rispetto ai profili calcolati, caratterizzati da una maggiore precisione nelle coordinate.

6.4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI

Il limite individuato dal procedimento di segmentazione/classificazione sembra "combaciare" fedelmente con il profilo del limite rilevato a terra. Lo stesso si può dire per gli alberi isolati, ma con alcune precisazioni: la prima, è che i singoli alberi isolati e alcuni gruppi di alberi isolati di "piccole dimensioni" non

sono individuabili a video sull'immagine aerea; la seconda, è che alcuni gruppi di alberi isolati visibili nell'immagine non vengono però classificati dal processo di segmentazione/classificazione, cioè il *software* non è in grado (sulla base dei parametri di segmentazioni utilizzati) di distinguerli come singoli oggetti e quindi rappresentarli con un unico poligono.

Nello specifico, è ovvio che cambiando i parametri di segmentazione – magari riducendo il valore del parametro *scale* – questi alberi possano venire considerati come singoli poligoni, ma la riduzione del parametro *scale*, oltre ad aumentare i tempi di elaborazione, aumenta il numero di poligoni presenti, complicando notevolmente il procedimento di classificazione. Bisogna perciò sapere all'inizio quali sono gli obiettivi che si vogliono raggiungere, o meglio quale sarà l'utilizzo che si vuole fare della mappa rappresentata dall'immagine classificata che si ottiene.

In quest'ottica sarebbe da specificare il termine "piccole dimensioni", ovvero sarebbe da definire quella che si potrebbe chiamare unità minima mappabile, o sulla base della dimensione dell'elemento (inteso come gruppo di alberi isolati) che si riesce a distinguere a video sull'immagine o in base all'obiettivo che ci si è prefissati, che può dipendere dalle necessità dell'utente finale.

Si può osservare, infine, che il perimetro di bordo di alcuni gruppi di alberi isolati individuati dalla classificazione e "validati" dal rilievo a terra, non coincide perfettamente con quest'ultimo, e questo a causa della presenza di zone a forte pendenza o di avvallamenti; lo stesso si può dire per il profilo del limite. In generale, quindi, è sempre presente un problema di *relief diplacement*, cioè legato alle differenze di quota fra i punti costituenti uno stesso gruppo di alberi isolati o parte del limite.

Per gli stessi motivi, il rilievo *GPS* ha presentato alcune difficoltà operative legate, appunto, alla totale inaccessibilità o all'elevata acclività di alcune zone.

7 CONCLUSIONI

L'ambiente naturale e, in particolare, gli ecosistemi forestali sono sistemi dinamici complessi, che richiedono la disponibilità di dati ed informazioni di varia natura e, per molte applicazioni, ad ampio intervallo temporale. Il loro studio con gli strumenti e le tecniche proprie del telerilevamento richiede dunque dati multispettrali, multirisoluzione e multitemporali (*Colwell, 1983*), scelti in modo opportuno per rilevare le caratteristiche di interesse. Grazie alla crescente disponibilità di sensori satellitari ed aviotrasportati con differenti risoluzioni geometrica, spettrale, radiometrica e temporale il concetto di "multi" in telerilevamento è ormai una realtà concreta, anche se ovviamente l'analista deve fare i conti con la reale disponibilità dei dati, legata a fattori diversi, non solo economici e tecnici ma anche di effettiva presenza di immagini prive di copertura nuvolosa ed acquisite nei periodi desiderati.

Il presente elaborato ha dimostrato, come riportato nel capitolo 4, l'importanza che possono assumere le fonti storiche, se recuperate anche nelle loro caratteristiche metriche, all'interno di un processo di analisi multitemporale. La metodologia messa a punto ha consentito il confronto tra dati di diverse epoche ed ha permesso lo studio dell'evoluzione dell'ecosistema forestale negli ultimi cinquant'anni, confermando, almeno in parte, i cambiamenti avvenuti in un ambiente di questo tipo in seguito alle azioni umane dirette (ricolonizzazione e riforestazione di aree sfruttate dall'uomo) ed anche, pur se in misura decisamente minore, indirette (variazione altitudinale del limite del bosco in seguito all'innalzamento globale della temperatura).

Per quanto riguarda l'estrazione di informazioni dalle immagini, nel campo delle applicazioni forestali gli interessi maggiori sono rivolti alla definizione di procedure automatiche e semi-automatiche di classificazione. In quest'ambito sta acquisendo sempre maggiore interesse un approccio *object-oriented*, realizzato

da programmi che permettono di segmentare un'immagine in oggetti o poligoni significativi prima di classificarla; l'elemento base della procedura di estrazione delle informazioni non è più il singolo *pixel* bensì gruppi di *pixel* organizzati in oggetti, a loro volta raggruppabili in livelli a diversa scala di rappresentazione. L'adozione di un approccio object-oriented per questo tipo di applicazioni è stata determinata da una preliminare valutazione comparativa nei confronti delle più convenzionali tecniche basate sui pixel.

Il *software* ad oggetti utilizzato nell'analisi delle coperture ha messo a disposizione una vasta gamma di attributi, spettrali e di forma, per l'assegnazione degli oggetti alle singole classi. Il processo di classificazione ha richiesto la creazione di un *network* gerarchico, contenente diversi livelli di scala di rappresentazione, classi e sottoclassi per la cui descrizione, oltre a informazioni di tipo spettrale, è possibile utilizzare le relazioni inter-livello esistenti fra oggetti di classi e livelli differenti.

Questo ha permesso di definire con valori di accuratezza elevati (attorno al 90%, come riportato nel capitolo 6) il limite altitudinale del bosco ed i gruppi di alberi isolati; questi risultati sono stati validati anche dal rilievo *GPS* a terra condotto su aree campione. La classe rappresentante il bosco è apparsa con questa metodologia ben distinguibile dal contesto.

Maggiori difficoltà si sono incontrate nella classificazione delle coperture soprasilvatiche, con valori di accuratezza che si sono attestati attorno al 70%, a causa della difficoltà di discriminare alcune classi caratterizzate da valori spettrali molto vicini tra loro, come visto nel capitolo 5. Riguardo a questo tema, si è cercato di definire uno *standard* di rappresentazione per le classi ai diversi livelli di rappresentazione.

La possibilità di aggiornamento della cartografia tematica vegetazionale sulla base di dati aggiornati di tipo aerofotogrammetrico o satellitare è stata descritta nel capitolo quinto. A seconda degli obiettivi e delle esigenze dell'utente finale, tali mappe, integrate con altri tipi di informazioni multitemporali e multiscala in un ambiente *GIS*, danno la possibilità di avviare studi e analisi di sostenibilità. Tra gli obiettivi futuri degli studi presentati in

questo lavoro vi è anche l'analisi di immagini satellitari multispettrali ad altissima risoluzione (es. *QUICKBIRD*), da utilizzare all'interno della procedura individuata al fine di verificare i vantaggi che tali immagini possono portare rispetto all'uso integrato di ortofoto aeree e immagini satellitari multispettrali a diversa risoluzione, come analizzato nel capitolo 5.

Se la crescente disponibilità di dati storici e la commercializzazione di sensori con risoluzioni spaziali, spettrali, radiometriche e temporali sempre migliori ha portato ad un aumento verticale della quantità di dati telerilevati, gli obiettivi della ricerca per un utilizzo più efficace e mirato del telerilevamento nella gestione sostenibile dell'ecosistema forestale si possono riassumere nei seguenti punti:

- Definizione di metodi efficienti per interpretare e quantificare le informazioni estraibili dai dati spettrali;
- Incremento dell'integrazione di dati provenienti da diverse fonti in un ambiente *GIS*;
- Utilizzo mirato di dati a terra e provenienti da fotointerpretazione quando si vogliono estrarre informazioni sugli oggetti da classificare;
- Definizione della procedura per l'estrazione di informazioni che più si adatta ai bisogni dell'utente finale.

Per questo, le metodologie per l'estrazione di informazioni utili dalle immagini telerilevate (aeree e satellitari) devono diventare sempre più efficaci e selettive, cercando di selezionare di volta in volta i dati che meglio si adattano allo studio di un determinato fenomeno. E' necessario dare maggiore enfasi agli operatori spaziali e all'integrazione delle capacità di interpretazione dell'esperto umano con gli strumenti offerti dai moderni *software*. Le informazioni sulla tessitura, gli operatori di contesto, la segmentazione dell'immagine, la definizione di *network* gerarchici di classi, ed infine una più completa integrazione dei diversi strati informativi in un ambiente *GIS* sono tutti strumenti necessari se si vogliono ottenere i risultati migliori da una procedura per l'estrazione delle informazioni da immagini telerilevate nel campo forestale.

L’obiettivo della ricerca deve essere quello di contribuire ad aumentare le conoscenze sull’ecosistema forestale, sulla sua condizione e sull’impatto che le azioni dell’uomo hanno su di esso, cercando di proporre delle soluzioni in grado di assicurare una coesistenza sostenibile per entrambi nel prossimo futuro.

APPENDICE

LEGENDA CARTA DELLA VEGETAZIONE DEL MONTE GIOVO-RONDINAIO (Parco Regionale dell'Alto Appennino Modenese)

La legenda della carta della vegetazione è ricondotta al terzo livello *CORINE LAND COVER*. CORINE è un progetto a livello europeo che ha portato alla definizione di una gerarchia di classi composta di tre livelli contenenti 44 classi.

A partire da tale sistema di classificazione, ogni paese europeo sviluppa il progetto adattandolo alle proprie esigenze, con la definizione di classi specifiche a livello nazionale. L'interconnessione fra queste e le classi generali a livello europeo permette il confronto fra classificazioni prodotte in paesi diversi e con differenti tipologie di copertura.

Gli studi in corso cercano di integrare la gerarchia di classi di *CORINE* a un singolo livello di dettaglio, includendo un'analisi a scala locale e l'interpretazione dello spazio geografico, attraverso l'uso di mappe di copertura del suolo ottenute dalla classificazione di immagini aeree e satellitari ad altissima risoluzione.

3 TERRITORI BOSCATI ED AMBIENTI SEMINATURALI

3.1 Aree boscate

3.1.1 Boschi di latifoglie

3.1.1.1 Boschi mesofili, boscaglie a latifoglie decidue miste (*Fagetalia sylvaticae* Pawl.1928)

3.1.1.1.1 Fs Boschi di faggio (*Fagus sylvatica*), con acero di monte (*Acer pseudoplatanus*), sorbo degli uccellatori (*Sorbus aucuparia*), maggiociondolo di montagna (*Laburnum alpinum*) e, sporadicamente, abete bianco (*Abies alba*). Le faggete altomontane sono differenziate da *Gymnocarpium dryopteris, Polystichum lonchitis, Pyrola minor*, quelle bassomontane da *Sanicula europaea, Trochiscanthes nodiflora, Galium odoratum*. Sintassonomia: *Gymnocarpio-Fagetum sylvaticae* Ubaldi et Speranza 1985 (faggete altomontane) e *Saniculo-Fagetum* (Ubaldi et Speranza 1985) Ubaldi 1994 (faggete bassomontane).

3.2 Ambienti con vegetazione arbustiva e/o erbacea in evoluzione

3.2.1 Prateria e brughiere d'alta quota

3.2.1.1 Brughiere subalpine a mirtilli (*Loiseleurio-Vaccinietalia* Eggl. 1952)

3.2.1.1.1 Va Brughiere a *Vaccinium myrtillus* e *V. gaultherioides*. Vi sono compresi aspetti caratterizzati da elevata frequenza e grado di copertura di *Empetrum hermaphroditum*, corrispondenti ad espluvi con suolo sottile, aspetti con *Vaccinium myrtillus* dominante localizzati su suolo più profondo e aspetti con elevata copertura di *Juniperus nana*, localizzati nei versanti più soleggiati. Sono inoltre presenti anche aspetti ricchi di specie erbacee di transizione verso nardeti (Na) e brachipodieti (Bg). Sintassonomia: *Hyperico richeri-Vaccinietum gaultherioidis* Pirola et Corbetta 1971 (con dominanza di *Vaccinium myrtillus*), *Empetro-Vaccinietum gaultherioidis* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926) (aspetti con *Empetrum hermaphroditum*).

3.2.1.1.2 Vc Brughiere a mirtilli intercalate con pietraie stabilizzate, colonizzate da vegetazione del tipo Cc.

3.2.1.1.3 Vn Brughiere a mirtilli intercalate con pascoli a nardo (Na)

3.2.1.1.4 Gr Arbusteti a ginestra stellata (*Genista radiata*) e ginepro nano (*Juniperus nana*), con presenza di mirtillo nero (*Vaccinium myrtillus*) e dafne spatolata (*Daphne oleoides*). Nello strato erbaceo prevale *Brachypodium genuense*, accompagnato da specie trasgressive dei brachipodieti (es. *Cerastium arvense* subsp. *suffruticosum*, *Thymus polytrichus*). Si insediano in corrispondenza di cenge a giacitura suborizzontale esposte a Sud o Sud-Est, corrispondenti ad affioramenti marnosi che interrompono la continuità di pareti rocciose arenacee verticali o subverticali oppure costituisce uno stadio di ricolonizzazione arbustiva dei brachipodieti. Sono presenti aspetti strettamente intercalati con pareti rocciose colonizzate da una vegetazione termofitica affine al tipo Sx. Sintassonomia: aggruppamento a *Genista radiata* nell'ambito dello *Juniperion nanae* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939.

3.2.1.2 Prati da sfalcio e prati-pascoli montani (*Arrhenatheretalia* Pawl. 1928**)**

3.2.1.2.1 Cy (78) Prati-pascoli a *Cynosurus cristatus*. Sintassonomia: *Arrhenatheretalia* Pawl. 1928.

3.2.1.3 Pascoli magri montani e subalpini a nardo e/o brachipodio (*Nardion* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926**)**

3.2.1.3.1 Na Pascoli a *Nardus stricta* con *Geum montanum*, *Festuca rubra* subsp. *commutata*, *Plantago alpina*, *Potentilla aure*. Vegetazione derivante dal pascolamento in aree deforestate della faggeta (nardeti montani) oppure in aree del crinale precedentemente occupate dalla brughiera a mirtilli (nardeti subalpini). Sintassonomia: *Violo cavillieri-Nardetum* Credaro et Pirola 1975 corr. Tomaselli 1993 (nardeti subalpini), *Geo montani-Nardetum* Lüdi 1948 (nardeti alto-montani).

3.2.1.3.2 Bg Praterie xerofitiche secondarie, a *Brachypodium genuense* (brachipodieti) con *Geum montanum*, *Luzula multiflora*, *Festuca paniculata*, *Centaurea nervosa*) e con specie acidofile quali *Anthoxantum alpinum* e *Avenella flexuosa* e *Vaccinium myrtillus*, *V. gaultherioides*, *Hypericum richeri*. Oltre il limite superiore della vegetazione arborea sono diffusi principalmente sui versanti acclivi con esposizione meridionali. Sono presenti anche brachipodieti intrasilvatici differenziati da specie quali *Cerastium suffruticosum*, *Euphorbia cyparissias*, *Asperula oreophila*, *Astragalus purpureus* subsp. *gremlii*, *Dactylorhiza latifolia*, *Primula veris* subsp. *columna*. Sintassonomia: *Anthoxantho-Brachypodietum genuensis* Lucchese 1987 (brachipodieti soprasilvatici), quelli intrasilvatici presentano elementi di transizione verso le praterie xero-termofile dei *Festuco-Brometea* Br.-Bl. et Tx. 1943.

3.2.1.4 Praterie discontinue primarie di crinale (*Caricetalia curvulae* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926)

3.2.1.4.1 Ls Praterie discontinue a *Luzula spicata* e *Festuca robustifolia*, con presenza di *Agrostis rupestris, Phyteuma hemisphaericum, Juncus trifidus, Lunula lutea, Alchemilla saxatilis e Trifolium alpinum*. Colonizza pendii modellati dal crioclastismo e soggetti a fenomeni erosivi in prossimità della linea di crinale. Sintassonomia: Sileno excapae-Trifolietum alpini Tomaselli et Rossi 1993 subassociazione a *Luzula spicata* subsp. *mutabilis*.

3.2.1.5 Pascoli pingui e lembi di praterie neutrofitiche subalpine (*Caricion ferrugineae* G. Br.-Bl. et J. Br.-Bl. 1931**)**

3.2.1.5.1 Tf Pascoli pingui subalpini a Trifolium thalii e Festuca violacea subsp. puccinellii con Crepis aurea subsp. glabrescens e con Poa alpina, Plantago alpina, Alchemilla flabellata, Festuca rubra subsp. commutata. Si differenzia in tipi con maggior peso assunto da Alchemilla alpina e A. saxsatilis e alcune specie litofile. Sono diffusi nei versanti settentrionali in corrispondenza di pendii a copertura nevosa relativamente prolungata. Sintassonomia: Trifolio thalii-Festucetum puccinellii).

3.3 Zone aperte con vegetazione rada o assente

3.3.2 Rocce nude, falesie, affioramenti

3.3.2.1 Vegetazione rupicola(*Asplenietea trichomanis* Br.-Bl. in Meier et Br.-Bl. 1934 em. Oberd. 1977)

3.3.2.1. Sx Vegetazione rupicola a *Saxifraga paniculata* con *Woodsia alpina, Artemisia umbelliformis, Asplenium septentrionale*. Colonizza le fessure di rupi arenacee subverticali o verticali con esposizione nei quadranti settentrionali. Talora strettamente intercalati al tipo Sx, sono presenti alcuni tipi di praterie neutro-basifitiche a *Carex ferruginea* subsp. *Macrostachys, Anemone narcissiflora, Aquilegia* cfr. *alpina, Scabiosa lucida, Pulsatilla alpina* su cenge o fessure delle rocce.Sintassonomia: riferibile all'alleanza *Androsacion vandellii* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1921 ed inquadrabile nell'associazione *Drabo aizoidis-Primuletum apenninae* Tomaselli 1993.

3.3.3 Aree con vegetazione rada

3.3.3.2 Aree con vegetazione rada di altro tipo

3.3.3.2.1 Vegetazione di falde detritiche arenacee prevalentemente subalpine (*Androsacetalia alpinae* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926)

3.3.3.2.1 Cc Vegetazione a dominanza di *Cryptogramma crispa* ed altre pteridofite quali *Dryopteris filix-mas, D. oreades, D. expansa, Polystichum lonchitis*. Colonizza accumuli detritici stabilizzati formati da clasti di dimensioni da decimetriche a metriche. Sintassonomia: *Cryptogrammo-Dryopteridetum oreadis* Rivas Martinez in Rivas Martinez et Costa 1970.

3.3.3.2.2 Vegetazione di detriti marnoso-arenacei (*Thlaspietalia rotundifolii* Br.-Bl. 1926)

3.3.3.2.2.1 Ab (78) Vegetazione ad *Arenaria bertolonii, Robertia taraxacoides, Carum heldreichii* e *Saxifraga latina*. Colonizza colate detritiche a contatto con i pascoli a *Trifolium thalii* e *Festuca violacea* subsp. *puccinellii*. Sintassonomia: *Arenarietum bertolonii* Credaro et Pirola 1975.

3.3.3.2.2.2 Cb (78) Vegetazione affine al tipo precedente da cui si distingue per la dominanza di *Cirsium bertolonii* e per la presenza di diverse entità trasgressive dalle praterie a *Brachypodium genuense*. Sintassonomia: subassociazione a *Cirsium bertolonii* dell'*Arenarietum bertolonii*.

4 AMBIENTE UMIDO

4.1 Zone umide interne

4.1.1 Zone umide interne

4.1.1.1 Vegetazione di cinture lacustri prevalentemente formata da elofite (*Phragmitetalia* W. Koch 1926)

4.1.1.1.1 Sm Vegetazione a *Sparganium emersum* diffusa sul bordo di laghi, in acque moderatamente alcaline e relativamente povere di nutrienti. Sintassonomia: *Sagittario-Sparganietum emersi* Tx. 1953.

4.1.1.1.2 Cr Vegetazione a dominanza di *Carex rostrata*. Forma cinture perilacustri in acque neutre e relativamente oligotrofiche con oscillazioni della falda relativamente contenute. Sintassonomia: aggruppamento a *Carex rostrata* (*Magnocaricion* W. Koch 1926).

4.1.1.1.3 Ca Vegetazione a dominanza di *Carex vesicaria*. L'habitat è rappresentato da acque moderatamente acide e relativamente ricche in nutrienti. Il suolo è più permeabile che nel tipo precedente con maggiori fluttuazioni nel livello della falda. Sintassonomia: *Caricetum vesicariae* Br.-Bl. et Den. 1926.

4.1.2 Zone Torbiere

4.1.2.1 Vegetazione di torbiere basse acidofitiche oligo-mesotrofiche (*Caricion nigrae* Koch 1926 em. Nordh. 1937)

4.1.2.1.1 Cn Vegetazione a piccole carici con dominanza di *Carex nigra* e presenza di *C. canescens*, *C. stellulata, C. viridula* subsp. *oedocarpa, Juncus filiformis* e *Viola palustris*. L'habitat è rappresentato da sedimenti torbosi da debolmente acidi ad acidi e da oligotrofici a leggermente mesotrofici. Il livello della falda presenta oscillazioni abbastanza ampie. Nelle situazioni più a lungo inondate si forma un tappeto muscinale a *Sphagnum subsecundum*. Sono frequenti aspetti floristicamente impoveriti a causa del drenaggio artificiale ed alterati dal pascolamento. Sintassonomia: *Caricetum nigrae* Br.-Bl. 1925 con diverse varianti.

BIBLIOGRAFIA

Aronoff, S.; 1989. *Geographic Informations Systems*. WDL Pubications, Canada.

Bähr, H. P., and Vögtle, T., 1998. *Digitale Bildverarbeitung*. Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, 3. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg,

Benz, U., 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.

Bernetti, G., 1998. *Selvicoltura speciale*. UTET, Torino.

Bishop, Y.M., Fienberg, S., Holland, P., 1975. *Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*. Cambridge: The MIT Press.

Bitelli, G., Ferrari, C., Girelli, V.A., Gusella, L., Mognol, A., Pezzi, G., 2005. *Integrazione di immagini multitemporali aeree e satellitari per lo studio del pattern della vegetazione nell'Appennino: un caso di studio*. Atti 9° Conferenza Nazionale ASITA, 371-376.

Bohm, R., Auer, I., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Schoner, W., 2001. *Regional temperature variability in the European Alps: 1760-1998 from homogenized instrumental time series*. Int. J. Climatol 21: 1779-1801.

Cacchi, E., 2007. *Pattern temporale del limite altitudinale del bosco nell'Appennino settentrionale: una banca dati georeferenziata*. Tesi di laurea in Scienze Ambientali, Università di Bologna.

Campbell, J.B., and Ran, L., 1993. *CHROM: a C program to evaluate the application of the dark object subtraction technique to digital remote sensing data*. Comput. Geosci., 19: 1475–1499.

Canadian Council of Forest Ministers, 1995. *Defining Sustainable Forest Management. A Canadian Approach to Criteria and Indicators.* Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, Ottawa.

Casella, V., Cavazzini, A., Gentili, G., 2004. *La camera aerofotogrammetria digitale Leica ADS40: i nuovi orizzonti nelle applicazioni delle riprese aeree digitali per la rappresentazione del territorio*. Atti della VIII Conferenza ASITA, pagg. 681-686, Roma, Italia, 14-17 dicembre 2004

Cihlar, J., Manak, D., and Voisin, N., 1994. *AVHRR bidirectional reflectance effects and compositing*. Rem. Sensing Environ., 48: 77–88.

Cina, A., 2000. *GPS Principi, modalità e tecniche di posizionamento*. Celid, Torino, pp. 126.

Cohen, W.B., Fiorella, M., Gray, J., Helmer, E., and Anderson, K., 1998. *An efficient and accurate method for mapping forest clearcuts in the Pacific Northwest using Landsat imagery*. Photogramm. Eng. Rem. Sensing, 64: 293–300.

Colwell, R.N., 1983. *Manual of Remote Sensing*. 2nd ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD.

Congalton, R.G.,1991. *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data*. Remote Sensing of Environment, Vol. 37, pp. 35-46.

Coops, N.C., and Culvenor, D., 2000. *Utilizing local variance of simulated high spatial detail imagery to predict spatial pattern of forests*. Rem. Sensing Environ., 71: 208–260.

Curran, P.J., and Kupiec, J.A., 1995. *Imaging spectroscopy: a new tool for ecologists. Pages 71–88 in F. M. Danson and S. E. Plummer, Eds*. Advances in Environmental Remote Sensing. John Wiley & Sons, London.

De Kok, R., Schneider, T., Ammer, U., 1999. *Object based classification and applications in the Alpine forest environment*. Proceedings of the Joint ISPRS/EARSeL Workshop on Fusion of Sensor Data, Knowledge Sources and Algorithms", Valladolid, Spain, 1999.

Diner, D.J., Anser, G.P., Davies, R., Knyazikhin, Y., Muller, J.P., Nolin, A.W., Pinty, B., Schaaf, C.B., and Stroeve, J., 1999. *New directions in Earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 80: 2209–2228.

Dobson, M.C., 2000. *Forest information from synthetic aperture radar*. J. For., 98: 41–43

Donaghue, D.N.M., 1999. *Remote sensing*. Prog. Phys. Geogr., 23: 271–281.

eCognition User Guide, 2004. Definiens Imaging. München, Germany.

Ferrari, C., Buffa, G., Poggi, G., Zenti, S., 2002. *Alto Appennino Reggiano. Carta della Vegetazione con itinerari naturalistici (1:25000)*. Regione Emilia Romagna. Servizio Sistemi Informativi Geografici.

Ferrari, C., Piccoli, F., 1997. *The ericaceous dwarf shrublands above the Northern Apennine timberline*. Phytocoenologia 27 (1): 53-76.

Ferrari, C., Cherubini, P., Magnani, S., Pezzi, G., 2005. *Ecologia del limite altitudinale del bosco nell'Appennino Settentrionale*. Inform. Bot. Ital. 37 (1 A): 210-211.

Foglein, J., and Kittler, J., 1983. *The effect of pixel correlations on class separability*. Pattern Recognition Lett., 1: 401–407

Franklin, S.E., 2001. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. CRC Press LLC, New York.

Franklin, S.E., and Peddle, D.R., 1987. *Texture analysis of digital image data using spatial co-occurrence*. Comput. Geosci., 13: 293–311.

Franklin, S.E., Wulder, M.A., and Lavigne, M.B., 1996. *Automated derivation of geographic window sizes for remote sensing digital image texture analysis*. Comput. Geosci., 22: 665–673.

Fransson, J.E.S., Walter, F., and Olsson, H., 1999. *Identification of clear-felled areas using SPOT P and Almaz-1 SAR data*. Int. J. Rem. Sensing, 20: 3583–3593.

Galetto, R., 2004. *Camere digitali per riprese aeree e terrestri*. Bollettino SIFET, n. 4, pagine: 45-85.

Gemmell, F.M., and McDonald, A.J., 2000. *View zenith angle effects on the forest information content of three spectral indices*. Rem. Sensing Environ., 72: 139–158.

Gillis, M.D., and Leckie, D.G., 1996. *Forest inventory update in Canada*. For. Chron., 72: 138–156.

Giorgini, G., 2006. *Recupero a fini metrici di fotogrammi aerei storici nell'analisi dell'evoluzione in ambito urbano*. Tesi di laurea in Ingegneria Civile, DISTART, Università di Bologna.

Gongalton, R.G., 1991. *A Review of Assessing The Accuracy of Classification of Remote Sensing Data*. Remote Sensing of The Environment 37: 35-46.

Gu, D., and Gillespie, A., 1998. *Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun-canopy-sensor geometry*. Rem. Sensing Environ., 64: 166–175.

Gusella, L., Bitelli, G., Mognol, A., 2005. *Determinazione dei parametri di segmentazione in immagini aeree e telerilevate: un approccio semantico all'ottimizzazione*. Atti Convegno SIFET, "Integrazione tra le tecniche innovative del rilievo del territorio e dei beni culturali", 2005, Palermo; CD-Rom, 8 pagg., ISBN 88-901939-1-3.

Hay, G.J., Niemann, K.O., and McLean, G.F., 1996. *An object-specific image texture analysis of H-resolution forest imagery*. Rem. Sensing Environ., 55: 108–122.

Haralick, R.M., 1986. *Statistical image texture analysis*. Pages 247–279 in T. Y. Young and K. S. Fu, Eds. Handbook of Pattern Recognition and Image Processing. Academic Press, New York.

Haralick, R.M., and Joo, H., 1986. *A context classifier*. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing, 24: 997–1007.

Haralick, R.M., Shanmugam, K., and Dinstein, I., 1973. *Texture features for image classification*. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., 3: 610–621.

Henderson, F.M., and Lewis, A.J., Eds., 1998. *Principles and Applications of Imaging Radar*. Vol. 2, John Wiley & Sons, New York.

Herold, M., Mueller, A., Guenter, S. and Scepan, J., 2002. *Object-oriented mapping and analysis of urban use/cover using Ikonos data*. In: Proc 22 EARSEL Symposium Geoinformation for European- wide integration, Prague.

Hofmann, P., 2001. *Detecting Informal Stetlements from Ikonos Image Data Using Methods of Oriented Analisys*. Regensburg. ISBN 3-88246-222-1.

Holben, B.N., and Justice, C.O., 1980. *The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors*. Photogramm. Eng. Rem. Sensing, 46: 1191–1200.

Holtmeier, F.K., Broll, G., 2005. *Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines at landscape and local scales*. Global Ecology and Biogeography 14: 395-410.

Kalkhan, M.A., 1994. *Statistics properties of six six accuracy indices using simple rondom and stratified rondom sampling: An application in remote sensing*. PH.D Dissertation , Colorado State University, Fort Collins. USA.

King, D.J., 1991. *Determination and reduction of cover type brightness variations with view angle in airborne multispectral video imagery*. Photogramm. Eng. Rem. Sensing, 57: 1571–1577.

King, D.J., 1995. *Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications*. Can. J. Rem. Sensing, 21: 245–273.

Körner, C., 1998. *A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation*. Oecologia 115: 445-459.

Kraus, K., 1994. *Fotogrammetria*. Vol. 1.

Kuntz, S., and Siegert, F., 1996. *Dipterocarp forest mapping and monitoring by satellite data: a case study from East Kalimantan. Pages 206–227 in A. Schulte and D. Schone, Eds*. Dipterocarp Forest Ecosystems: Towards Sustainable Forest Management. World Scientific, Singapore.

Lachowski, H., Maus, P., and Roller, N., 2000. *From pixels to decisions: digital remote sensing technologies for public land managers*. J. For., 98: 13–15.

Landgrebe, D.A., 1997. *The evolution of Landsat data analysis*. Photogramm. Eng. Rem. Sensing, 63: 859–868.

Lausi, D., Pignatti, S., 1973. *Die Phänologie der europäischen Buchenwälder auf pflanzensoziologischer Grundlagen*. Phytocoenologia 1(1): 1-63.

Lillesend, T.M. and Kiefer, R.W., 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Lillesend, T.M. and Kiefer, R.W., 1998. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Losacco, U., 1982. *Gli antichi ghiacciai dell'Appennino settentrionale. Studio morfologico e paleogeografico*. Atti Società Naturalisti Modena 113: 1-224.

Manuale Verto3, 2005. Istituto Geografico Militare – Servizio Geodetico. Firenze, Italia.

Marr, D., 1982. *Vision*. H. Freeman and Co.

Mather, P., 1987. *Comuter Processing of Remotely Sensed Images.* John Wiley & Sons, London.

Mendronho, R., 1995. *Tese de mestrado. Geoprocessamneto e saúde*. Rio de Janeiro: FIOCRUZ/CICT/NECT.

Mercalli, L., Cat-Berro, D., Ratti, M., 2003. *Caratterizzazione termica del versante padano dell'Appennino settentrionale per una correlazione tra clima locale e timberline*. Società Meteorologica Italiana, Torino. Technical Report.

Miller, L. D., Pearson, R.L., and Tucker, C.J., 1976. *A mobile field spectrometer laboratory*. Photogramm. Eng. Rem. Sensing, 42: 569–572.

Muller, E., 1993. *Evaluation and correction of angular anisotropic effects in multidate SPOT and Thematic Mapper data*. Rem. Sensing Environ., 45: 295–309.

Neale, C.M.U., and Crowther, B.G., 1994. *An airborne multispectral video/radiometer remote sensing system: development and calibration*. Rem. Sensing Environ., 49: 187–194.

Pasimeni, E., 2005. *Uso multitemporale di dati aerofotogrammetrici e telerilevati per lo studio dello sviluppo boschivo nell'Appennino emiliano*. Tesi di laurea in Ingegneria Civile, DISTART, Università di Bologna.

Patterson, K., and Jensen, J. R., 1998. *Development of Improved Image Classification Algorithms to Extract Quantitative Urban Landuse/ Land cover Information from High Spatial Resolution Digital Imagery*. Remote Sensing Laboratory. University of South Carolina, Columbia, USA,

Pezzi, G., Bitelli, G., Ferrari, C., Girelli, V.A., Gusella, L., Masi, S., Mognol, A., 2007. *Pattern temporale del limite altitudinale dei boschi di faggio nell'Appennino settentrionale. Un'analisi di dati fotogrammetrici.* Accettata e in corso di pubblicazione su Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale.

Peterson, D.L., and Parker, V.T., Eds. 1998. *Ecological Scale: Theory and Applications*. Columbia University Press, New York.

Rego, L.F.G., 2003. *Automatic land-cover classification derived from high-resolution ikonos satellite image in the urban atlantic forest in Rio de Janeiro, Brasil, by means of objects-oriented approach*. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.

Richards, J.A., and Jia, X., 1998. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Springer, Verlag, Berlino.

Roberts, A., 1995. *Integrated MSV airborne remote sensing.* Can. J. Rem. Sensing, 21: 214–224.

Running, S.W., Queen, L., and Thornton, M., 2000. *The Earth Observing System and forest management*. J. For., 98: 29–31.

Schweitzer, G.E., 1982. *Airborne remote sensing*. Environ. Sci. Technol., 16: 338A-346A.

Skole, D.L., and Tucker, C.J., 1993. *Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988*. Science, 260: 1905–1910.

Smith, G.M., and Hoffmann, A., 2001. *An object based approch to urban feature mapping*. Regensburg. ISBN 3-88246-222-1.

Smith, G.M., and Milton, E.J., 1999. *The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance*. Int. J. Rem. Sensing, 20: 2653–2662.

Spurr, S.A., 1960. *Photogrammetry and Photo-interpretation.* 2nd ed. Ronald Press, New York.

Strahler, A.H., Woodcock, C.E., and Smith, J.A., 1986. *On the nature of models in remote sensing*. Rem. Sensing Environ., 20: 121–139.

Taylor, J.E., 1993. *Factors causing variation in reflectance measurements from bracken in eastern Australia*. Rem. Sensing Environ., 43: 217–229.

Teillet, P.M., 1986. *Image corrections for radiometric effects in remote sensing*. Int. J. Rem. Sensing, 7: 1637–1651.

Tomlin, D., 1990. *Geographic information systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall, New York.

Vincini, M. e Frazzi, E., 2005. *Caratterizzazione della suscettibilità all'erosione dei vigneti in un'area del Chianti mediante analisi object-oriented di immagini VHR*. Rivista Italiana di Telerilevamento, n. 32, 2005: 57-66.

Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., 2000. *Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*. In Proceedings ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake Citty.

Wolter, P.T., Mladenoff, D.J., Host, G.E., and Crow, T.R., 1995. *Improved forest classification in the northern Lake States using multitemporal Landsat imagery*. Photogramm. Eng. Rem. Sensing, 61: 1129–1143.

Woodcock, C. E., and J. Harward, 1992. *Nested-hierarchical scene models and image segmentation*. Int. J. Rem. Sensing, 13: 3167–3187.

Wulder, M.A., 1998. *The prediction of leaf area index from forest polygons decomposed through the integration of remote sensing, GIS, Unix and C*. Comput. Geosci., 24: 151–157.