



Università degli Studi della Tuscia di Viterbo

Dipartimento di tecnologie, ingegneria e scienze dell'Ambiente e delle Foreste

Dottorato di Ricerca in **“Scienze e tecnologie per la gestione forestale e ambientale”** XIX ciclo

“Metodi e protocolli applicativi di elaborazione dei dati geografici a grande scala con il GIS per l'analisi della vegetazione arborea e successiva gestione delle risorse forestali all'interno delle aree protette di piccola e media dimensione”

AGR10

Coordinatore: **prof. Antonio Leone**

Tutor: **prof.ssa Ripa Nicoletta**

Dottorando: **Rossi Carlo Maria**

SOMMARIO

1. Introduzione	3
2. Cenni sui metodi per l'acquisizione, la verifica e la elaborazione dei dati per la realizzazione di un Sistema Informativo Territoriale Locale utilizzando il GIS per la gestione delle risorse forestali all'interno delle aree protette di piccola dimensione.	8
2.1 Archivio dati del Sistema Informativo Territoriale.....	8
2.2 La qualità dei dati nei SITL	11
3. Utilizzo delle ortofoto per la fotointerpretazione.....	26
3.1 Cenni sulle potenzialità del telerilevamento ai fini forestali. Cenni sull'impiego delle foto aeree per fotointerpretazione.....	26
3.2 Cenni sull'utilizzo di foto aeree per applicazioni nel settore forestale	28
3.3 L'impiego delle ortofoto per fotointerpretazione.....	33
3.4 Individuazione dei fototipi	37
3.5 Classificazione dei fototipi.....	41
3.6 Limiti della fotointerpretazione da immagini telerilevate.....	45
3.7 Protocolli applicativi e metodologie di fotointerpretazione utilizzate per la classificazione nelle aree protette oggetto di analisi	49
3.8 Digitalizzazione delle aree omogenee.....	51
3.9 Applicazione di un metodo semiautomatico di segmentazione per le aree boscate	54
3.10 Utilizzo di ortofoto da voli storici per la fotointerpretazione	55
4. Costruzione del modello morfologico.....	62
4.1 Metodi per il controllo della qualità dei DEM.....	62
4.2 Metodi speditivi e tecniche standardizzate per la costruzione del DEM sulla base della CTR	71
5. Fase dei rilievi.....	72
6. Qualificazione definitiva.....	73
7. Utilizzo del gis per l'analisi della frammentazione delle formazioni arboree: applicazione di un sistema automatico di discriminazione bosco_no-bosco e valutazione dell'accuratezza tematica dei risultati	77

ABSTRACT

Our contribution is the result of the planning of three LIS (Land Information System) to compile the plans of management of the forest resources within as many small protected areas in the Viterbo Region (Italy). Considering the acquired experiences and, above all, the practical difficulties we met, the purpose of this work is to contribute to provide indications for the application of correct, easy, hasty methods and application protocols of the geographical data elaboration on a large scale with the GIS, in order to provide a theoretical and practical support for a correct and quick achievement of the technical assignments to those who will carry out the management plans of the woods in small and medium dimension ($< 20 \text{ km}^2$) protected areas.

The predisposition of a local-LIS is at the moment an essential operation for those who need not only develop a management plan of the forest resources in a protected area but also carry out the routine management of the woods in the same area, the periodic data updating, test and future monitoring.

The fundamental operations to carry out a local LIS are the acquisition of a suitable software, and of the existing spatial data, their validation and the procedures for the treatment and the analysis of the data, the change of the existing data and the creation ex novo of further data and the final verification of their accuracy.

The GIS software diffusion among the employees, such as professional studies, local offices, local Police corps, university institutes, etc., has by now become so widespread that it has partly or entirely replaced the analogical methods used so far making them practically irreplaceable tools in the management of the protected areas both for the preliminary phases of study and for the conclusive elaborations and future monitoring.

However the potentialities of these software are not always known; besides, it is necessary to acquire detailed information as to the functions we want to use, to the parameters we need to apply, to verify every passage in order to rationally apply the indicated procedures, being constantly careful of the initial and final data quality.

And, though we keep the methodological aspects common to those for the predisposition of a LIS, the creation of a local-LIS will still be a particular one as it answers to local and practical needs, so that it is strictly related to the purposes and, above all to the scale of work.

Nevertheless it will be necessary and recommended to accompany every phase of its creation with a careful verification of the quality of the data and processes used. The principal operations to be developed are the acquisition and the qualification of the data, their alignment in one single

system of reference, the use of images from Remote Sensing for the photo-interpretation, the construction of a morphological model, the planning and the execution of the reliefs, the definitive qualification and the cartographic editing.

For each of these passages it is necessary to plan methodologically the things to do on the base of the acquired experiences and the bibliographical research. In particular, we have focused in the analysis of the quality of the most common local Digital Terrain Models comparing them with those recreated through the digitization of the contours of the Regional Technical Map (CTR) of “Regione Lazio” and through the application of an automatic classification method of the wood/no-wood layer starting from the aerial colour photography.

1. INTRODUZIONE

Nel corso dei miei tre anni di ricerca come dottorando presso il DAF mi sono occupato dell'analisi della vegetazione arborea presente all'interno RN di Tuscania, del SIC "Lago di Mezzano", del SIC-ZPS "Caldera di Latera" e delle relative linee di gestione.

Il tipo di ricerca che mi sono proposto di realizzare in collaborazione con il DAF è quello di trovare un protocollo applicativo e dei metodi speditivi, applicando il GIS, per la predisposizione di un Sistema Informativo Territoriale Locale (SITL) e per ridurre i tempi ed i costi per l'analisi della vegetazione arborea e successiva gestione delle risorse naturali all'interno delle aree protette di piccola e media dimensione (< 2.000 ha).

Alla luce delle esperienze acquisite e soprattutto delle difficoltà pratiche incontrate, lo scopo di questa tesi è quello di contribuire a fornire indicazioni per l'applicazione di metodi e protocolli applicativi corretti, facili e sbrigativi di elaborazione dei dati geografici a grande scala con il GIS ai fini di fornire a coloro che dovranno effettuare i piani di gestione dei boschi nelle aree protette, o che dovranno monitorare periodicamente le dinamiche strutturali e funzionali degli stessi attraverso il GIS, un sostegno teorico-pratico per una corretta e veloce realizzazione degli elaborati tecnici.

La diffusione di software GIS tra gli addetti ai lavori, quali studi professionali, Enti territoriali, Corpi di polizia territoriale, Istituti universitari, ecc., è divenuta ormai capillare da sostituire in parte o del tutto i metodi analogici finora utilizzati tanto da rendere questi strumenti insostituibili nella gestione delle aree protette sia per le fasi preliminari di studio che per le elaborazioni conclusive e per i monitoraggi successivi.

I costi di acquisto dei programmi di cartografia di buon livello, quali per esempio ArcGis della ESRI, Image della ERDAS o IDRISI della Clark University, sono tuttavia ancora molto elevati, anche se ad onor del vero occorre menzionare la possibilità di reperire gratuitamente sulla rete internet alcuni free-GIS come GRASS di livello paragonabile ai precedenti. Tuttavia a fronte di una spesa iniziale impegnativa i vantaggi che si possono avere con l'uso esperto e soprattutto corretto di questi programmi sono notevoli. A differenza, infatti, dei visualizzatori-GIS i quali permettono solo semplici operazioni di query o di overlay, i GIS professionali e i desktop GIS forniscono tutta l'ampia gamma di funzioni di importazione, conversione, trattamento, elaborazione ed editing dei dati geografici. A titolo di esempio si riportano nella sottostante figura tutte le principali funzioni implementate in ArcGis 9.x.

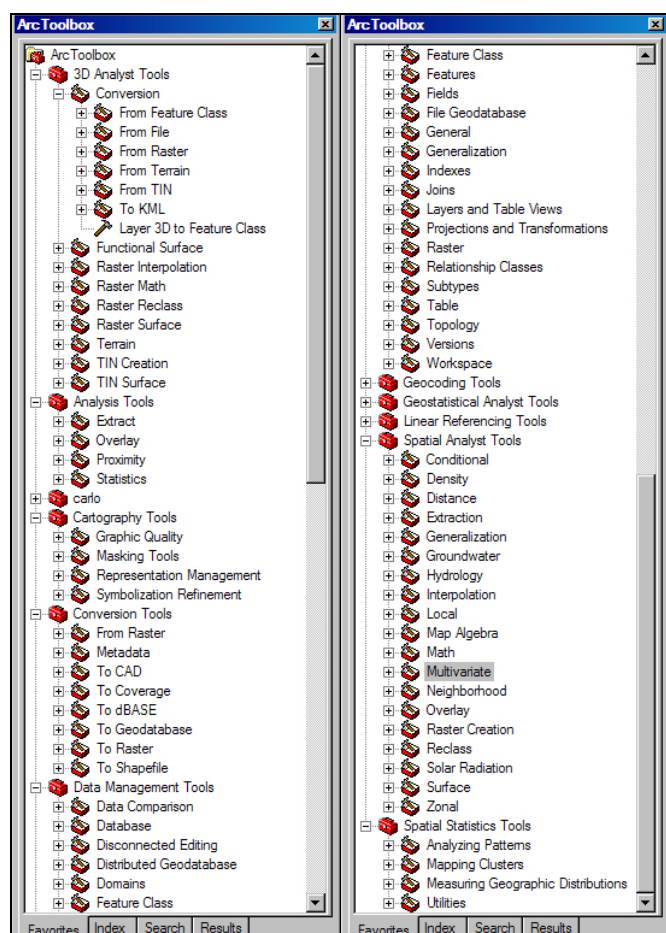


Fig. 1

Nonostante gli sforzi recenti di semplificazione e soprattutto di standardizzazione delle funzioni, queste risultano tuttavia di non facile applicazione senza un adeguato supporto teorico e senza una certa esperienza. Per quanto riguarda il primo aspetto, esistono guide facili da consultare, ed insegnamenti attivati in tutti i corsi di laurea che hanno a che fare con le discipline legate al territorio e di recente corsi e-learning effettuati tramite rete internet o intranet. Al contrario l'esperienza si può soltanto acquisire con il tempo e con il sostegno di persone preparate e della ricerca bibliografica aggiornata sui recenti sviluppi applicativi. Nonostante ciò spesso ci si imbatte in errori grossolani dovuti sia alla scarsa qualità dei dati di partenza, sia al cattivo trattamento ed elaborazione degli stessi. Per limitare tali errori o perlomeno per esserne consapevoli occorre sempre verificare la qualità dei dati ed accompagnare i risultati ottenuti dal metadato con indicazioni circa l'origine ed i passaggi effettuati di ciascun dato geografico trattato.

Il presente contributo è il risultato della progettazione di tre SITL per redigere i piani di gestione delle risorse forestali all'interno di altrettante piccole aree protette della provincia di Viterbo. Le tre aree oggetto di studio e di sperimentazione dei modelli di analisi e gestione con il GIS sono di seguito brevemente descritte.

La Riserva Naturale di Tuscania, è una Riserva regionale istituita nel 1997 con la Legge Regionale del 6 ottobre n° 29 (art. 7 “Piano regionale e piani provinciali delle aree naturali protette” comma 1; 2; 3) ed è attualmente gestita dalla provincia di Viterbo. E’ classificata tra le riserve cosiddette orientate, e, quindi, è consentita la fruizione da parte del pubblico allo scopo colturale ed educativo secondo gli usi e consuetudini ed entro i limiti di settore delle norme del piano. Essa ha una estensione di circa 1900 ettari interamente compresi nel Comune di Tuscania ed al suo interno sono presenti due siti di Importanza Comunitaria (SIC): il SIC “Fiume Marta” (cod. IT6010020) con una superficie totale di 791,8 ha, di cui 425,3 ha compresi all’interno dell’area protetta ed il SIC “Sughereta di Tuscania” (cod IT60100036) con una superficie totale di 49,5 ha di cui 40,3 ha all’interno dell’area protetta. La riserva ha una forma molto allungata perché è stata istituita per salvaguardare la forra del Fiume Marta per un lungo tratto sia a nord che a sud del paese che è il più suggestivo dal punto di vista paesaggistico e storico. Sono compresi nella riserva anche le profonde forre ricche di vegetazione create dai settori terminali di alcuni suoi affluenti. I boschi sono relegati su aree più acclivi ed accidentate, quasi sempre le spalle a forte pendenza delle forre e rappresentano solo il 23% della superficie protetta, circa il 26% se si considerano anche le formazioni minori.

Le altre due aree protette, ubicate anch’esse in provincia di Viterbo, sono contigue ed entrambe racchiuse all’interno della caldera di Latera che insieme alle depressioni attualmente coperte dal Lago di Bolsena e dall’area di Montefiascone ha rappresentato nel passato geologico il principale apparato vulcanico del complesso Vulsini. Essa si presenta di forma ellittica (8 x 10 Km), con un’estensione totale di 1217,5 ha, ad un’altezza media di 485 metri s.l.m..

La destinazione d’uso prevalente del territorio è agricola, infatti, la maggior parte dell’area è sottoposta a pratiche colturali: le coltivazioni predominanti sono di tipo estensivo, con ampia destinazione a seminativo; estensioni significative sono destinate anche al pascolo. Le formazioni arboree occupano poco più di un quarto dell’intero territorio, un terzo se si associano ad esse le formazioni minori quali arbusteti e aree interessate dalla ricolonizzazione arbustiva-arborea.

L’intera conca di Latera è attraversata, da ovest ad est, dal fiume Olpeta, affluente di sinistra del Fiora. La presenza del corso d’acqua, seppur fiancheggiato da estensioni agricole, nel complesso risulta fondamentale per garantire un arricchimento vegetazionale dell’intera area.

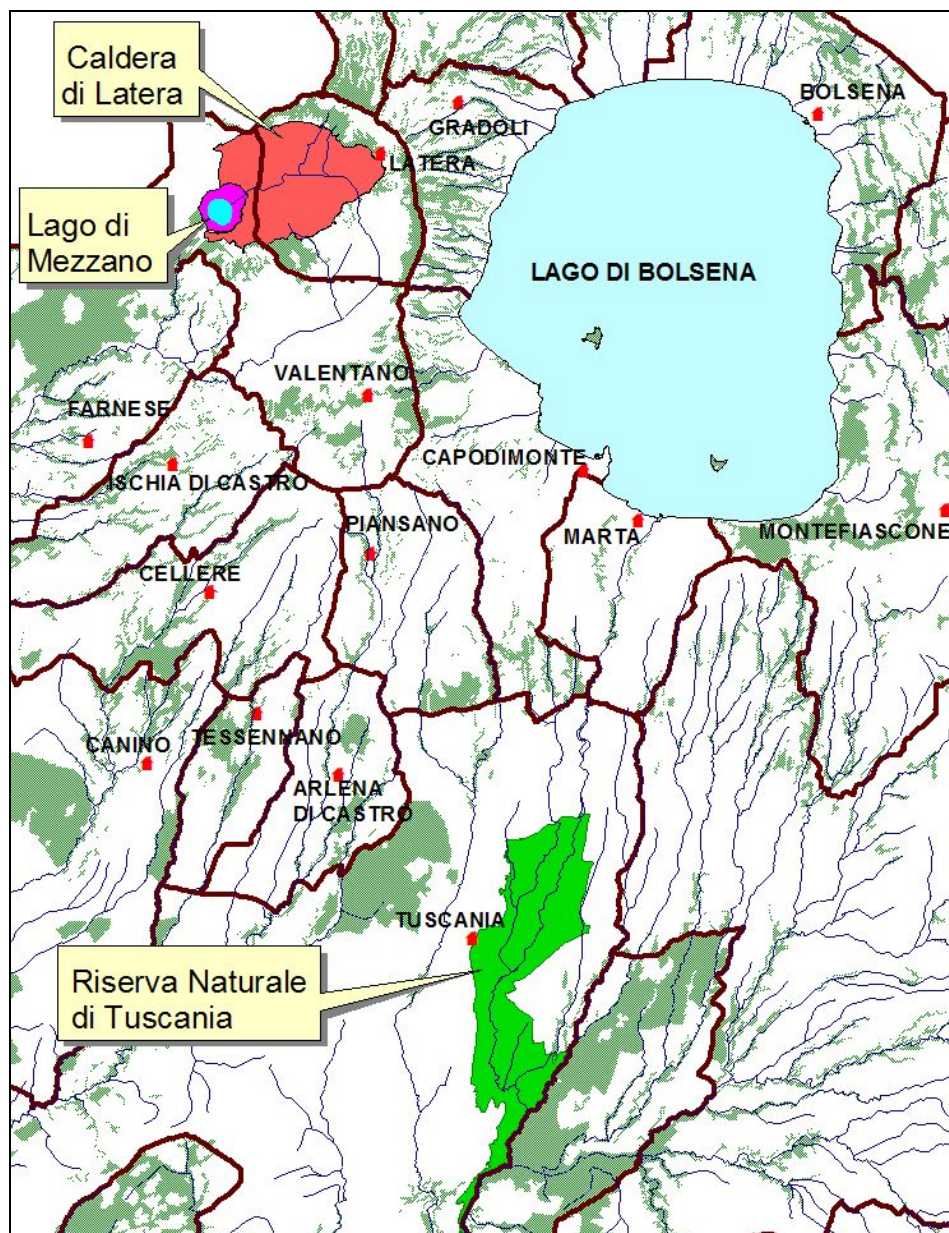


Fig. 2

2. Cenni sui metodi per l'acquisizione, la verifica e la elaborazione dei dati per la realizzazione di un Sistema Informativo Territoriale Locale utilizzando il GIS per la gestione delle risorse forestali all'interno delle aree protette di piccola dimensione.

Per Sistema Informativo Territoriale o Geografico (SIT o SIG) s'intende una specifica applicazione GIS (il software) per la gestione dei dati georeferenziati relativi a una determinata area territoriale, tramite apposite risorse umane e tecnologiche (hardware) dedicate.

In altre parole, la metodologia che consente di reperire, verificare, archiviare, elaborare, riportare su mappe ed aggiornare le suddette informazioni è detta Sistema Informativo Territoriale, mentre il GIS è la parte hardware-software di un SIT che consente di effettuare le varie operazioni (acquisizione, archiviazione, rappresentazione) tramite un computer e le sue periferiche (memoria di massa, scanner, plotter ecc.) in maniera integrata, da cui il termine "sistema". In pratica, quindi, la differenza tra SIT e GIS sta nell'intervento degli operatori: nel primo delle persone, fisicamente, progettano, organizzano ed effettuano il lavoro di acquisizione e rielaborazione; il sistema GIS è la parte informatica del tutto, quindi un sottosistema del SIT il quale, teoricamente, non sarebbe necessariamente basato su supporti informatici.

La predisposizione di un Sistema Informativo Territoriale Locale (SITL) è ormai un'operazione irrinunciabile per chi deve predisporre un piano di gestione delle risorse forestali di un'area protetta ma anche per effettuare la gestione ordinaria dei boschi nell'area stessa, gli aggiornamenti periodici dei dati, le verifiche ed i monitoraggi futuri. Le operazioni fondamentali per realizzare un SITL sono l'acquisizione di un software adeguato, il reperimento dei dati spaziali esistenti, la loro validazione e le procedure per il trattamento e l'analisi dei dati, la modifica dei dati esistenti e la creazione ex novo di ulteriori dati e la verifica finale della loro accuratezza.

2.1 Archivio dati del Sistema Informativo Territoriale

Per costruire un SIT a grande scala utilizzando il GIS è di fondamentale importanza, una volta scelto il GIS più adatto, l'acquisizione e/o la creazione di una banca dati geografica completa ed aggiornata e cioè di un insieme di dati geografici pertinenti all'area di studio, e quindi a scala adeguata, che abbracciano tutti gli aspetti che influiscono sulla conoscenza dei fenomeni ambientali avvenuti, in atto e sugli scenari futuri e che sappiano rispondere positivamente ai principali standard di qualità.

A titolo di enumerazione dei possibili dati utili a costruire un SITL per la gestione dei boschi in un'area protetta si riporta il seguente elenco:

1. Dati di tipo ambientale:

- uso e copertura del suolo;
- clima;
- habitat presenti sul territorio e loro caratteristiche quali-quantitative;
- associazioni vegetali;
- tipologie forestali (composizione, struttura, dei boschi);
- areali e uso del territorio della fauna selvatica;
- formazioni geologiche;
- pedologia;
- emergenze naturalistiche di particolare interesse;
- idrografia;
- fitopatologie;
- ecc.

2. Dati di tipo economico-sociale:

- tipologie di uso del suolo;
- trattamento e governo
- distribuzione e struttura aziende agricole ed in particolare di quelle zootecniche;
- caratteristiche delle formazioni forestali pubbliche e private;
- esistenza di usi civici;
- progetti di taglio passati e futuri
- imprese di utilizzazione boschiva;
- impianti di trasformazione del legno;
- centrali a biomassa;
- ricettività turistica;
- infrastrutture pubbliche (elettrodotti, strade, ecc.);
- ecc.

3. Dati di tipo pianificatorio:

- piani di assestamento forestale;
- piani regolatori;
- piani paesistici e relativi vincoli;

- piani faunistico-venatori;
- piani di assetto delle aree protette;
- vincolo idrogeologico;
- cartografia catastale;
- catasto degli incendi;
- carta delle aree a rischio incendio;
- ecc.

4. Dati relativi all'impatto sull'ambiente delle attività umane:

- inquinamento dell'aria;
- impianto e diffusione di specie esotiche invasive;
- presenza e localizzazione di discariche abusive di rifiuti;
- fenomeni di erosione del suolo da lavorazioni agricole;
- degradazioni dell'ambiente derivante da impatti turistici;
- aree di maggior pressione venatorie o di bracconaggio;
- intensità, periodo e localizzazione delle attività di raccolta dei sottoprodotti del sottobosco;
- fenomeni di taglio abusivo e potatura di alberi, asportazione di lettiera, asportazione di sughero ed altri danni agli alberi ed ai boschi;
- ecc.

Tutti questi ed altri dati ancora dovrebbero far parte del Sistema Informativo Territoriale Locale (SITL). La fase della costruzione del database è quella più impegnativa perché oltre allo sforzo di reperimento dei dati, spesso attinenti a più archivi e più fonti ed a volte senza neanche la certificazione di provenienza, si aggiunge la verifica della loro qualità e della loro congruenza.

A parte comunque la disponibilità esterna di dati aggiornati e corretti, per approntare un SITL efficace occorre aggiungerne altri relativi alla realtà locale e quindi specifici. Essi possono derivare da dati di partenza tramite operazioni di overlay e digitalizzazione oppure essere creati ex novo sulla base di informazioni raccolte sul campo. Mentre per i dati esterni non è possibile influire sulla loro qualità per quelli derivati o creati occorre affidarsi a standard di valutazione di qualità i cui risultati dovranno essere esplicitati nel metadato allegato a ciascuno di essi.

A fronte di un lavoro faticoso di costruzione del database, vi è il grande vantaggio di poter richiamare immediatamente i dati con il GIS ed operare quei confronti e quella visione d'insieme utile e necessaria a comprendere ed analizzare un fenomeno territoriale che in quanto tale porta con sé la complessità dei suoi molteplici aspetti. Per fare un esempio: è inutile analizzare lo stato di

salute di un singolo bosco (che è anzitutto una cenosi caratterizzata dalla competizione specifica e interspecifica e quindi non riducibile ad un insieme di individui arborei che comunque ha una sua fisionomia) senza contestualizzarlo all'interno di un ambiente che è composto da suolo (inteso in senso fisico e biologico), clima attuale e passato, locale e generale, presenza di specie animali di ogni genere, dagli insetti ai macromammiferi, attività umane le più disparate, fenomeni di inquinamento locali o regionali, puntiformi o diffusi, di tipo biologico e/o chimico, storia socio-economica dei luoghi, ecc.

2.2 La qualità dei dati nei SITL

La qualità dei dati geografici a disposizione, prodotti da qualsivoglia operatore o ente, deve essere valutata con attenzione. In particolare occorre sempre conoscere tutte le informazioni che sono alla base della loro produzione. I dati descrittivi dei dati, detti metadata, sono un insieme strutturato di informazioni digitali relative a una determinata base di dati e preparato da chi ha realizzato la base di dati.

La qualità può essere definita come il grado di rispondenza di un prodotto, di un servizio o di una prestazione a criteri di soddisfacimento da parte degli utenti finali sulla base di parametri oggettivi di valutazione. In particolare, la qualità dei dati spaziali in un SITL è un obiettivo di massima che può essere raggiunto attraverso una attenta progettazione ed il controllo di qualità nelle varie fasi di creazione o modifica dei dati stessi per cui l'affidabilità delle procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati ha un impatto sul valore e sull'utilità dei dati stessi.

La qualità di un SITL è un parametro che attiene alle varie parti che lo compongono:

- dati (database);
- hardware (calcolatori, strumenti nella fase di aggiornamento, unità di output);
- software (di acquisizione, gestione, analisi);
- risorse umane (quantità, grado di conoscenza).

Essa inoltre è relativa e definita nelle fasi di costituzione ed utilizzo del SITL:

- fase progettuale di costruzione del SITL;
- acquisizione dei dati;
- analisi, elaborazione dei dati acquisiti e creazione di nuovi dati;
- editing ed esportazione dei dati.

In generale la qualità del database di un SITL dipende da una grande quantità di fattori. Dal punto di vista metodologico, la sua valutazione è possibile solo se è nota la metodologia di lavoro in tutte le fasi di costruzione del SITL ed in particolare dipende da:

- una esatta definizione, in sede di specifiche tecniche, del contenuto informativo e delle regole e modalità di acquisizione dei dati;
- una esatta definizione della scala di lavoro e delle dimensioni minime di cattura degli oggetti geografici e della corrispondente primitiva di rappresentazione (raster, vector);
- la definizione delle classi degli attributi e dei loro limiti di classificazione;
- la presenza e le modalità di esecuzione dei test di qualità da effettuare nelle varie fasi con la determinazione del grado di qualità raggiunto;
- la correzione degli errori ed eventualmente l'eliminazione delle fonti di errore durante l'acquisizione, gestione ed utilizzo dei dati.

Per quanto concerne l'ultimo punto, gli errori nel database possono essere introdotti:

- dalla presenza di errori nei dati di partenza;
- durante la fase di acquisizione;
- dagli strumenti o dalle errate metodologie nella fase di digitalizzazione;
- nella fase di immagazzinamento;
- nelle fasi di trattamento dei dati;
- nella fase di uscita dei dati;
- nella fase di interpretazione e corretto uso dei dati.

Nel campo della pianificazione forestale spesso si ha a che fare con dati geografici senza alcun metadato o con informazioni scarse ed insufficienti. A tal proposito con l'informatizzazione circolano dati la cui certificazione d'origine con relativa metodologia di acquisizione spesso si perde nel passaggio da un operatore all'altro. E' il caso per esempio dei Modelli Digitali del Terreno, di cui si farà un esempio di controllo di qualità nei paragrafi successivi, oppure della stessa cartografia topografica di base, quale quella delle CTR, la cui accuratezza è data per scontata, ma a seguito di confronti con la realtà durante i rilievi a volte se ne deve dubitare.

LE COMPONENTI DELLA QUALITÀ DEI DATI

La qualità dei dati solitamente viene misurata in base a un insieme di indicatori (o parametri), di cui sotto si riportano quelli principalmente usati, con le loro definizioni e caratteristiche.

ACCURATEZZA

E' l'inverso dell'errore, cioè della differenza fra il valore riportato o ricavabile nel dato e il valore "vero" ricavato direttamente o accettato come tale. La valutazione dell'accuratezza di una osservazione (misura) può essere fatta solo per confronto con la misura più accurata che sarebbe possibile ottenere. Il risultato è appunto la misura dell'errore:

- per i dati di tipo numerico (essenzialmente, dati di posizione) vengono usati indici di tipo statistico, quali media e deviazione standard;
- per i dati di tipo non numerico (di solito, classificazioni) si possono valutare gli errori tramite la matrice dell'errore di classificazione.

Essa si può suddividere in:

1. Accuratezza spaziale o posizionale (planimetrica, altimetrica; relativa ed assoluta). E' il parametro che maggiormente influenza la qualità del lavoro di predisposizione di un database nei SITL. Essa si definisce come la differenza nella posizione di un punto sulla cartografia rispetto alla posizione reale nel sistema di riferimento cartografico utilizzato ed è collegato con il fattore di scala nominale.

Essa dipende da:

1. Errori dovuti agli strumenti di acquisizione. Per es. la posizione fornita dal GPS durante le fasi di rilievo in campo. Un'altra fonte molto comune di errore è quello della maldestra acquisizione in formato digitale della cartografia cartacea tramite scanner per movimenti durante la fase di scansione soprattutto se essa sia già deformata in partenza per piegature e deformazioni varie o contenuta all'interno di un testo.

2. Precisione nella fase di trasformazione tra formati (da raster a vector e viceversa) o all'interno degli stessi (tra grid e formato immagine più o meno compressa o tra formati vettoriali di vario tipo). Per esempio la qualità finale dei dati vettoriali ottenuti da quelli raster dipende da una serie di fattori quali la risoluzione del raster, l'applicazione o meno di algoritmi di generalizzazione delle linee. Un caso frequente di modifica dell'accuratezza posizionale è quello del ricampionamento dei raster nel passare da un formato ad un altro con risultati molto diversi a seconda del tipo e dell'estensione del filtro finestra di applicato.

3. Tipo di trasformazione utilizzata per la georeferenziazione dei dati. Un caso di modifica dell'accuratezza spaziale molto diffuso è quello della trasformazione di sistemi di coordinate di uno strato raster o vettoriale con risultati che variano, seppur di pochi metri, tra un GIS e l'altro o a seconda dei metodi di trasformazione tra Datum.

4. Precisione dovuta a digitalizzazione. Essa dipende ovviamente dal tipo di scala nominale di lavoro e dalla preparazione ed esperienza dell'operatore o dalla giusta impostazione dei parametri nelle classificazioni automatiche e semiautomatiche.

E' opportuno ricordare di non confondere l'accuratezza dalla precisione, termini che esprimono aspetti differenti in relazione alla qualità dei dati. La precisione, infatti, esprime la dispersione delle misure ripetute; essa quindi attiene alla metodologia e/o alle strumentazioni utilizzate per effettuare la misura. La precisione di un processo di misura è quantificabile dal "minimo valore discriminabile". Per esempio dire che uno strumento di misura ha una precisione di 1 metro significa dire che gli oggetti misurati possono differire tra loro di almeno un metro.

2. Accuratezza tematica: accuratezza dei valori degli attributi codificati in una base di dati; essa dipende dalla scala di misura dei dati (per esempio la decisione di attribuzione al bosco di quei poligoni con superficie superiore a 0,5 ha) o dalla legenda di classificazione, meglio se gerarchica ed esaustiva di tutte tipologie riscontrate o fotointerpretabili, ed, anche qui, dall'esperienza dell'operatore e dalle impostazioni dei processi di classificazione automatici e semiautomatici.

3. Accuratezza temporale (o attualità). Essa, assieme ad esaustività e genealogia riguarda i parametri di qualità globale, cioè riferita all'intero database geografico acquisito o prodotto.

Si definisce come la concordanza fra il valore codificato e il valore reale delle coordinate temporali di un'entità; spesso per i dati di tipo geografico le coordinate temporali sono rappresentate dall'epoca alla quale l'entità era "valida", e in molti casi ciò vale contemporaneamente per tutta la base di dati.

RISOLUZIONE

Si riferisce alla quantità di dettaglio che è possibile distinguere nella componente spaziale, temporale o tematica; la risoluzione è sempre finita, perché non esiste un sistema di misura infinitamente preciso e perché comunque le basi di dati sono intenzionalmente generalizzate per ridurre il grado di dettaglio. In funzione dell'applicazione, non sempre un'elevata risoluzione è la

scelta migliore; a volte una bassa risoluzione è più opportuna, se si vogliono ottenere modelli generali.

Si possono definire:

Risoluzione spaziale: indica la più piccola differenza distinguibile fra due valori misurabili. Poiché la risoluzione spaziale è una informazione collegata al grado di dettaglio con cui i dati rappresentano la realtà, ci dice quale è il più piccolo oggetto distinguibile grazie ai dati a disposizione. Per i dati raster, la risoluzione è semplicemente definita dalla dimensione del pixel. Per i dati vettoriali, può essere definita come la minima dimensione dell'entità cartografica rappresentabile.

Risoluzione temporale: è la lunghezza (durata temporale) dell'intervallo di campionamento.

Risoluzione tematica: indica la precisione delle misure per un particolare tematismo. Per i dati quantitativi è analoga alla risoluzione spaziale; per dati qualitativi (categorie) rappresenta il dettaglio di definizione di una classe tematica.

SCALA NOMINALE

Nella cartografia digitale, con la possibilità di variare la scala nella rappresentazione, il concetto tradizionale di scala perde di significato. Il fattore di scala rimane come scala nominale, intendendo con esso il grado di precisione degli strumenti e della metodologia utilizzati nell'acquisizione del dato.

COERENZA LOGICA

Si definisce come l'assenza di incongruenze rilevabili indipendentemente da una verifica nella realtà e si riferisce al fatto che non ci siano dati in contraddizione fra di loro. Per valutare questo fatto si possono istituire:

- test di consistenza logica, per il controllo degli eventuali vincoli matematici o logici (relazioni matematiche o logiche fra i dati);
- test di controllo dei vincoli topologici, per individuare ad esempio bordi mancanti o poligoni non etichettati.

Anche la consistenza può essere definita in riferimento alle tre dimensioni (spaziale, temporale, tematica) dei dati geografici.

Un esempio di consistenza logica è quella della unione di poligoni adiacenti provenienti da differenti file senza che presentano sempre errori dovuti sia alla sovrapposizione sia ai vuoti, la verifica ed eventuale correzione di questi errori (errori topologici) si effettua con le funzioni di analisi topologica implementate nei GIS. Per esempio su ArcGis esiste un wizard che accompagna

alla ricerca degli errori sulla base di alcune principali regole (“rule”) di carattere topologico, come per esempio quella della figura 4 che stabilisce che i poligoni non devono avere sovrapposizioni (“overlap”) e permette la individuazione di tutte le aree dove quanto prescritto nella regola avviene per permettere le eventuali correzioni.

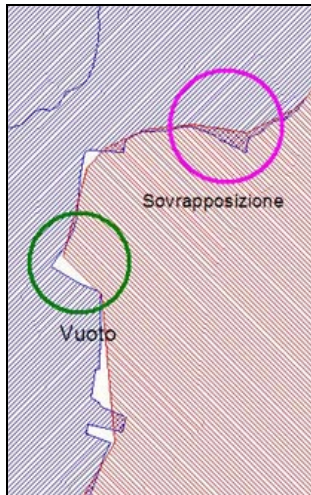


Fig. 3

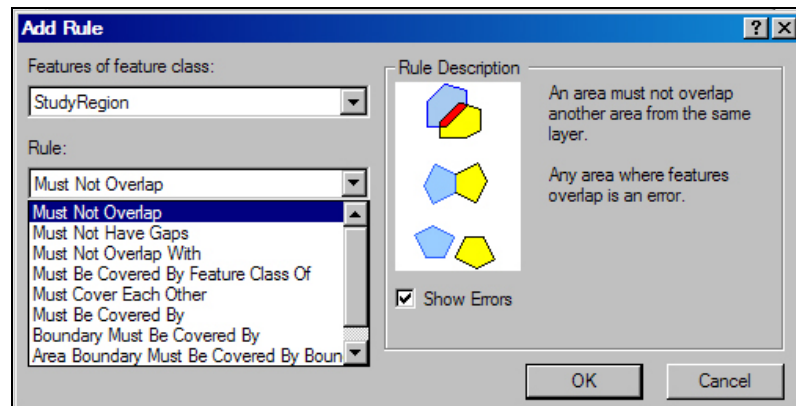


Fig. 4

CONGRUENZA GEOMETRICA

Essa è specificatamente inerente ai dati di formato vettoriale di tipo lineare ed attiene alla mancanza di “aggancio” tra i vertici o i nodi di una polilinea con se stessa o più comunemente con quella adiacente ai punti di partenza e di arrivo o al percorso. Un esempio classico è la mancata chiusura di poligoni per formare poligoni che si ha quando si lavora in ambito CAD senza la predisposizione della funzione di snapping o per un erraneo aggancio. Anche questo tipo di errori possono essere facilmente individuati e corretti dalle funzioni topologiche, nella fattispecie usando regole attinenti alle polilinee.

ESAUSTIVITA’ o completezza

Essa misura il grado di presenza degli oggetti e dei relativi attributi in una base dati geografica rispetto alla realtà. Essa misura l’eccesso o ridondanza di informazioni o al contrario la loro mancanza e non è esprimibile in senso assoluto ma esclusivamente in senso relativo a quello che il progetto del database prevede (specificata tecnica). La sua valutazione è basata su verifiche relative all’inclusione fra i dati di oggetti appartenenti a liste note oppure su verifiche relative all’inclusione fra i dati di oggetti di dimensioni (per esempio area o spessore) minime ed è esprimibile in termini percentuali riferita ai singoli aspetti della descrizione degli oggetti geografici. Un caso abbastanza comune di utilizzo di questo parametro è la verifica se sono stati acquisiti tutti gli oggetti per ognuna delle categorie previste dalla specifica. Per esempio nel caso della carta d’uso del suolo la

completezza verifica se sono state ed inserite tutte le categorie di classificazione per un dato livello gerarchico previste in fase di progettazione e presenti in una certa area. Un altro caso, di tipo quantitativo, può essere quello inerente alla verifica se è stata rispettata la densità minima di punti quotati rilevati prevista nella metodologia di costruzione del DEM a partire dai dati altimetrici acquisiti con il GPS. Un terzo caso abbastanza frequente è la verifica se un certo attributo, previsto per una certa tipologia di oggetti geografici, è stato assegnato a tutti gli oggetti acquisiti, come per esempio le sue dimensioni in termini di lunghezza od area o un suo specifico attributo caratteristico.

LIGNAGGIO

Con questo termine si indica un insieme di informazioni sulle fonti e sui trattamenti dei dati costituenti il database. In altre parole esso documenta la loro genealogia e storia, ed anche se non è un vero e proprio parametro di qualità, fornisce un parametro globale di valutazione del database.

In particolare le informazioni che compongono il lignaggio sono:

- a) fonte dei dati (da rilievo diretto, da processo fotogrammetrico, da digitalizzazione di cartografia preesistente, da derivazione da database a più grande risoluzione);
- b) processo di produzione;
- c) specifiche tecniche di acquisizione;
- d) epoca di produzione;
- e) scopo originale dei dati;
- f) produttore ed informazioni sul produttore;
- g) storia del trattamento ed aggiornamento dei dati.

Propagazione dell'errore

La propagazione dell'errore avviene quando un errore, verificato su un dato è conseguenza di un errore che era su un altro dato. Per esempio se un punto di controllo per la digitalizzazione di una mappa è stato mal rilevato in uno strato informativo che viene usato per "registrare" un altro strato, quest'ultimo avrà lo stesso errore proveniente dal primo. In questo modo un singolo errore può replicarsi da un'altra parte e diffondersi così fino a danneggiare i dati all'interno di un intero archivio GIS. L'effetto di errore a cascata è difficile da prevedere. Può essere di tipo additivo o moltiplicativo e dipende da come i vari elementi informativi vengono combinati fra loro, cosa che è possibile verificare solo caso per caso. Spesso la propagazione dell'errore avviene in maniera additiva quando strati informativi, di provenienza e accuratezza diversa, vengono sovrapposti.

Per fare un esempio pratico relativo al lavoro svolto, è assolutamente raccomandabile utilizzare uno strato informativo che serva da base per la georeferenziazione di tutti gli altri strati, a

prescindere dalla valutazione del suo giusto allineamento rispetto al sistema di coordinate prescelto, in modo da non propagare l'eventuale errore di base. Per tali ragioni esso va scelto fra quelli di scala adeguata e di sicura accuratezza geometrica, nel nostro caso sono state utilizzate le Carte Tecniche Regionali 1:10.000.

Valutazione di qualità

Nella fase di verifica i parametri di qualità sono calcolati statisticamente confrontando i valori presenti nel database con quelli veri. Viene assunto come dato vero, o comunque come dato di riferimento, quello di provata qualità.

Si possono in generale dare tre possibilità, corrispondenti ad altrettanti modelli di valutazione.

1. Modello “minimo”. Il controllo e la valutazione di qualità vengono svolti a cura del produttore dei dati, basandosi su strategie di test di conformità per identificare dati che soddisfano soglie di qualità definite a priori; è un approccio poco flessibile, il medesimo test in alcuni casi può rivelarsi troppo restrittivo e in altri troppo elastico.

2. Uso di metadati. In questo modello l'errore è visto come un accadimento inevitabile, e non vengono imposti standard minimi a priori; è l'utente finale ad essere il responsabile della valutazione della “idoneità dei dati all'uso”, mentre il produttore dei dati è responsabile della loro documentazione tramite i metadati; questo approccio è il più comune ed il più flessibile, ma non è solitamente previsto che l'utente finale fornisca un riscontro al produttore di dati, quindi l'informazione viaggia “a senso unico” e il produttore non è in grado di correggere gli errori.

3. Uso di standard e riscontro da parte dell'utente. Il flusso delle informazioni è “bidirezionale”, con un riscontro da parte dell'utente relativamente alle questioni della qualità dei dati; questo controllo retroattivo è processato e analizzato per identificare i problemi significativi e gli interventi prioritari da avviare sui dati per migliorarne la qualità.

I PROBLEMI CHE DERIVANO DALLA MANCANZA DI CONGRUENZA GEOMETRICA

Come si è detto tra gli aspetti che compongono la qualità dei dati geografici, quello dell'accuratezza geometrica è il più importante ed il più delicato da affrontare. Mentre in passato le analisi in ambito cartografico erano esclusivamente di tipo visivo e qualitativo, oggi con l'uso dei GIS è enormemente aumentata la necessità di un uso quantitativo delle informazioni geografiche disponibili. Le incoerenze sono inevitabili quando le basi sono riferite a scale differenti o, a parità di scala sono il risultato di acquisizioni realizzate in momenti diversi, con strumenti di diversa

tecnologia, diverse procedure ed operatori con esperienze differenti. Facendo per esempio il caso delle Carte Geologiche d'Italia a scala 1:100.000 utilizzando mosaici tra fogli diversi è molto comune il caso di differenze spesso sostanziali tra carte adiacenti non giustificabili con variazioni reali quanto piuttosto al fatto che operatori diversi hanno lavorato con un diverso modello logico, che si è tradotto in differenti interpretazioni.

Le analisi quantitative sui dati GIS vengono effettuate soprattutto con le operazioni di sovrapposizione (“overlay”) e quindi esse perdono di significato se i dati geografici non sono fra loro congruenti. Quello della scala è il parametro che maggiormente influisce nella generazione di incongruenze di tipo geometrico. Di fatto la scala, non esprime soltanto il rapporto tra una dimensione sulla carta e la stessa dimensione nel mondo reale; essa esprime anche un “errore” associato alla misura di rilevamento del dato. Se il dato deve essere analizzato unicamente in modo visivo, l'incoerenza tra due basi va rapportata alla scala del dato; infatti, l'analisi visiva può essere correttamente attuata solo a scale minori o uguali di quella nominale. In questo caso il problema è analogo a quello della cartografia disegnata dove l'imperfezione del dato si nasconde nello spessore del tratto. Così non accade nel trattamento numerico del dato, dove lo spessore di una linea è per definizione infinitesimo.

Questa situazione è nota anche col detto che la scala di un sistema numerico è una scala 1:1. Pertanto una certa distanza tra due linee che esprimono lo stesso oggetto è tollerabile nella cartografia disegnata se essa è inferiore allo spessore del tratto, ma non lo è mai in un sistema numerico. In un sistema numerico, se due linee esprimono lo stesso oggetto, devono assumere valori numerici identici, nei limiti dell'aritmetica “discreta” degli elaboratori.

VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA GEOMETRICA, UN CASO PRATICO

Nella predisposizione dei SIT relativi alle aree di studio ci si trovati di fronte alla decisione del tipo di scala di lavoro e di conseguenza della valutazione della qualità geometrica dei dati acquisiti dalle varie fonti, non sempre accompagnati dal metadata pur essendo nota la provenienza. In particolare, per fare un esempio, avendo a disposizione gli strati vettoriali in formato “shapefile” dei limiti amministrativi forniti dalla Regione Lazio e dovendo decidere se utilizzarli o realizzarne di nuovi ci si è posti il problema di verificarne l'accuratezza geometrica e a che scala.

REGIONE LAZIO SIRA	
CARTOGRAFIA	
CARTOGRAFIA DI BASE	
LIMITI AMMINISTRATIVI	
Contenuto	Limiti amministrativi Regionali, Provinciali e Comunali correlati con i relativi codici ISTAT.
Formato	Vettoriale
Sistema di coordinate	• UTM (fuso 33) • Gauss-Boaga (fuso Est)
Scala di rappresentazione	• 1:10.000 (su base C.T.R.) • 1:100.000
Accuratezza temporale	1999
Fonte	• Regione Lazio (1:10.000) • Istat (1:100.000)
Primitive geometriche	Poligoni
Numero di files	3
Occupazione di memoria	4.15 Mb (1:10.000) 0.98 Mb (1:100.000)
Note	• Dati validi come supporto per analisi statistiche e Territoriali. • I dati di fonte ISTAT dovranno essere richiesti direttamente all'Istituto di statistica.

Fig. 5

Riguardo quest'ultimo aspetto, come si vedrà più avanti, fra la cartografia richiesta per il Piano di Gestione o di Assetto delle aree in esame quella della vegetazione naturale o più in generale dell'uso e copertura del suolo era quella di maggior importanza e comunque propedeutica ad una serie di carte tematiche derivate e alla predisposizione delle linee di guida per la gestione delle risorse forestali. Questa carta è stata realizzata in buona parte grazie ad un lavoro di fotointerpretazione alla scala 1:3.000. Tuttavia la cartografia allegata è stata realizzata ad una scala più piccola che varia da 1:5.000 a 1:10.000 a secondo dei tematismi rappresentati.

L'informazione relativa ai limiti amministrativi comunali deve essere sempre presente in tutte le carte realizzate per rispondere alle esigenze del committente o alle normative inerenti ai documenti di pianificazione da realizzare e comunque è indispensabile nell'ambito delle indicazioni gestionali da predisporre. Gli shapefile della Regione Lazio relativi a questo strato informativo sono due, ma uno è facilmente riferibile ad una scala di rappresentazione troppo piccola, presumibilmente è stato realizzato tramite digitalizzazione su base foglio IGM 1:100.000 come facilmente verificabile sovrapponendolo appunto a questa base topografica e quindi inutilizzabile per il SITL. L'altro è molto più "rifinito" perché è stato realizzato a scala maggiore, presumibilmente su base CTR. Per valutare l'accuratezza di questo dato occorre quindi confrontarlo con un altro di sicura affidabilità sia per le metodologie sia per la qualificazione del gruppo di lavoro che l'ha realizzato. Questo tipo

di dato può senz'altro essere quello relativo alla topografia la cui acquisizione è comunque di fondamentale importanza per il SITL.

Le tavolette IGM sono state costruite a scala media (1:25.000) e quindi il loro impiego ai livelli di scala usati per le analisi GIS non è corretto, mentre possono senz'altro andar bene le sezioni della Carta Tecnica Regionale del Lazio (CTR) che contiene informazioni molto dettagliate sulla morfologia, idrografia, vegetazione e sul paesaggio antropico anche se il suo aggiornamento risale al 1990 (ma ci sono regioni con Carte Tecniche con aggiornamenti ancora più recenti ed a scala ancor più grande). Del resto a breve sarà sostituita dalla CTR 1.5000 man mano che questa sarà resa disponibile e, rispetto a questa nuova cartografia, verranno ridefinite le banche dati di riferimento (griglie dei quadri di unione, unità amministrative, reti di trasporto, elevazione, nomi geografici, numeri civici, idrografia) rispetto alle quali si raccordano tutti gli altri elementi del sistema informativo territoriale della Regione Lazio.

Se, quindi, si rappresenta il risultato della sovrapposizione dello shape ad una scala minore o uguale alla scala della base con maggiore risoluzione, nel nostro caso alla scala 1:10.000, esso appare corretto ad un'analisi visiva (fig. 6, riferita ad un'area interna al SIC-ZPS "Mezzano-Latera"), portando alla errata conclusione che i dati sono di fatto coerenti e nessun problema sorge dalla loro sovrapposizione. Tuttavia, se si ingrandisce la scala (fig. 7) si notano degli scostamenti. Se, infine si proietta la cartografia catastale relativa ai due comuni interessati, si notano aberrazioni significative con scostamenti dell'ordine anche di qualche decina di metri (fig. 8), che non hanno niente a che fare con la diversa scala di riferimento.

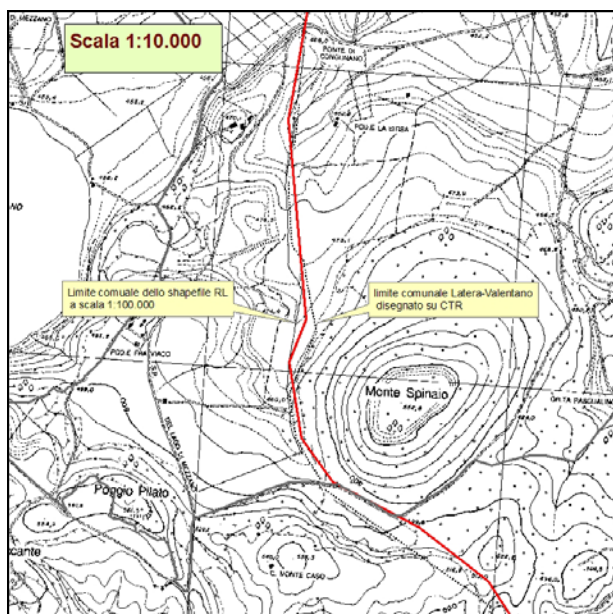


Fig. 6

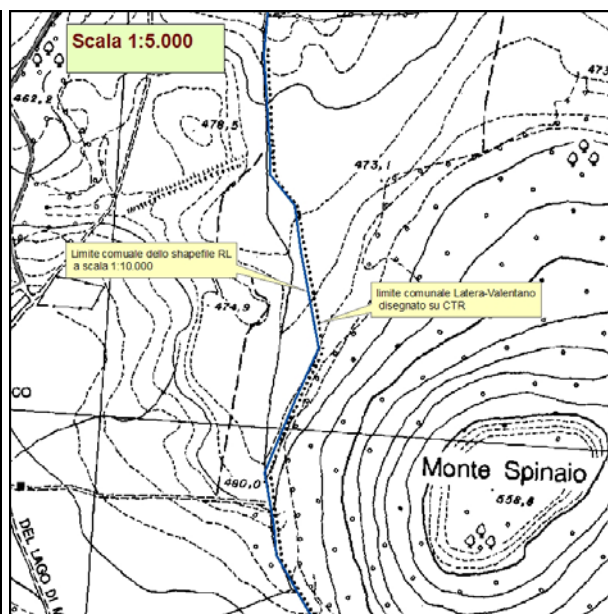


Fig. 7

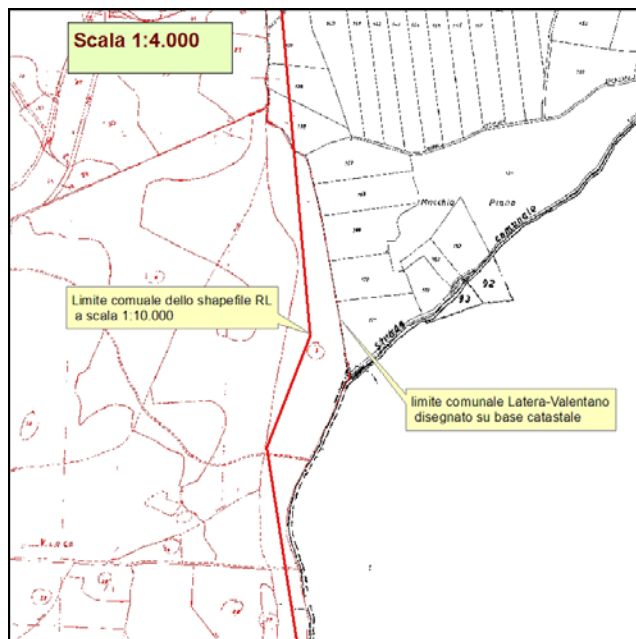


Fig. 8

A complicare le cose sta il fatto che il confine dell'area protetta segue il limite amministrativo nel breve tratto di confine regionale con la Toscana. Questo fatto pone una serie di questioni delicate riguardanti le scelte da fare.

Il criterio generale da adottare è quello di utilizzare come riferimento dei dati di partenza relativamente affidabili sulla cui base costruire tutti i dati derivati utili al SITL e quindi nel nostro caso la CTR al 10.000 in attesa della realizzazione di quelle al 5.000. Così facendo si può adottare il layer dei limiti comunali fornito dalla Regione Lazio e come tale, in qualche modo "ufficializzato", oppure, meglio ancora, ricostruire il confine direttamente sulla CTR, eliminando gli errori di digitalizzazione effettuati da chi ha realizzato lo shapefile regionale. Si è così creato un nuovo shapefile poligonale e si è digitalizzato il confine seguendo il tematismo della sezione CTR lavorando alla scala 1:5.000. Ovviamente occorre corredare il nuovo strato con il metadato contenente le informazioni relative alla sua origine e alla metodologia di realizzazione.

Si ricorda comunque che uno degli scopi della realizzazione del SITL è quello di poterlo utilizzare in futuro per semplificare il lavoro di gestione e revisione del piano e quindi, una volta superate queste prime difficoltà dovute alla scelta delle metodologie ed alla verifica della qualità dei dati ed in attesa di dati più recenti e attendibili, il lavoro di aggiornamento ed inserimento di nuovi dati non presenta particolari difficoltà.

La ragione principale della costruzione di un SITL è, infatti, la realizzarne di nuovi dati geografici relativi alla specificità dell'area che esso comprende, come per esempio l'uso e copertura del suolo o tutta una serie di dati provenienti dall'attività quotidiana di controllo e gestione ordinaria che via via si accumulano: segnalazioni relative ai punti di ritrovamento di animali

selvatici vivi o uccisi per varia causa, fenomeni di inquinamento, apertura di discariche o di cave non autorizzate, tagli del bosco, incendi, ecc.. L'archiviazione di questi dati in un database ben organizzato e facilmente accessibile è il compito principale da realizzare in modo che tutti gli aggiornamenti e le implementazioni possano essere facilmente eseguibili.

I DATI DESCRITTIVI DEI DATI (METADATA)

Vista l'importanza di conoscere l'attendibilità dei dati disponibili, l'attuale tendenza è quella di corredare i database geografici del loro "metadata". Il metadata non è altro che un set di informazioni sui dati esistenti (ente responsabile, luogo, condizioni d'accesso ecc.) e sulle loro caratteristiche (qualità, estensione, contenuti ecc.). C'è da dire che procurare un metadata ad un database già esistente è un'impresa ardua dal punto di vista pratico, e molto dispendiosa. Il metadata invece deve essere un elemento di progetto del database geografico e deve servire a chi acquisisce i dati, a chi li collauda o li certifica e soprattutto a chi li utilizza.

Il metadata relativo ad uno strato deve almeno comprendere, oltre ovviamente il contenuto, la fonte (cioè il nome di chi o dell'Ente o Istituto che l'ha realizzato), il formato (raster o vettoriale o altro), il sistema di coordinate, la scala di rappresentazione, la data in cui è stato fatto o aggiornato (accuratezza temporale), le primitive geometriche che lo costituiscono (punti, linee, poligoni, pixel, ecc.), il numero di files e l'occupazione di memoria (possibilmente con il tipo di compressione utilizzata).

Sono inoltre utili ulteriori informazioni aggiuntive relative per esempio alla metodologia utilizzata per la realizzazione (GIS, esportazione delle immagini, rettificazione e georeferenziazione...), ad eventuali problemi riscontrati, o ad altri riferimenti di tipo scientifico, normativo o tecnico.

Per fare un esempio si riporta la scheda relativa al metadata dello strato Uso del suolo CLC facente parte del data base del SIRA. (Sistema Informativo Regionale Ambiente del Lazio, <http://www.regione.lazio.it/sister/home.htm>).

REGIONE LAZIO, SIRA, CARTOGRAFIA	
TEMATISMO: LAND COVER - progetto CORINE	
Contenuto	CORINE - Copertura del suolo regionale classificata secondo una legenda di 34 classi suddivisa in 3 livelli gerarchici definiti da una nomenclatura unitaria per tutti i paesi della comunità europea. L'unità minima cartografata è di 25 ha.
Formato	Vettoriale
Sistema di coordinate	UTM (fuso 33)
Scala di rappresentazione	1:100.000
Accuratezza temporale	1994
Fonte	Centro Interregionale (Progetto Comunitario CORINE)
Primitive geometriche	Poligoni
N° files	1
Occupazione di memoria	11.4 Mb
Note	

Come si può notare, le informazioni fornite sono essenziali e per averne di altre e più approfondite occorrerebbe rintracciare la pubblicazione o la monografia allegate al lavoro di creazione del dato o quantomeno avere informazioni dirette dagli autori, operazioni, come accennato, dispendiose e comunque spesso del tutto irrealizzabili. Per queste ragioni per la costruzione dei SITL relativi alle aree protette oggetto d'analisi ci si è limitati alla conoscenza dell'origine dei dati acquisiti e della loro accuratezza temporale, valutandone autonomamente l'accuratezza geometrica sulla base di uno strato topografico preso come riferimento che nel caso in esame si è scelto essere la CTR 1:10.000, quella tematica e le incongruenze dovute ad errori di tipo topologico. Invece, per tutti i dati modificati o creati ex novo, ad esclusione di quelli utilizzati nei processi di analisi e quindi parziali, si è stabilito di utilizzare la scheda interattiva del metadato

fornita dal GIS ArcGis implementato nell'interfaccia ArcCatalog, limitandosi a riempire i campi richiesti come necessari secondo lo standard ISO 19115 così come definito nel documento "Geographic Information – Metadata".

Infatti, pur non essendo ancorato ad un protocollo contrattuale o di tipo amministrativo-normativo e quindi non essendo sottoposto ad una metodologia di analisi restrittiva ed imposta, un SITL deve comunque attenersi ad un minimo di regole che riguardano la standardizzazione dei metadati. Gli standard dei metadati servono, infatti, per identificare e unificare le definizioni dei metadati che gli utenti dovranno utilizzare per potere condividere e riutilizzare dati geografici, aiutando a promuovere l'interoperabilità.

Per descrivere il modello dei dati (struttura dei dati) in modo esatto e completo occorre un formalismo (linguaggio) internazionalmente accettato e indipendente dal software GIS utilizzato, che possa essere letto e interpretato da chiunque, anche a distanza di tempo.

In questo contesto l'ISO (International Organization for Standardization) ha definito uno Standard per i metadati (ISO 19115) con lo scopo di armonizzarne il contenuto a livello internazionale nel quale sono specificate le informazioni più diverse che potrebbero essere importanti per gli utenti. Lo standard ISO per i metadati riflette gli standard di FGDC (implementato in ArcGis), CEN e ANZLIC. UNI EN ISO 19115 è la versione italiana delle norme europee EN che recepiscono, senza varianti, il testo delle omonime norme internazionali ISO.

3. UTILIZZO DELLE ORTOFOTO PER LA FOTOINTERPRETAZIONE

3.1 Cenni sulle potenzialità del telerilevamento ai fini forestali. Cenni sull'impiego delle foto aeree per fotointerpretazione.

Prima di passare a illustrare i metodi utilizzati per le analisi territoriali finalizzate alla predisposizione dei Piani di Gestione e di Assetto delle aree protette oggetto di analisi, per inquadrare meglio gli aspetti generali che hanno motivato le scelte effettuate si passano brevemente in rassegna alcuni concetti chiave alla base del lavoro di fotointerpretazione.

Fino a qualche anno fa i sistemi tradizionali di rilievo a terra (aree di saggio, transetti, ecc.) erano i soli strumenti per caratterizzare le formazioni arboree. La cartografia di base serviva da supporto per la rappresentazione planimetrica delle informazioni ricavate dai rilievi, attraverso l'estensione (spazializzazione) soggettiva e spesso arbitraria delle informazioni puntuali ricavate dai rilievi.

Con il recente progresso tecnico dei software di analisi geografica (GIS) e con la disposizione di una serie ormai continua e costante di immagini aeree e satellitari a intervalli di tempo che variano da un anno a un paio di settimane fino a qualche ora e con risoluzioni anche molto elevate, i sistemi tradizionali di caratterizzazione ed analisi del paesaggio naturale sono stati via via integrati ed in parte sostituiti tanto che l'utilizzo delle immagini da telerilevamento è un'operazione irrinunciabile per chiunque voglia operare nel settore forestale.

Rispetto alle tecniche tradizionali di analisi della vegetazione arborea, i dati ottenuti mediante le tecniche di telerilevamento presentano grandi *vantaggi*. Infatti, un'immagine della superficie terrestre, ripresa dallo spazio, presenta aspetti originali, sia dal punto di vista della ripresa sia dei suoi contenuti:

- il carattere sinottico delle informazioni, cioè la loro capacità di rappresentare in forma sintetica elementi del paesaggio di origine e natura diversa, permette di analizzare visivamente e interpretare i segni di vaste porzioni del territorio, se poi l'immagine è stata sottoposta ad un processo di correzione geometrica su di essa si possono effettuare analisi metriche proprio come con una carta topografica;

- la rapidità di accesso all'informazione dovuta alla alta risoluzione temporale delle immagini di alcuni satelliti permette in certe condizioni di effettuare analisi territoriali quasi in tempo reale;

- l'associazione di dati multipli, provenienti da varie regioni o bande dello spettro elettromagnetico e la possibilità di acquisire immagini di uno stesso territorio in tempi diversi sono i concetti base per la visione multispettrale e multitemporale, caratteristiche queste che portano ad una capacità singolare nel riconoscere gli oggetti o le superfici di una scena ripresa e alla possibilità di studiarne le modifiche e i cambiamenti in tempi successivi;

- la grande varietà di potenziali applicazioni che un'immagine incontra è senza dubbio la caratteristica più importante rispetto ai contenuti: ciò stimola la curiosità speculativa della vasta comunità scientifica ed amplifica i mezzi e le tecniche a disposizione per la gestione del territorio da parte dei decisori politici o di chiunque si dedichi allo studio dell'ambiente e del territorio, si pensi per esempio al monitoraggio delle dinamiche evolutive o involutive dei sistemi boschivi o al controllo dell'abusivismo.

Dal punto di vista degli *svantaggi*, invece, il telerilevamento soffre di particolari limitazioni fra cui le più importanti:

- la superficialità del tipo di informazione. I dati telerilevati competono solo le parti più superficiali della vegetazione e dei suoli essi non offrono alcuna indicazione diretta di tipo profondo per esempio riguardo al sottobosco, al tipo di suolo forestale sotto copertura, alla rinnovazione, alla presenza di massa morta. Solo in via indiretta e con molta cautela, tali caratteri possono essere correlati alla radiazione emessa dalla parte più esterna delle chiome (canopy);

- la sua dipendenza dal contesto spazio-temporale. Quale rappresentazione della realtà, una scena telerilevata dipende dalla situazione fisico-ambientale di ripresa e dalla morfologia del territorio ripreso per cui, ad esempio, una tipologia di bosco a latifoglie appare in modo diverso a secondo della stagione e dell'ora di ripresa (altezza e azimuth del sole) e a seconda della situazione morfologica di occupazione su pendii diversi o zone diversamente illuminate. In questo caso, la stessa categoria fitogeografica offre informazioni diverse non per un contenuto diverso bensì per una situazione diversa;

- la difficoltà nel correggere e migliorare geometricamente le immagini grezze ad alta risoluzione, soprattutto quelle riprese dai satelliti. Alcune immagini satellitari, comportano una laboriosa e non sempre efficace fase di correzione geometrica mentre ci sono foto aeree prese a bassa quota su aree con topografia accidentata che contengono distorsioni difficilmente azzerabili soprattutto ai lati esterni dell'immagine.

Uno dei campi applicativi del telerilevamento più utilizzati ai fini della gestione e salvaguardia del patrimonio forestale e più in generale dell'assetto territoriale è quello della elaborazione degli strati informativi dell'uso e copertura del suolo attraverso un processo definito di classificazione.

La classificazione di un'immagine telerilevata è il processo con il quale è prodotta una cartografia tematica. La procedura operativa più comunemente impiegata, soprattutto in campo forestale, è la fotointerpretazione manuale.

Per procedere alla classificazione a partire dai dati telerilevati occorre scegliere il tipo di dati su cui lavorare. Questi sono raggruppabili in due grosse categorie: prodotti di ripresa con sistemi ottici quali filmati, diapositive e pellicole fotografiche; immagini-raster provenienti da scanner aviotrasportati o collocati su satelliti.

La scelta va fatta a seconda degli scopi applicativi (vastità dell'area da indagare, scala di dettaglio da ottenere, ecc.) e delle disponibilità finanziarie. Fino a qualche anno fa la qualità e il costo delle immagini satellitari obbligavano la scelta verso l'utilizzo di materiale fotografico, anche grazie alla facilità di trattamento dei dati delle immagini, una volta trasformate le pellicole in formato digitale, con un semplice computer e con programmi ampiamente diffusi di miglioramento della qualità delle immagini.

Oggi però le nuove generazioni di satelliti o le ultime acquisizioni da parte di scanner aerotrasportati permettono di acquisire immagini multispettrali e pancromatiche con elevate risoluzioni a prezzi concorrenziali tanto che per talune applicazioni ed in particolare quelle in cui si vuole approfondire il dettaglio di analisi pur su vaste superfici è preferibile utilizzare questi dati.

Ovviamente se si tratta svolgere studi multitemporali e se bisogna analizzare un fenomeno a grande scala lontano nel tempo più di dieci anni (ad esempio un taglio boschivo), bisogna tener presente che le foto aeree sono l'unico dato utilizzabile.

3.2 Cenni sull'utilizzo di foto aeree per applicazioni nel settore forestale.

L'impiego delle foto aeree derivate da riprese con strumenti ottici aviotrasportati per la classificazione della vegetazione forestale è una pratica ormai consolidata, che risale all'inizio del secolo scorso. In generale dalla fotografia aerea è possibile ricavare numerosi dati utili per analisi tipologiche della vegetazione forestale, ovviamente con risultati diversi a seconda della qualità del materiale fotografico e delle tecniche di interpretazione adottate.

Riguardo alla qualità del materiale fotografico, si ricorda che le foto aeree si differenziano principalmente in base alla scala e al tipo di pellicola utilizzata. La scala media di un fotogramma è data dal rapporto tra la distanza focale della camera da presa e la distanza tra la camera da presa e l'oggetto da fotografare (quota relativa di volo). Si parla di scala media, perché la natura prospettica dell'immagine (si tratta comunque di una prospettiva centrale) causa sempre delle distorsioni all'allontanarsi dal centro del fotogramma, ma soprattutto perché il territorio fotografato, generalmente, presenta dei rilievi, per cui in ciascun punto dell'immagine varia la quota relativa di volo, e quindi il rapporto di scala.

Il contenuto informativo di una foto può essere superiore a quello che ci si potrebbe attendere dalla sua scala nominale e dipende dal potere risolutivo della pellicola utilizzata, che per quelle più

recenti è molto elevato. Con i sistemi ottici in teoria si possono ingrandire le immagini fino al punto in cui sono visibili i singoli pixel. Trasformando la pellicola in immagine digitale, cercando di eseguire una scansione che preservi la qualità della foto in termini di risoluzione (pixel/pollice o pixel/cm) e tonalità, si può ingrandire l'immagine ottenuta quanto si vuole, ma ai fini pratici per non "sgranare" l'immagine è consigliabile non superare il potere risolutivo del monitor, anche se quest'ultimo è spesso molto superiore alla percezione discriminante dei singoli pixel che ha l'occhio umano.

Generalmente si definisce *piccola* la scala ottenuta dai voli di alta quota, pari a circa 1:75.000, *media* quella intorno ad 1:30.000, e *grande* a partire da 1:15.000-1:10.000; nel caso di studi locali, si tende a realizzare anche foto in scala molto maggiore, fino ad 1:1.000. All'aumentare della scala aumenta il dettaglio delle riprese e quindi il contenuto informativo, ma questo può essere influenzato fortemente anche dal tipo di pellicola utilizzata.

Rispetto al tipo di pellicola è possibile distinguere quattro tipi principali:

- film pancromatico bianco e nero;
- film infrarosso bianco e nero;
- film a colori;
- film infrarosso falso colore.

Il film pancromatico bianco e nero (da 0,35 a 0,68 μm) ha una sensibilità spettrale all'incirca pari a quella dell'occhio umano, ma presenta una bassa sensibilità nel verde, che lo rende poco adatto alla discriminazione di specie vegetali. Limitata è anche la sua efficacia nei casi di mescolanza di conifere e latifoglie, dove risulta più idoneo l'infrarosso.

Il film infrarosso bianco e nero (da 0,45 a 0,9 μm) presenta il vantaggio rispetto al precedente di cogliere le risposte spettrali oltre i 0,7 μm , che si diversificano molto in relazione ai vegetali, in particolare fra le due macrocategorie delle latifoglie e delle conifere. Come inconveniente, il suo potere risolutivo è inferiore a quello del film pancromatico. Questo film è progressivamente sostituito da quello infrarosso falso colore.

Il film a colori registra l'immagine in colori reali, con tre differenti emulsioni fotochimiche, sensibili rispettivamente alla lunghezza d'onda fra 0,4 e 0,5 μm (luce monocromatica blu), a quella fra 0,5 e 0,6 (luce monocromatica verde) ed a quella fra 0,6 e 0,7 (luce monocromatica rossa). Il maggiore vantaggio di questo tipo di pellicola è che sfrutta meglio del pancromatico le capacità dell'occhio umano, in grado di interpretare molti più colori rispetto alle scale di grigio. Le riprese a colori possono essere molto utili nella discriminazione dei tipi di vegetazione quando vengono effettuate a scala grande, anche se nell'interpretazione, come si vedrà in seguito, assumono molta importanza altri caratteri della foto, comuni a tutti i tipi di pellicola, quali il tono e la tessitura.

Il film infrarosso falso colore consente una rappresentazione dell'infrarosso riflesso. Si tratta di un falso colore perché l'attribuzione dei colori è diversa da quella corrispondente nella realtà. In questo caso è assegnata al rosso l'informazione dell'infrarosso riflesso, al verde quella del rosso e al blu quella del verde. Questo tipo di pellicola presenta il vantaggio di una migliore risoluzione spettrale e di un maggiore potere risolutivo rispetto all'infrarosso bianco e nero e risulta di grande efficacia nello studio della vegetazione.

L'utilizzo delle foto aeree nel settore agricolo-forestale nasce principalmente dall'esigenza di classificare l'uso del suolo. Nello specifico, nel settore forestale le prime applicazioni erano rivolte alla delimitazione delle patches a bosco rispetto alla matrice agraria ed urbana. In seguito all'aumento di definizione delle immagini, la possibilità di lavorare in vari formati di scala, risoluzione e di spettro di luce ha fatto sì che l'uso delle foto aeree sia entrato a pieno titolo in una vasta serie di applicazioni anche di tipo inventariale.

Lo sviluppo tecnologico di strumenti di analisi digitale dei fotogrammi ha aumentato fortemente le potenzialità operative anche nel campo della produzione di carte tematiche con tecniche fotogrammetriche, anche se con gli attuali metodi di correzione geometrica dei fotogrammi, il cui risultato è la realizzazione di un'immagine con proprietà metriche, la fotogrammetria, intesa come processo di ricostruzione metrica del terreno fotografato con modello stereoscopico, sta progressivamente scomparendo.

Attualmente l'impiego più comune delle foto aeree in campo forestale riguarda la produzione di carte tematiche per lo studio e la gestione del territorio. Un caso applicativo particolare è lo studio delle dinamiche evolutive del territorio che è reso possibile dal confronto di fotogrammi rappresentanti una stessa porzione di territorio acquisiti in epoche differenti.

Diverse esperienze sono state condotte per l'identificazione di attributi alle cenosi boschive tentando anche con un certo successo e con materiale fotografico idoneo e adeguatamente preparato di giungere fino alla caratterizzazione a livello di singolo albero. Ad esempio, l'uso di immagini aeree integrate con l'applicazione di particolari algoritmi può in certe condizioni permettere l'identificazione dei contorni delle chiome di un albero o di un agglomerato di alberi, laddove il bosco era più fitto, e la stima della copertura come si può vedere nella figura 9.

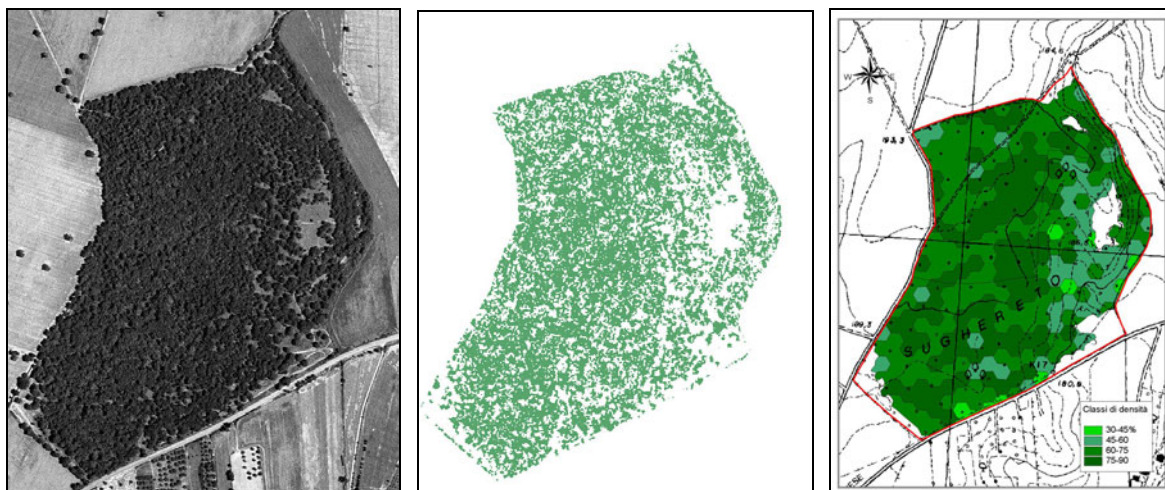


Fig. 9: carta delle classi di copertura a partire da un'ortofoto b/n relativa al SIC "Sughereta di Toscana" sito all'interno della RN di Toscana. Al centro la carta della proiezione delle chiome ottenuta con opportune tecniche di eliminazione delle ombre delle chiome stesse sul suolo.

In particolari condizioni di struttura, densità arborea e risoluzione è possibile anche tentare di individuare e contare le piante dominanti e co-dominanti del popolamento. Le dimensioni della chioma, rilevate mediante fotointerpretazione possono essere utilizzate per stimare il diametro a petto d'uomo, ma questo tipo di correlazioni deve essere adeguatamente testato e comunque condotto su particolari cenosi con caratteri stazionali omogenei.

Le proprietà spettrali delle foto, se la risoluzione dell'immagine è particolarmente elevata, consentono la stima delle coperture delle diverse specie forestali e, una volta identificato a quale specie appartengano i gruppi di pixel con colore differenziato, anche l'individuazione delle singole specie. Tuttavia per analisi così spinte è meglio ricorrere ad immagini multispettrali con ricerca automatica e semiautomatica delle firme spettrali delle varie specie.

Recentemente sta avendo ampia diffusione il telerilevamento da piattaforme aeree di tipo ultraleggero. Esse possono trasportare camere fotogrammetriche tradizionali o altri tipi di strumenti sia ottici sia digitali o anche sensori multi e iperspettrali. L'utilizzo di questi ultimi, data l'altissima risoluzione geometrica e radiometrica, è un settore in ampia espansione, almeno a livello sperimentale, nel campo forestale.

Come si è accennato, nella realizzazione di uno studio sulla tipizzazione della vegetazione forestale il supporto del telerilevamento aereo può intervenire sia al momento della distinzione fra bosco e non bosco, sia per una vera e propria stratificazione delle aree boscate, consentendo l'individuazione di dettaglio delle categorie forestali. In relazione agli obiettivi perseguiti cambiano le caratteristiche tecniche richieste per le riprese aeree.

Le operazioni di fotointerpretazione richiedono una grande esperienza da parte del fotointerprete che deve essere in grado di riconoscere il territorio a partire da fotogrammi, che sono delle immagini del terreno distorte sui margini e la cui scala non risulta costante, ma varia con la quota del volo che subisce sempre qualche oscillazione.

Le foto aeree di norma fanno parte di programmi di volo di tipo fotogrammetrico. Questo volo consiste nella realizzazione di “strisciate” di fotogrammi, in cui l’aereo avanza scattando fotogrammi che si sovrappongono per il 60% e, terminato il territorio oggetto di rilievo, torna indietro e realizza una nuova strisciata, con sovrapposizione laterale del 20%. Con tale ricoprimento è garantita la stereoscopia.

La stereoscopia consente di percepire la visione tridimensionale dell’oggetto, che si può ottenere attraverso la visione binoculare. Gli occhi, osservando contemporaneamente da due punti di vista diversi lo stesso oggetto (convergenza), forniscono al cervello l’impulso per la fusione delle due immagini e la restituzione della visione tridimensionale. Nelle fotografie fatte per la fotogrammetria la presa di una stessa scena da due punti di vista diversi, o centri di proiezione, consente, sotto certe condizioni, di ottenere una visione stereoscopica, tridimensionale, dell’oggetto osservato.

La stereoscopia può essere ottenuta a partire da differenti strumenti e tecniche (stereoscopia, tecnica anaglifca, tecnica della polarizzazione, otturatori a cristalli liquidi).

L’interpretazione è comunemente fatta mediante una visione tridimensionale del territorio, ottenuta disponendo in modo opportuno due fotogrammi della stessa porzione di territorio scattati da due punti di presa diversi e osservando simultaneamente le due immagini mediante uno stereoscopia. Lo stereoscopia è uno strumento ottico costituito da un binoculare, dotato di uno o più ingrandimenti, in genere associato ad un sistema di specchi che consentono la fusione in un’unica visione di due porzioni di immagini distanziate fra loro al fine di percepirne la loro prospettiva tridimensionale.

Per utilizzare al meglio lo stereoscopia ed acquisire la capacità di interpretare il territorio nella visione stereoscopica è necessario seguire un periodo di formazione e soprattutto è utile fare esperienza su territori conosciuti, in modo da imparare a riconoscere le forme del paesaggio in una prospettiva dall’alto. E’ comunque necessario un periodo di almeno 5-10 minuti iniziali per poter adattare la vista alla visione tridimensionale ed un periodo anche più lungo per raggiungere una visione ottimale.

Se gli scopi finali dell’analisi dei fotogrammi sono la restituzione cartografica coerente con un sistema di riferimento geografico in modo da utilizzare lo strato informativo per implementare un Sistema informativo occorre correggere geometricamente i fotogrammi. Due sono vie per ottenere questo scopo: la trasformazione dell’immagine in formato digitale e la successiva operazione di

ortorettificazione o quella più rigorosa della restituzione fotogrammetrica. Questa operazione necessita preliminarmente della ricostruzione della geometria della presa, ovvero dell'orientamento corretto dei fotogrammi per risolvere problemi di parallasse.

In ogni caso l'analisi visiva in stereoscopia dei fotogrammi contigui è un'utile tecnica coadiuvante il lavoro di classificazione manuale a video o di controllo e/o correzione dei prodotti di classificazione automatica e semiautomatica della vegetazione.

3.3 L'impiego delle ortofoto per fotointerpretazione.

L'ortofoto digitale rappresenta il prodotto di più facile impiego tra quelli disponibili per la rappresentazione del territorio e si distingue per le seguenti caratteristiche:

- immediatezza, attualità e ricchezza del contenuto informativo;
- precisione geometrica paragonabile a quella delle cartografie di pari scala;
- flessibilità di gestione, attraverso software di visualizzazione ampiamente diffusi e miglioramento delle caratteristiche visive dell'immagine;
- economicità, a confronto con le immagini satellitari ad alta risoluzione per studi su territori di piccole e medie dimensioni;
- efficacia, giacché fornisce informazioni superiori a quelle ricavabili da una cartografia di pari scala.

L'ortofoto digitale costituisce pertanto uno strumento di grande utilità e praticità per lo studio, la progettazione, la salvaguardia ambientale, la costruzione e l'aggiornamento di un Sistema Informativo Territoriale.

Sono stati prodotti e sono largamente diffusi e disponibili in Italia due importanti insiemi di ortofoto digitali che coprono l'intero territorio nazionale:

Ortofoto AIMA. Si tratta di fotogrammi a scala circa 1:33.000 fissati su pellicole ad emulsione pancromatica a toni di grigio. I fotogrammi sono stati acquisiti nel 1994 con scanner ad alta risoluzione. La costruzione dell'ortofoto digitale ha comportato oltre 85.000 km di strisciate e la realizzazione di oltre 35.000 fotogrammi. La compagnia Generale Riprese Aeree di Parma ha realizzato sia i voli che la realizzazione delle ortofoto. I fotogrammi aerei, una volta sviluppati, sono stati controllati e autorizzati con estrema rapidità da parte dello Stato Maggiore dell'Aeronautica che per legge, ha questo compito a tutela della sicurezza nazionale. Sono stati poi riprodotti in diapositiva con particolari pellicole a grana finissima e trasformati in immagine digitale ("rasterizzati") con uno scanner piano di particolari caratteristiche, progettato e realizzato dalla Carl Zeiss per lo specifico uso fotogrammetrico.

La realizzazione dell'ortofoto è stata eseguita apportando una prima correzione angolare e poi ripristinando le condizioni di verticalità. Le variazioni altimetriche del terreno abbracciato dal fotogramma che determinano variazioni alla scala dell'immagine, sono state corrette ortorettificando la aerofotografia su un Modello Digitale di Elevazione (DEM o DTM) con una densità sufficiente ad assicurarne l'accuratezza planimetrica richiesta.

Le caratteristiche finali del prodotto sono una risoluzione radiometrica di 8 bit con 256 toni di grigio, una definizione di 1 pixel = 1x1 metri sul terreno, un errore quadratico medio inferiore a 2,5 metri, scarti sui singoli punti non superiori a 4 metri e, sulle distanze non superiori a 6 metri. L'accuratezza geometrica dell'immagine ortorettificata è perciò assimilabile a quella della cartografia 1:10.000 mentre la definizione ne consente l'uso efficace a scale molto più grandi.

Pur essendo un prodotto digitale e quindi gestibile teoricamente come un continuum senza limiti diversi da quelli delle memorie disponibili, l'ortofoto digitale è stata suddivisa in sezioni 1:10.000 corrispondenti alla sedicesima parte di un foglio 1:50.000 della carte Ufficiale dello Stato prodotta dall'IGM e quindi esattamente sovrapponibili alla cartografia 1:10.000 prodotta dalle regioni (carte tecniche regionali (CTR)). Le ortofoto possono essere richieste alle Regioni, anche se la loro diffusione è ormai capillare a tutti i livelli amministrativi e presso ogni centro di ricerca o altre istituzioni pubbliche.

Ortofoto IT2000. Fotogrammi derivanti da un'iniziativa privata della CGR di Parma, che ha realizzato nel corso del 1999 un volo destinato alla produzione di ortofoto a colori. Le ortofoto hanno analoghe caratteristiche geometriche e risolutive (sistema di proiezione, risoluzione, taglio, ecc.) a quelle AIMA 1994. La copertura IT2000 è stata acquisita da molte Regioni come fonte informativa per la realizzazione delle nuove CTR 1:5.000. È, tra l'altro, disponibile anche il DEM, con passo di 40 m, utilizzato per l'ortocorrezione delle foto.

In questi ultimi anni le tecnologie di remote sensing satellitare stanno facendo grandi progressi sia nel campo della maggior qualità delle immagini in termini di risoluzione geometrica, temporale e radiometrica sia in quello della diffusione di numerosi rivenditori di tali immagini a prezzi che cominciano ad essere concorrenziali con le immagini aeree per acquisizioni ricoprenti vaste superfici.

Le foto aeree continuano comunque ad essere molto utilizzate per studi di tipo settoriale e su territori di piccola e media dimensione. In particolare è molto utilizzata la tecnica di vettorializzazione delle ortofoto digitali in bianco e nero del volo AIMA del 1994 ormai diffuse in maniera capillare sia in campo tecnico che scientifico.

Recentemente cominciano ad essere disponibili in molti enti e istituzioni anche le ortofoto a colori del 2005 a scala nominale 1:10.000 del programma di volo " Terraitaly IT2000TM Nuova

Release” realizzato sempre dalla CGR S.P.A. di Parma. Esse stanno sostituendo ormai quelle precedenti (volo 1999) nelle analisi sull’uso reale del suolo, mentre le ortofoto AIMA sono, ormai, vecchie di 12 anni e stanno quindi rientrando nella categoria delle immagini storiche utilizzabili per studi multitemporali sulle dinamiche evolutive del paesaggio.

Come si è detto, queste ortofoto pur avendo una scala nominale di 1:10.000, sono ancora molto adatte all’interpretazione fino ad una visualizzazione in scala 1:2.500 (anche se la possibilità di interpretazione a scale così elevate può variare con la qualità delle singole ortofoto). Si tratta di riprese fatte nei mesi compresi fra maggio e settembre, e quindi concentrate nel periodo di attività vegetativa delle formazioni forestali, in modo da facilitarne il riconoscimento.

Grazie alle loro proprietà metriche e al fatto che sono facilmente proiettabili rispetto ai sistemi geografici di riferimento le ortofoto possono essere visualizzate a video a scala variabile e sovrapposte ad altre informazioni geografiche prime fra tutte le carte topografiche a scala simile (come le Carte Tecniche) o ad altri strati informativi, quali per esempio l’idrografia, o altre carte tematiche o foto aeree effettuate in passato sulla stessa area. Per far ciò è necessario che tutte le informazioni geografiche siano geometricamente corrette in modo da essere attribuibili con semplici trasformazioni di georeferenziazione ad un sistema di riferimento comune.

I vantaggi principali delle ortofoto digitali consistono:

- nella buona precisione geometrica;
- nella possibilità di modificare la qualità dell’immagine mediante manipolazione del contrasto e della luminosità;
- nella possibilità di osservare il territorio in continuo, grazie alla mosaicatura di più sezioni, ottenendo un’unica ortofoto;
- nella possibilità di applicare funzioni di miglioramento dell’immagine, quali i filtri, che consentono di esaltarne i contorni;
- nella possibilità di utilizzare questi supporti all’interno di un GIS.

Le stampe dei fotogrammi, o meglio ancora le lastre, restano comunque dei supporti preziosi, in quanto anche con una buona scansione si tende a perdere parte del contenuto informativo (i pixel nell’immagine originaria sono sempre in numero molto superiore); inoltre queste consentono la visualizzazione stereoscopica che con le ortofoto non è possibile ottenere. C’è da dire però che il processo di ortorettificazione infine comporta alcune deformazioni nell’immagine risultante che talvolta possono rendere più difficile l’interpretazione.

Ai fini del riconoscimento delle tipologie forestali da foto aeree l’informazione più importante derivabile dalla fotointerpretazione, e quella ottenibile con le migliori accuratezze, consiste nell’individuazione delle categorie fisionomico strutturali e della composizione specifica delle aree

boscate. Si tratta in particolare di stabilire innanzitutto se una determinata area si può definire territorio boscato in base a criteri tecnici e normativi e successivamente di attribuire i territori boscati ad una categoria fisionomico-strutturale secondo un sistema di classificazione definito. Ovviamente, questa informazione è ricavabile sia mediante l'impiego dei fotogrammi ed una loro interpretazione stereoscopica, sia mediante la visualizzazione a video delle ortofoto digitali.

Il primo procedimento consente di valorizzare al massimo il contenuto informativo delle riprese aeree, specialmente se si dispone di uno stereoscopio molto potente, con la possibilità di ingrandire notevolmente l'immagine (anche fino a dieci e più ingrandimenti), ma comporta molte difficoltà per raggiungere una precisione geometrica soddisfacente e anche per effettuare le misure di distanze e di superfici che risultano indispensabili nell'attribuzione di un'area di piccole dimensioni alle aree boscate.

L'uso delle ortofoto digitali inserite in un ambiente GIS, invece, semplifica moltissimo le operazioni di posizionamento del punto e di fotointerpretazione, consentendo fra l'altro di ingrandire facilmente le aree di interesse ed anche di rimpicciolirle quando sia necessario avere una visione di insieme, riducendo i tempi del rilevamento, e questo nonostante qualche perdita di informazioni che comunque non compromette la possibilità di raggiungere delle buone accuratèzze.

Un buon protocollo di fotointerpretazione ai fini della derivazione della Carta di uso e copertura del suolo deve prevedere l'utilizzo delle ortofoto digitali a colori più recenti, coadiuvate da quelle in bianco e nero nei casi in cui vi possano essere aree di difficile interpretazione per la cattiva qualità (per es. presenza di ombre, nuvole, stadio fenologico non favorevole ecc.) od anche da foto ancor più datate per utilizzare le informazioni provenienti dalle dinamiche evolutive riscontrabili attraverso i confronti fra serie storiche.

Inoltre, è buona norma aiutarsi nel riconoscimento dei tipi di vegetazione della visione stereoscopica delle stampe ingrandite dei fotogrammi originali che hanno risoluzioni molto più elevate che permette una migliore visualizzazione della struttura delle chiome giungendo, nei boschi radi o in situazioni in cui è visibile il sottobosco, anche alla stima delle altezze degli alberi.

Dato che la diffusione delle stampe a contatto dei fotogrammi originali è molto più ristretta e l'acquisizione degli stessi è onerosa, a meno di studi di dettaglio notevole che abbiano valenza giuridica o debbano sottoporsi a procedimenti di qualificazione, si deve fare a meno della visione stereoscopica. In tal caso, oltre a risultare peggiorate le potenzialità di classificazione in dettaglio della vegetazione, diventa più difficile familiarizzare con il territorio e riconoscerne le forme in una visione prospettica dall'alto. Per ovviare questa difficoltà in aggiunta o in alternativa all'uso dello stereoscopio (esclusivamente al riconoscimento della morfologia del territorio) un grosso aiuto può

essere fornito dalla visione tridimensionale dell'ortofoto ottenibile con l'applicazione del DEM su software 3D.

Per migliorare la definizione delle ortofoto si può comunque agire sul contrasto, sulla luminosità e sull'applicazione di filtri, come quelli ottenibili col ricampionamento "cubic convolution".

3.4 Individuazione dei fototipi.

Con questa operazione si intende il lavoro di digitalizzazione a video dei confini tra due aree (patches) distinguibili tra loro per tessitura, struttura, forma e colore che si presume essere omogenee per tipo d'uso e copertura del suolo tenendo anche conto della legenda di tipo gerarchico da utilizzare per la classificazione.

Una volta migliorata l'ortofoto si stabilisce il tipo di scala più idonea di lavoro. Una scala media (es. 1:10.000) limita l'individuazione delle differenze tra patches e rende la digitalizzazione più grossolana, a meno che l'elaborato finale non debba essere una carta a scala piccola (es. 1:50.000). Per sfruttare al massimo le potenzialità delle ortofoto, tuttavia, occorrerebbe lavorare su una scala pari a circa 1:3.000.

Il tracciamento del poligono di confine tra patches deve rispondere a criteri che dipendono in parte dall'esperienza pratica (criteri soggettivi) in parte da precisi protocolli operativi (criteri oggettivi). La predominanza di questi ultimi permette di rendere affidabile e soprattutto confrontabile il lavoro, tuttavia non è possibile eliminare del tutto, né sarebbe utile, la soggettività dovuta all'esperienza ed all'abilità del fotointerprete.

Di seguito si passano in rassegna i parametri delle ortofoto da utilizzare per la fotointerpretazione.

Dimensioni e forme

Le dimensioni possono essere di grande aiuto nell'interpretazione, soprattutto procedendo per confronto con quelle di elementi già noti. Nel caso dell'interpretazione di ortofoto non è possibile fare delle valutazioni sull'altezza degli oggetti, anche se si possono fare alcune deduzioni a partire dall'osservazione delle ombre che però sono condizionate anche dalla posizione del sole e dall'inclinazione del versante, mentre risulta piuttosto semplice misurare le estensioni e le lunghezze. Una prima verifica necessaria nella procedura di classificazione consiste proprio nello stabilire se l'elemento del paesaggio individuato (patches) abbia un'estensione superiore ad una soglia minima stabilita per convenzione. In caso contrario bisognerà attribuire la patche a quella più vicina che verifichi le condizioni suddette.

Rispetto alle forme individuabili, quelle molto irregolari sono quasi sempre associate ad usi naturali del territorio, mentre categorie di uso del suolo quali le superfici agricole o urbane sono caratterizzate da forme geometriche solitamente molto regolari. In genere, negli usi del suolo antropici prevalgono le linee dritte o spezzate, con curvature ed andamenti regolari (es. strade, ferrovie), mentre in quelli naturali si riscontrano forme più irregolari, dai margini spesso ondulati o frastagliati e talvolta indefiniti.

Il tono

Un parametro importante da valutare è il tono di colore che caratterizza le diverse classi di uso del suolo. Queste tonalità possono comunque essere influenzate da diversi fattori, quali la morfologia, le condizioni di illuminazione, le condizioni atmosferiche (l'eventuale foschia), la durata dell'esposizione (foto sovresposta o sottoesposta), le condizioni di sviluppo ed il tipo di pellicola usata. Nel caso si utilizzino le ortofoto in b/n i diversi valori del tono vengono in genere descritti con degli aggettivi: grigio molto scuro, scuro, medio, chiaro, molto chiaro.

Nonostante i toni assunti dai diversi oggetti dipendano da molti fattori, è possibile comunque fornire delle indicazioni di massima che aiutino nella fotointerpretazione. In genere, i terreni umidi appaiono più scuri di quelli asciutti. Toni più scuri, a parità delle altre condizioni, possono anche essere dovuti alla presenza di un alto contenuto di sostanze organiche. La roccia affiorante può assumere tonalità differenti a seconda della composizione mineralogica: ad es. le rocce vulcaniche possono presentarsi chiare, in presenza di quarzo e feldspati e scure quando sono più basiche, mentre le rocce carbonatiche e le argille presentano di solito un tono medio.

I corpi d'acqua possono apparire molto chiari, quando la loro superficie riflette la luce solare, oppure possono presentare toni cangianti dal molto chiaro al nero. La neve e il ghiaccio si presentano chiari, salvo quando hanno superfici scabre o rugose dove diventano di tono medio. In genere anche le dune e la sabbia si presentano con tonalità chiare. Nelle ortofoto in b/n i cespugli e gli alberi sono di solito molto più scuri dei terreni su cui crescono, in particolare le conifere, che assumono tonalità quasi nerastre (ma nel caso dei pini mediterranei le chiome si presentano quasi argentate, glauche in quelle a colori), mentre in quelle a colori si riconoscono facilmente per le tonalità più scure del verde.

E' anche importante notare l'uniformità del tono che è indice che si tratta di uno stesso materiale, a meno che non cambino le condizioni morfologiche. Una distribuzione di toni a chiazze può essere invece indice di un particolare tipo litologico come le zone calcaree con chiazze più scure dovute ai depositi argillosi oppure, nelle formazioni erbacee naturali, seminaturali o artificiali può evidenziare i differenti tipi di crescita del manto erboso dovuti a condizioni microstazionali differenti, oppure

ancora una struttura a chiazze in un bosco uniforme per composizione e struttura può significare la presenza di emergenze fitosanitarie di vario genere. Una distribuzione di toni a punti è caratteristica dei materiali alluvionali, dove i punti chiari indicano l'affioramento di lenti sabbiose, oppure sono dovuti alla presenza di individui o piccoli gruppi di piante erbacee cespitose e/o cespugli diffusi a random su una formazione erbacea uniforme (es.: cespugli o piante erbacee non commestibili su pascoli intensamente utilizzati o ciuffi di *ampelodesma* su pascoli percorsi da incendio).

Tessitura

La tessitura in un fotogramma è data da microcambiamenti sulla foto nella distribuzione dei toni ed è dovuta a variazioni fra l'ampiezza della radianza associata ad un *elemento* (un pixel, o un gruppo di pixel) dell'immagine e quella associata agli elementi vicini. In genere è possibile distinguere zone in cui il tono varia molto fra i pixel contigui, e zone in cui questo è quasi costante. I vari tipi di tessitura vengono di solito descritti con i seguenti aggettivi: *piatta o uniforme, fine, liscia o levigata, media, scabra o accidentata, grossolana, eterogenea, irregolare, striata, chiazzata*.

In una tessitura fine le variazioni di tono interessano elementi dell'immagine molto piccoli, fino ai singoli pixel, mentre in una tessitura più grossolana l'alternanza di superfici più scure con superfici più chiare riguarda elementi di dimensioni più rilevanti. Un esempio di tessitura uniforme è dato dalle ombre nette dove i toni si presentano scuri e non mostrano forti variazioni.

La tessitura è comunque un parametro strettamente dipendente dalla scala di osservazione, proprio perché mette in relazione elementi unitari dell'immagine, non considerabili singolarmente, con gli elementi vicini e dunque può risultare diversa se si osserva una stessa zona a scala 1:10.000 o in scala 1:25.000, poiché le microvariazioni che si osservano a maggiori ingrandimenti potrebbero non essere percepibili alle scale più piccole.

Quando si analizza il paesaggio nel suo complesso, si nota come la tessitura sia molto influenzata dalla morfologia, e in genere più sono marcati i fenomeni erosivi, più questa diventa irregolare, per la presenza di numerose piccole ombre, ma dipende anche dalle condizioni di illuminazione e dalla litologia.

La presenza di vegetazione sui substrati inoltre può dare luogo a chiazze di tonalità diverse, distribuite in modo regolare o irregolare a seconda che si tratti di vegetazione spontanea o di coltivi. Un'osservazione preliminare del tono e della tessitura costituisce un ottimo indizio per il fotointerprete al fine di individuare sottosistemi omogenei.

Associazione

L'osservazione attenta ed esperta del territorio porta a rilevare alcune particolari associazioni fra i diversi elementi che facilitano l'interpretazione. Ad esempio, negli ambienti alpini, ampie radure nel bosco associate ad uno o più fabbricati di forma allungata portano quasi sempre ad identificare aree a pascolo, anche se un'analisi della tessitura, più o meno uniforme, ed anche della forma dei margini, più o meno frastagliata, potrà aiutare a stabilire se si tratti di pascoli ancora attivi oppure abbandonati. Un'altra associazione molto frequente è quella dei boschi ripari con i corsi d'acqua, oppure quella di filari di alberi con le strade. Un brusco ed evidente cambiamento compositivo-strutturale di tipo lineare all'interno di un bosco è associato alla presenza di un compluvio con condizioni di umidità maggiori o con presenza di un corso d'acqua. Ancora un esempio di associazione può essere dato dalla presenza di vegetazione spontanea dispersa sui campi agricoli, da interpretare come indice di abbandono colturale o la ricolonizzazione arboreo-arbustiva su terreni percorsi dal fuoco.

Ombre

Le ombre possono rappresentare da un lato un ostacolo all'interpretazione del territorio, oscurandone a volte porzioni anche cospicue specialmente in regioni dalla morfologia accidentata, ma possono peraltro svolgere la funzione di indizi importanti nell'identificazione dei diversi elementi. Ad esempio, la proiezione delle ombre dei fabbricati o degli alberi è molto utile in un'immagine ortoproiettata e piatta come l'ortofoto per percepire la terza dimensione ed anche per ricostruire le forme del profilo verticale degli elementi da interpretare, come avviene frequentemente per le piante arboree.

Anche nel caso di ombre che comportino l'oscuramento delle superfici da classificare è comunque importante distinguere le ombre nette da quelle meno marcate: per queste ultime infatti, con particolari accorgimenti di miglioramento delle immagini implementati nella maggior parte dei GIS, è possibile osservare almeno in parte le forme e la tessitura del paesaggio e spesso procedere ad un'identificazione delle diverse categorie di uso del suolo, anche sulla base dell'analogia con il territorio circostante.

Frequentemente le piccole aperture nel bosco, ad esempio quelle originate da tagliate a buche, si presentano completamente in ombra, mascherando la tessitura e il tono proprie dell'effettiva copertura del suolo in queste superfici. Per una corretta classificazione delle patches sarà pertanto fondamentale analizzare con attenzione i toni, oltre che le tessiture, che in questi casi si presenteranno più scuri ed uniformi rispetto al resto del bosco.

Struttura (o pattern)

Un ultimo importante aspetto da considerare consiste nella struttura, ossia nelle modalità di distribuzione degli elementi del paesaggio sul territorio, nella loro organizzazione spaziale. La struttura può essere spesso condizionata dalla geologia e dalla geomorfologia, oltre che dai caratteri pedologici, climatici e antropici. In primo luogo occorre distinguere fra strutture naturali e strutture artificiali, prodotte dall'attività antropica. Ad esempio strutture antropiche possono essere individuate dai sistemi viari che delimitano i campi dalle forme regolari, oppure dai frutteti o dalle altre piantagioni arboree, in cui i singoli alberi sono disposti in filari distanziati in modo regolare. Esempi di struttura naturale sono le reti idrografiche, che si presentano con disegni diversi in relazione ai differenti tipi di roccia, o le diverse forme di erosione (ad es. i calanchi nelle argille), oppure la disposizione in collettivi degli alberi nei boschi d'alta quota o delle fasce boscate riparie che si sviluppano sulle due sponde dei corsi d'acqua.

3.5 Classificazione dei fototipi

Analisi del contesto paesaggistico

Al fine di migliorare le operazioni successive di classificazione delle patches individuate e digitalizzate, è consigliabile procedere dapprima con un'osservazione più ampia della foto aerea basata principalmente sulla morfologia generale del territorio e sulla disposizione spaziale dei diversi elementi del paesaggio (struttura del paesaggio). In questa prima fase, lavorando ad una scala di circa 1:10.000, si cercherà di riconoscere i vari elementi costituenti la morfologia del territorio, individuando per esempio le valli e l'andamento dei versanti aiutandosi dalla disposizione delle ombre eventualmente generate dai pendii a forte inclinazione presenti nella zona.

Nell'individuare l'esposizione dei versanti può essere di particolare aiuto identificare gli impluvi e il disegno della rete idrografica. Un elemento spesso utile nel discriminare le aree di valle consiste nella distribuzione dei centri abitati, che a seconda del contesto regionale si possono concentrare nei fondovalle, come ad esempio nelle zone montuose di un certo rilievo, oppure situate sulla sommità dei rilievi nelle zone a morfologia meno accidentata e a quota media più bassa. Questo non è comunque sempre vero su tutto il territorio italiano e pertanto nell'esame delle ortofoto verrà di grande aiuto una conoscenza preliminare del tipo di paesaggio in cui si dovrà operare che varia molto da un ambito bioregionale ad un altro.

Per il riconoscimento dei principali elementi morfologici del paesaggio risulta molto utile la Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 (per alcune Regioni disponibile anche alla scala 1:5.000) in formato digitale. Una volta effettuata l'allineamento geografico della CTR con l'ortofoto

(georeferenziazione) ed aver reso trasparente lo sfondo della CTR si può effettuare la visione contemporanea dei due strati informativi da cui risultano le forme del paesaggio facendo attenzione alla giusta scala di visualizzazione perché a forti ingrandimenti si migliora la visione delle ortofoto ma i tematismi della Carta risultano grossolani e disturbano la visione. Possono essere validamente impiegati anche modelli digitali del terreno, anche se realizzati in scale piccole, o tematismi vettoriali quali la rete idrografica e le isoipse. In ogni caso l'interpretazione risulta notevolmente facilitata da una buona familiarità con il territorio di indagine, sia sul piano geomorfologico che del paesaggio nel suo complesso.

Un ulteriore elemento utile ad attribuire una patche ad una determinata categoria consiste nel prendere in considerazione la sua "posizione" nel sistema del paesaggio. Ad esempio è importante osservare se si tratta di un ambiente montano o di pianura e, nel primo caso, la posizione rispetto al versante, se in alta quota o verso il fondovalle, se contigua ad aree rurali, se su pendenze dolci o molto ripide, mentre nel secondo caso potrà essere rilevante conoscere la distanza da un corso d'acqua, da un'area urbana o da una fascia costiera.

Scendendo ancora più nel dettaglio, per l'attribuzione di una patche ad un uso del suolo relativo a praterie o pascoli è molto utile sapere se ci si trova in aree aperte di alte quota o in zone marginali con evidenti fenomeni di abbandono delle pratiche agricole dove è più probabile ritrovare queste tipologie di uso del suolo piuttosto che in aree vallive e pianeggianti. Attraverso una semplice operazione di sovrapposizione di strati informativi una volta conclusa la fase di segmentazione e dovendo procedere alla classificazione delle patches ottenute può essere molto utile selezionare i poligoni delle aree aperte in base allo strato informativo delle quote prendendo come riferimento una determinata curva di livello limite.

Un altro caso molto interessante riguarda la stratificazione delle aree naturali per l'individuazione di aree potenzialmente interessate da un tipo di cenosi arborea che richiede particolari condizioni ecologiche (microclima, suolo, piogge e temperature, ecc.) che è possibile selezionare se si dispone degli strati informativi relativi (carta pedologica, carta morfologica, carta delle isoiete, ecc.).

Sempre a titolo di esempio: una fascia chiara lungo un versante montuoso può essere facilmente attribuibile ad un fenomeno franoso se l'area interessata rientra tra le litofacies ad alta criticità idrogeologica mentre è sicuramente un affioramento roccioso se rappresenta una cresta o un costone roccioso in aree con litologia calcarea; nei pressi delle linee di costa sarà probabile trovare "aree con vegetazione rada o assente", ma occorrerà fare attenzione, perché spesso i coltivi e gli insediamenti urbani si spingono molto a ridosso del mare; lungo gli alvei fluviali è possibile che vi siano fasce prive di vegetazione coperte da sedimenti dovuti ad una recente alluvione ma a volte

non è facile distinguerli dal terreno agrario lavorato che può arrivare fin a ridosso della scarpata fluviale, come è stato riscontrato in più punti sul fiume Marta. Questi inconvenienti sono accentuati dal fatto che le aree nude sono spesso molto chiare a causa della sovraesposizione per contrasto con aree boscate limitrofe scure e ciò rende ancor più difficile la fotointerpretazione

Ricognizione preliminare

Una volta effettuata la poligonazione delle patches si passa all'attribuzione dei codici classificatori in base alla legenda stabilita. Prima di affrontare un lavoro di classificazione è fondamentale avere una buona conoscenza del territorio su cui dovrà operare, relativamente ai tipi di colture, ai tipi di insediamenti e ai caratteri dell'ambiente naturale. A tal fine è consigliabile fare più di un sopralluogo e scattare una serie di fotografie da punti identificabili con GPS. In seguito ad una prima ricognizione del territorio vengono delineate delle zone omogenee caratterizzate da una forma e da dimensioni proprie che spesso costituiscono un punto di partenza molto valido per l'identificazione delle categorie di uso del suolo. Per coadiuvare la fase preliminare di ricognizione è utile la disponibilità di dati accessori, soprattutto se in formato digitale e quindi facilmente sovrapponibili alle ortofoto in ambiente GIS. Se si dispone di un palmare con software GIS e GPS e con cartografia topografica ed ortofoto implementate è possibile abbinare ai sopralluoghi la digitalizzazione in campo delle patches individuate a vista.

In un secondo momento bisogna passare all'identificazione degli oggetti e all'attribuzione delle diverse tessere di territorio distinguibili (patches) alle diverse categorie di uso del suolo definite. A tal proposito si fa notare che è inutile stabilire un livello gerarchico di dettaglio della legenda se il riconoscimento dei fototipi si ferma ad un livello superiore. Ad esempio mentre è facile discriminare tra boschi a prevalenza di conifere e boschi a prevalenza di latifoglie, la discriminazione a livello specifico all'interno di queste categorie è molto difficile con le sole ortofoto, anche se in qualche caso, conoscendo la flora locale o avendo fatto un sommario sopralluogo con GPS, è possibile dalle brusche variazioni della forma delle chiome riuscire a delineare il confine tra gruppi più o meno omogenei all'interno di una superficie arborea continua.



Fig. 10. Esempio di brusco cambio di toni: da quelli chiari della pineta di pino domestico a sinistra al bosco misto di querce a destra con l'inclusione di quattro pini nel settore inferiore.

A volte i lavori di fotointerpretazione per essere sottoposti a validazione sono soggetti a protocolli operativi che impongono regole rigide di segmentazione e classificazione. Una di esse è quella del limite di superficie minima e/o della larghezza minima delle patches a bosco. A volte la stima ad occhio può essere coadiuvata dalla sovrapposizione di una griglia all'immagine, come mostrato nella figura 11.



Fig. 11

Per la caratterizzazione delle classi di densità, invece, il compito è più facile, aiutandosi nei casi dubbi, con la sovrapposizione di un grigliato di punti.

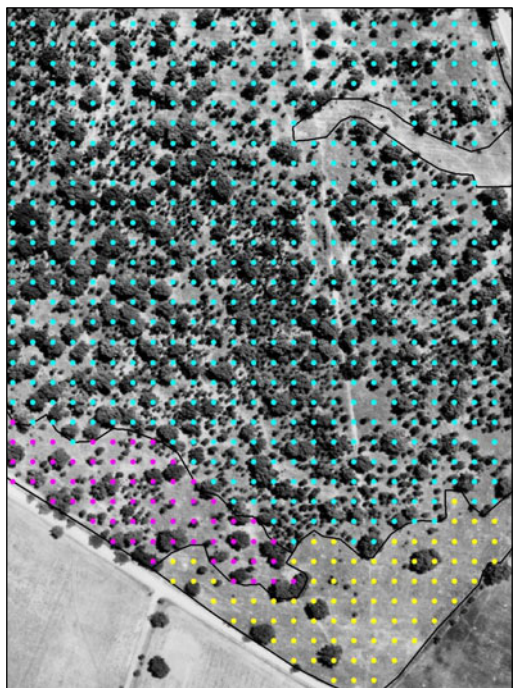


Fig. 12: sovrapposizione di una griglia di punti di lato 10 m e delimitazione dell'area in tre tipi differenti di densità: con i punti gialli settore a pascolo, con punti rosa la categoria pascolo con arbusti ed alberi sparsi (area d'insidenza delle chiome tra il 10% ed il 30%), con quelli ciano settore di bosco rado (insidenza compresa tra 30 e 60%).

3.6 Limiti della fotointerpretazione da immagini telerilevate.

I dati telerilevati possono essere di grande aiuto nella pianificazione, gestione e monitoraggio delle risorse forestali. Tuttavia, il loro corretto utilizzo non è alla portata di tutti coloro che operano in questo campo. Infatti, più i sistemi di ripresa si fanno complessi più è richiesta una serie di competenze specifiche a chi è deputato al trattamento di questi dati. E' pur vero che gli attuali sistemi software di trattamento dei dati hanno interfacce facilmente relazionabili anche con chi non è esperto di telerilevamento e che sono state implementate routine facilmente percorribili per giungere a risultati standardizzati con accuratezza più che sufficiente rispetto agli scopi pratici che si vogliono perseguire. Resta il fatto che le indeterminatezze insite nei processi di poligonazione e classificazione per fotointerpretazione non sono risolvibili affidandosi esclusivamente alla tecnologia seppur avanzata.

Per scendere sugli esempi pratici si fa il caso della diversa interpretazione che due operatori possono dare ad un fototipo ed alla diversa estensione dello stesso nello spazio. Questo è un problema generale che si presenta ogni qual volta si è costretti a semplificare, a discriminare, a categorizzare sistemi complessi come quelli naturali che spesso presentano un mosaico di passaggi graduali tra sistemi aperti con o senza vegetazione ad altri con ciuffi di cespugli ed arbusti (fig. 13).



Fig. 13, area montagnosa nel Comune di Formia

Le aree aperte sono quelle con maggior indeterminatezza anche perché presentano spesso dinamismi molto vivaci per cui una realtà si modifica in pochi anni, si pensi per esempio ad un pascolo abbandonato di collina e media montagna con veloce affermazione di cespugli.



Fig. 14, area collinare nel comune di Latera (VT) con evidente fenomeno di espansione della vegetazione arboreo-arbustiva su pascoli e oliveti abbandonati (a destra nel 1983, a sinistra nel 1994).

Volendosi limitare poi alle sole cenosi boschive ci possono essere all'interno di esse notevoli differenziazioni spaziali, pur senza brusche variazioni di confine, tra varie categorie di densità e di composizione specifica. La stessa definizione di bosco è molteplice a seconda del tipo di classificazione che si adotta e della realtà geografico-amministrativa. Spesso viene preso come riferimento il limite di cinque metri di altezza degli alberi a maturità al di sotto del quale non si può parlare di bosco ma a parte la difficoltà oggettiva di determinare l'altezza attraverso la fotointerpretazione, vi sono molte formazioni arboree in cui vi è una variazione nello spazio della statura degli individui con graduale passaggio da aree più degradate dove l'altezza media non raggiunge i cinque metri ad aree più evolute verso il bosco, per non parlare dei casi in cui in una stessa area alberi di varie altezze ed arbusti sono ugualmente rappresentati.

Un altro caso è quello delle fasce boscate che secondo la maggior parte dei sistemi di classificazione vengono incluse tra i sistemi lineari, insieme alla vegetazione di ripa ed alle siepi arboreo-arbustive se la loro larghezza non supera i 20 m. Ma anche qui spesso vi sono casi controversi per esempio laddove si verifica che per brevi tratti questo limite viene superato oppure vi sono casi in cui la fascia boschiva è il prolungamento di una patche di bosco per cui a norma dovrebbe essere inclusa in quest'ultimo pur presentando caratteri fisionomico- strutturali e compositivi peculiari.



Figura 15, area collinare nei pressi di Bolsena (VT); con le frecce sono indicati i prolungamenti dei boschi che si inseriscono linearmente tra i campi.

Grosse riserve poi possono essere fatte sull'uso dei dati telerilevati per derivare direttamente le proprietà metriche di un bosco quali l'area basimetrica, il diametro e l'altezza media, la provvigione. Anche ammessa la stretta correlazione tra tali attributi quantitativi e le proprietà spettrali occorre verificare attentamente se questa riguarda cenosi semplificate ed omogenee quali per esempio i cedui semplici monospecifici o gli impianti artificiali oppure cenosi più complesse e frammentate.

Molto spesso ci troviamo in Italia ad un paesaggio agrario-forestale complesso con situazioni molto frammentate. Questo quadro si è ulteriormente aggravato negli ultimi anni in cui si è assistito da una parte all'abbandono di superfici agrarie e di pascoli in aree marginali come la collina e soprattutto le aree montuose con contestuale forte recupero della vegetazione naturale, dall'altra vi è stato un deciso aumento delle infrastrutture e dell'urbano nelle aree di pianura e più produttive con isolamento e frammentazione dei residui di bosco o di vegetazione erbaceo-arbustiva naturale e seminaturale.

Entrambi i processi hanno contribuito ad esasperare la diversità strutturale del paesaggio che la tormentata orografia del territorio italiano aveva già per sé stessa generato. L'analisi territoriale di tali realtà frammentate obbliga la scelta di immagini ad alta risoluzione la cui gestione, come si è visto, necessita di preparazione pratica ed impegno concettuale sia in fase di preparazione delle immagini sia in quella della interpretazione. Ben altra cosa è l'analisi degli estesi sistemi boschivi per esempio del nord Europa o di altre realtà molto più uniformi dove la fotointerpretazione è più

facilitata ed in alcuni casi, a causa della inaccessibilità dei luoghi, è il solo mezzo di conoscenza del territorio.

Per far capire i limiti di una descrizione dei boschi data dalla visione esclusiva dall'alto, si fa il caso dei cedui matricinati con abbondante matricinatura che stanno cominciando a diffondersi grazie alla normativa recente che impone il rilascio di numerose matricine ad ettaro (nel Lazio n° 30 per il castagno; n° 90 per il faggio di cui 1/3 di età doppia del turno; n° 60 per le altre specie di cui 1/3 di età doppia del turno). Inoltre, dato che è buona norma diversificare il soprassuolo, spesso le matricine sono costituite da specie differenti dai polloni. Col passare degli anni le chiome delle matricine si allargano e quindi aumenta l'area d'insidenza fino a percentuali di ricoprimento relativo che possono arrivare anche al 40-50% (fig. 16). In queste situazioni, che si ripete cominciano ad essere frequenti, il dato telerilevato, tenendo conto solo della riflessione dello strato superiore delle chiome, tende a sottostimare la densità (per individuo arboreo-ceppaia) degli alberi tra le matricine ed in ogni caso conduce ad errate interpretazioni quali-quantitative del soprassuolo arboreo.

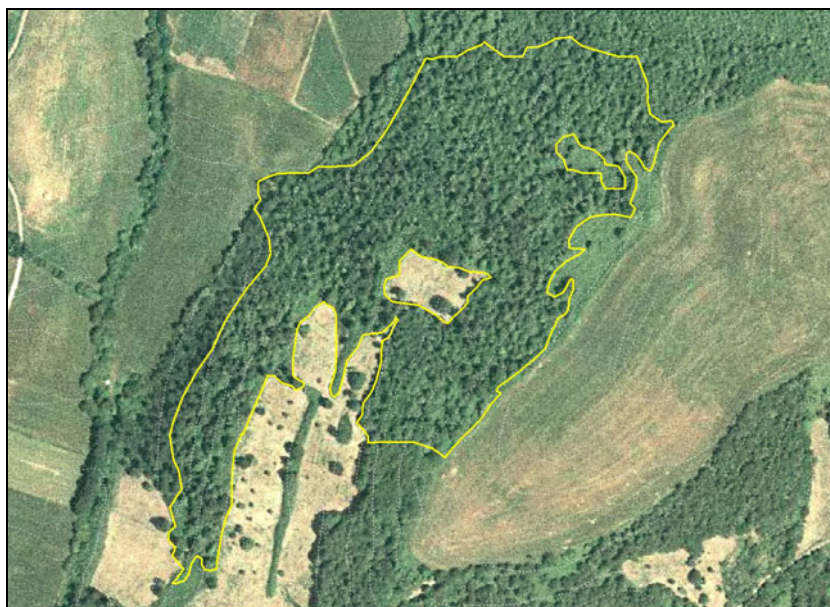


Fig. 16, bosco di castagno con abbondanti e grosse matricine di cerro in comune di Latera (VT).

Si è già detto dei limiti di soggettività che vi sono nei processi manuali di fotointerpretazione (digitalizzazione dei poligoni tramite mouse o tavola digitalizzatrice ed interpretazione dei fototipi a video). A parte le considerazioni fatte sopra sulle difficoltà oggettive dovute alla estrema varietà della realtà naturale italiana difficilmente catalogabile in rigide categorie, volendo affidarsi ai soli sistemi automatici di classificazione, i fattori in gioco (fattore di scala, eterogeneità geometrica, spaziale, attributi caratterizzanti i poligoni, aspetti tessiturali, gerarchici, tematici, ecc.) che influiscono sulla buona riuscita del processo sono tanti e collegati fra di loro in modo complesso.

Tali procedure e ci si riferisce in particolare alla segmentazione multirisoluzione con classificazione object oriented, pur essendo di gran lunga da preferire a quelle sempre automatiche pixel orientate, sono ancora in fase di sperimentazione e quindi appannaggio di chi fa ricerca, certamente fuori dalla portata di chi utilizza il telerilevamento per scopi pratici e di portata locale come per esempio la redazione di un piano di gestione o d'assetto.

Recentemente cominciano a circolare programmi che implementano queste procedure ma ammesso però che si riesca ad individuare una routine di operazioni standardizzate idonee a raggiungere il massimo risultato possibile rimane la necessità e la difficoltà di modulare i fattori che sono necessari ad avviare il processo a seconda del tipo di territorio da indagare, la qual cosa pur essendo stimolante perché coinvolge la professionalità e l'esperienza di chi utilizza tali procedure mal si presta a lavori semplificati, veloci e limitati che sono la maggior parte delle applicazioni in campo forestale.

3.7 Protocolli applicativi e metodologie di fotointerpretazione utilizzate per la classificazione nelle aree protette oggetto di analisi

I principi teorici visti sopra servono ad inquadrare il problema dal punto di vista metodologico ma i procedimenti cambiano a seconda del contesto, della scala e degli scopi della fotointerpretazione. Perciò a seguito del lavoro svolto per l'analisi e la cartografia delle formazioni arboree nelle aree di studio e sulla base delle difficoltà incontrate e degli accorgimenti usati di volta in volta per affrontarle e risolverle è stato messo a punto un protocollo applicativo che permette: a) di utilizzare il materiale fotografico aereo per fare una prima stratificazione dei boschi e delle aree naturali tramite fotointerpretazione; b) di pianificare la fase dei rilievi e c) di integrare e correggere su GIS i dati accumulati nelle varie fasi e di procedere alla stesura delle carte definitive.

In attesa che le immagini satellitari ad alta risoluzione e buona correzione radiometrica e geometrica si diffondano a prezzi più "competitivi" per studi di territori di limitate estensioni, come la maggior parte delle aree naturali, le ortofoto dei voli AIMA e IT2000 restano uno strumento ancora valido nonostante i limiti dovuti al fatto che spesso si tratta di elaborazioni che semplificano e peggiorano le qualità visive dei fotogrammi originali che hanno risoluzioni molto più elevate e quindi suscettibili di fornire un dettaglio maggiore agli oggetti riconoscibili.

Riguardo la fotointerpretazione a video le ortofoto sono comunque suscettibili di essere efficacemente migliorate per evidenziare aspetti poco conosciuti riguardanti l'emersione di caratteristiche strutturali del territorio utili alle analisi dei contesti paesaggistici. Nel nostro caso si è

lavorato sulle immagini originali con aggiustamenti del campo di distribuzione dei valori numerici delle tonalità di colore modificando manualmente gli istogrammi delle immagini oppure con procedura automatica di bilanciamento degli istogrammi per ogni banda elementare di composizione (RGB) delle immagini, conosciuta come histogram matching. Così facendo si è ridotto l'effetto della sottoesposizione delle immagini (foto scure) e dell'eccessiva rappresentanza delle tonalità verso il blu ed il verde. Per esempio si è visto che importando le ortofoto in ErMapper e applicando una trasformazione dell'istogramma che esclude dal range di valori le code rappresentate dallo 0,5% dei valori più alti e di quelli più bassi ("Autoclip trasform") sulla banda del rosso e del blu si aumentano le tonalità del giallo. In tal modo non solo risaltano meglio le tessiture dei terreni agricoli ed anche le aree a pascolo nella stagione arida estiva che è quella in cui sono state scattate le fotografie aeree nell'area in esame ma è maggiormente evidenziata anche la fisionomia delle chiome degli alberi e quindi sono più netti i passaggi all'interno di uno stesso bosco tra aree omogenee per struttura e composizione.

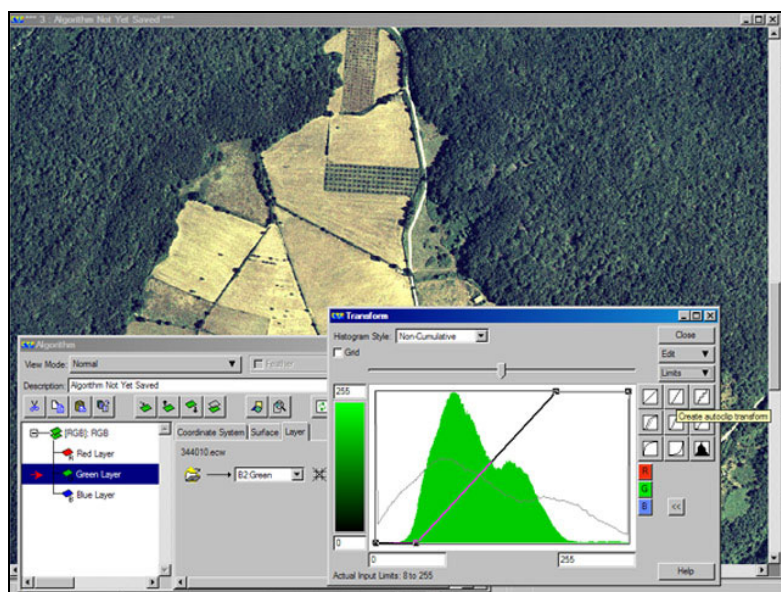


Fig. 17

La perfetta sovrapposizione delle Ortofoto-AIMA a scala di grigio con quelle a colori ha permesso di utilizzare anche le prime nei casi di maggior indeterminatezza degli oggetti da fotointerpretare, previo, anche qui, miglioramento visivo delle immagini attraverso tecniche automatiche di modifica del contrasto ("stretching"). La diversa disposizione delle ombre e della fenologia della vegetazione, dovuta alla differente data e ora di sorvolo, e soprattutto il dinamismo avvenuto nel corso dei sei anni di passaggio tra le due serie di ortofoto (fig. 18 e 19) ha permesso in molti casi di restringere di molto la serie di dubbi da risolvere con le uscite in campo. Un buon

lavoro preparatorio in laboratorio, infatti, serve a razionalizzare la fase di rilevamento a terra riducendo notevolmente i costi ed il tempo.

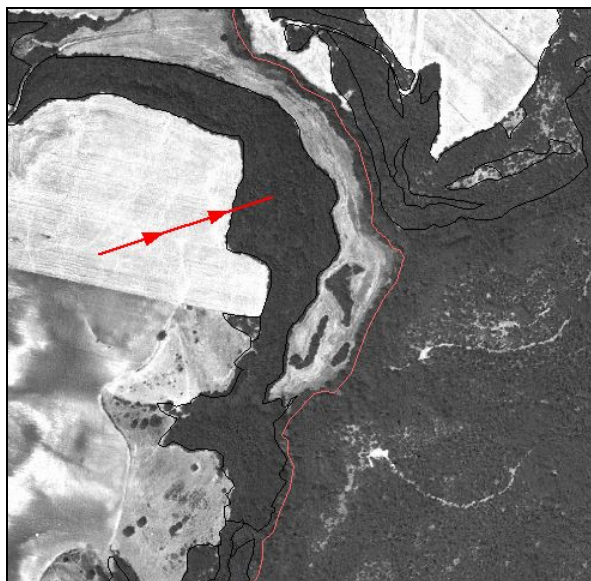


Fig. 18

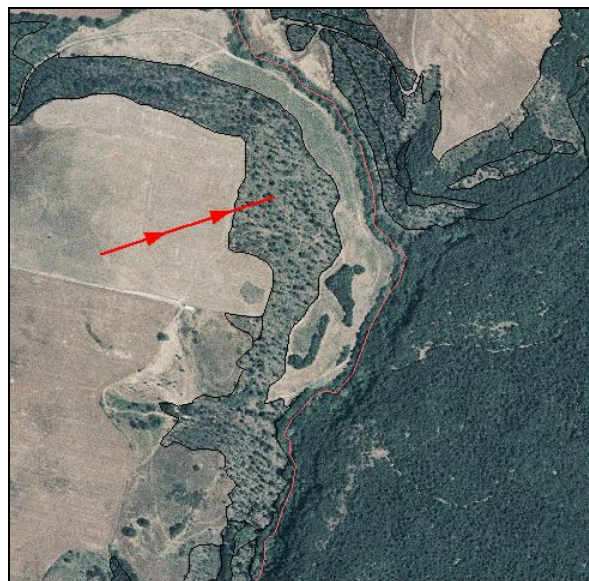


Fig. 19

3.8 Digitalizzazione delle aree omogenee

Alla fine del processo preparatorio, che ha riguardato l'acquisizione ed il controllo di qualità dei dati riguardanti le aree di studio reperiti presso vari Enti o in possesso dell'Università, con l'utilizzo del GIS, è stato effettuato un lavoro di fotointerpretazione e digitalizzazione on screen a scala di 1:3.000 giungendo ad una prima segmentazione delle aree di studio in poligoni racchiudenti aree omogenee (patches visivi) sulla base delle caratteristiche di struttura e tessitura delle immagini telerilevate acquisite. Per questa operazione, oltre ad aver messo in pratica tutte le metodiche generali descritte nel paragrafo precedente, sono state utilizzate le accortezze derivanti da anni di esperienza, qui brevemente descritte.

Per prima cosa sono ridefiniti i confini delle aree sulla base della ortofoto di riferimento cercando di eliminare o ridurre gli errori dovuti ad una superficiale chiusura dello stessi. Essendo l'obiettivo finale da raggiungere a seguito della fase classificatoria quello di delimitare patches omogenee per uso e copertura del suolo e sulla base di una legenda gerarchica approfondita per le formazioni arboree alla suddivisione per tipologie fisionomico-strutturali, è sorta la necessità di aggiustare il confine sulla base di criteri che potessero assecondare questo obiettivo.

I confini originali, infatti, seguono criteri non sempre comprensibili, anche perché non è stato possibile accertare la metodologia e soprattutto la base cartografica di riferimento, che tuttavia ad

un confronto con la CTR sembra essere questa stessa ed in particolare le strade i confini amministrativi e le curve di livello su di essa disegnate.

In alcuni casi si è trattato di ritoccare di qualche metro il limite sulla base di un migliore allineamento con una strada perimetrale (fig. 20) o con un confine amministrativo o con un dislivello o crinale; in altri casi il discostamento è stato più consistente come quello dovuto alla inclusione di patches che per la scelta di seguire una curva di livello si fossero trovate arbitrariamente divise (fig. 21), o come quello di seguire una discontinuità naturale, come un compluvio (fig. 22)

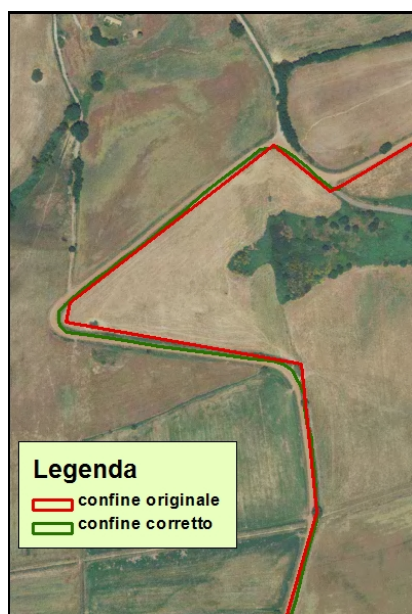


Fig. 20

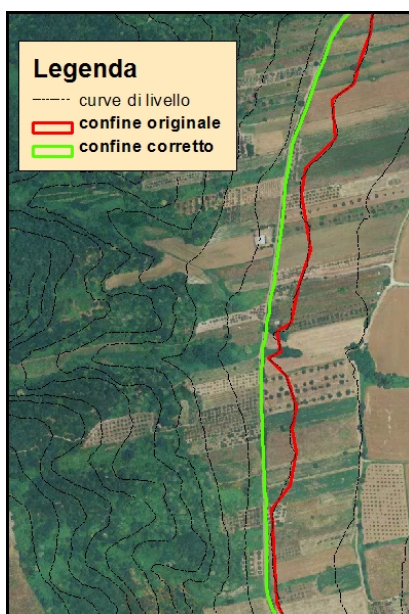


Fig. 21

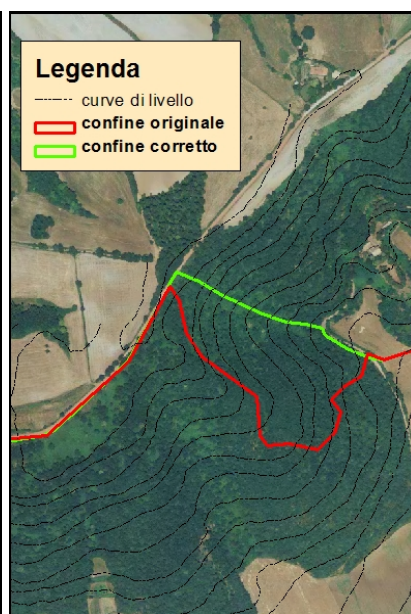


Fig. 22

Il confine rifatto dell'area è servito come poligono unico da suddividere con criteri topologici in base alle patches discriminate a video. Importante è l'attivazione della funzione di snapping per ancorare i vertici di inizio e di fine di ogni operazione di frazionamento al poligono da suddividere. Data la buona definizione delle ortofoto a colori si è potuto lavorare a scala 1:3.000 rimpicciolendo la stessa quando è stato utile avere una visione più generale. Lavorando a questa scala si possono seguire scrupolosamente i confini fra patches. Nel caso del tessuto agrario non si hanno particolari difficoltà a "tirare le linee" essendo i confini geometrici o comunque regolari ma a volte può essere utile sovrapporre l'informazione catastale perché aiuta a discriminare due particelle con differente uso. E' il caso per esempio del confine tra un campo a seminativo e l'adiacente a legnose agrarie, quando non vi siano siepi o fossati a dividerli.

Per la suddivisione delle formazioni naturali le scelte sono più delicate: se da una parte è relativamente facile seguire il confine bosco-agrario laddove le coltivazioni meccanizzate si spingono fino a pochi metri dai fusti, spesso ci si imbatte in situazioni molto più sfumate fino ad

arrivare ad una gradualità di passaggio tra bosco, formazioni minori, e formazioni erbacee con passaggi intermedi indefinibili. In questi casi, frequenti soprattutto nelle aree marginali in abbandono dove la dinamica naturale si sta affermando ai danni dei coltivi, la delimitazione delle patches è possibile solo con criteri arbitrari dovuti all'esperienza ed alle scelte soggettive che dipendono dagli scopi della carta e dalla scala di lavoro. A tal proposito in alcuni casi sarebbe opportuno utilizzare categorie miste quali "mosaico di formazioni arboree ed arbustive" o quali "formazioni minori con formazioni arboree molto rade" tipologia quest'ultima adottata per la redazione della "Carta della vegetazione naturale e seminaturale" della RN di Toscana. Nel caso della digitalizzazione dei confini bosco/no-bosco occorre fare attenzione ad escludere le fasce di ombra dalle patches a bosco ed inoltre non esagerare troppo nella densità lineare di vertici come si è portati a fare quando si lavora a grandi scale.

A questo proposito un criterio generale può essere quello di non oltrepassare un dato valore di densità lineare come avviene quando si usano funzioni di digitalizzazione con inserimento automatico di vertici implementate in alcuni GIS oppure utilizzando un algoritmo di riduzione dei vertici con criteri angolari o lineari. Un altro modo per "oggettivizzare" il processo di digitalizzazione ed eliminare i vertici inutili è quello di "generalizzare" i poligoni usando l'algoritmo di Douglas-Peucker implementato su ArcGis, che è quello che è stato utilizzato nella classificazione per fotointerpretazione.

L'algoritmo di Douglas-Peucker applicato ad un poligono connette i nodi di inizio e di fine con una linea di "trend". La distanza di ogni vertice alla linea di trend è misurata perpendicolarmente. I vertici più vicini alla linea rispetto alla distanza di tolleranza impostata sono eliminati. Il vertice più lontano viene aggiunto alla linea di trend formando un triangolo di trend. I vertici rimanenti sono misurati rispetto ai tre lati appena formati, ed il processo continua fino a che ogni vertice all'interno della tolleranza è eliminato. Così facendo, impostato un adeguato valore soglia il nuovo poligono riprende la forma di quello originale eliminando le piccole variazioni di direzione ed in generale, lo strato risultante risulta in qualche modo standardizzato e quindi più adatto ad analisi circa la forma o il rapporto tra area e perimetro come per esempio le analisi frattali. Per i polipoligoni in relazione topologica fra loro, occorre impostare anche la correzione degli errori topologici, per semplicità si può lasciare che il GIS corregga automaticamente questi errori durante il processo stesso di semplificazione.

Per quanto riguarda la scelta idonea del valore di soglia, che dipende fortemente dalla scala di lavoro, ci si deve avvalere dell'esperienza o più semplicemente con metodo iterativo per prova ed errore visualizzare il risultato fino ad ottenere il giusto compromesso tra semplificazione e mantenimento della forma. Come si può vedere dall'esempio delle figure sottostanti, a partire da un

poligono con 90 vertici realizzato a scala 1:3.000 seguendo scrupolosamente il contorno, applicando la funzione “generalize” su ArcGis con una soglia di 5m i vertici si riducono a 14 ma come si vede nella figura al centro la semplificazione è eccessiva e, soprattutto in situazioni più complesse per tortuosità dei confini si possono generare errori grossolani. Una soglia di compromesso per digitalizzazione a grande scala, che è quella che è stata adottata, potrebbe essere quella di 2 m che nel caso preso in esempio riduce i vertici a 31 senza semplificare troppo la forma del poligono.

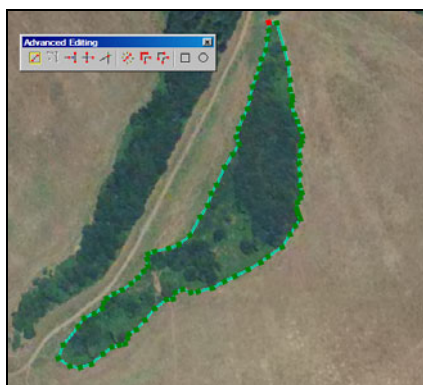


Fig. 23



Fig. 24



Fig. 25

Per il lavoro di fotointerpretazione si è posto il problema di rendere il più oggettivo possibile il criterio di superficie minima e/o della larghezza minima delle patches a bosco. La stima ad occhio è stata facilitata dalla sovrapposizione di una griglia all'immagine. Per la caratterizzazione delle classi di densità, invece, il compito è stato più facile. Anche qui però ci si è aiutati, nei casi dubbi, con la sovrapposizione di una griglia di punti.

3.9 Applicazione di un metodo semiautomatico di segmentazione per le aree boscate

A volte, come è auspicabile che sia, le aree boscate di una certa consistenza superficiale si presentano diversificate al loro interno in aree di differenti tipologie fisionomico-compositive di non facile delimitazione, ma in qualche modo suggerite dalla visione d'insieme su un'ortofoto. Per sfruttare tale discriminazione fotointerpretativa delle ortofoto si è tentato anche di verificare la validità di un metodo semiautomatico di segmentazione relativamente, appunto, alle formazioni arboree di vasta estensione. Questo è consistito nella trasformazione in ambiente IDRISI delle tre bande delle ortofoto a colori in grid con valori numerici dei pixel (BN), nella selezione delle aree con vegetazione arborea di superficie superiore ai 5 ha (attraverso una maschera bosco-non bosco ed una query di maggioranza) e successiva applicazione della classificazione hard con variazione

del numero di classi sino ad ottenere tramite confronto a video del risultato una soddisfacente suddivisione dei boschi in settori di differente tipologia compositivo-strutturale.

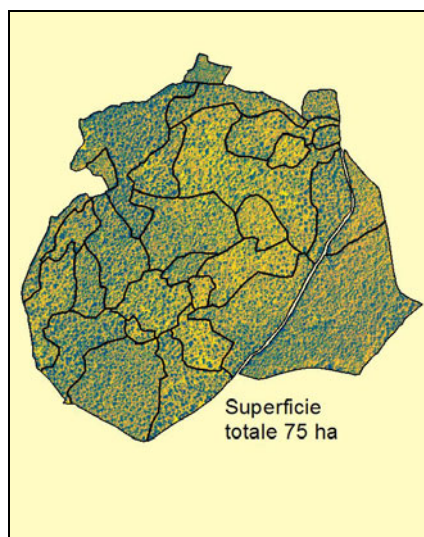


Fig. 26

Nella figura è rappresentato il bosco comunale di Monte Spinaio nella ZPS della “Caldera di Latera” con 75 ha di superficie boscata interamente caduta al taglio nei primi anni 90. La successiva verifica in campo con il GPS della effettiva differenziazione ha dato risultati positivi, anche se a volte le variazioni da un poligono a quello adiacente risultavano dipendenti dalla densità del mantello arbustivo più che da marcate differenziazioni tipologiche. Ciò dimostra peraltro che, nonostante le condizioni di partenza simili (stessa epoca di taglio e soprattutto stessa tipologia di taglio), le diverse condizioni del preesistente soprassuolo e soprattutto la sua diversa composizione specifica dovuta alle sostanziali differenze microclimatiche fra i diversi versanti a causa dell’effetto del Lago di Mezzano hanno determinato le variazioni attuali sia strutturali che compositive evidenziate con il GIS.

3.10 Utilizzo di ortofoto da voli storici per la fotointerpretazione

Per l’analisi della dinamica della vegetazione naturale e per analisi della frammentazione delle aree naturali e seminaturali sono state utilizzate le foto aeree di alcuni voli storici, come quello AM del 1940, quello RAF del 1943, quello IGM del 1954 e quello IGM del 1983.

La correzione geometrica degli ingrandimenti e delle stampe a contatto dei fotogrammi originali dei voli storici ha comportato una serie di difficoltà a causa delle grosse distorsioni dovute

soprattutto in ambienti topograficamente difficili, come i rilievi circostanti la Caldera di Latera e le forre del Fiume Marta e dei suoi affluenti.

Per una corretta georeferenziazione di queste immagini quindi, deve essere considerato anche l'effetto del rilievo sulla corretta posizione dei pixel dell'immagine. La procedura di correzione di questo effetto, che prende il nome di ortorettifica, richiede la disponibilità di un modello digitale del terreno per l'area coperta dall'immagine. Sebbene la letteratura sia concorde nell'affermare che particolare attenzione deve essere posta nella corretta scelta della risoluzione geometrica del DEM, sembra che non sia necessario che questo abbia la stessa risoluzione dell'immagine da ortocorreggere. Occorre inoltre conoscere alcuni parametri tecnici relativi alla macchina da presa ed allo scatto della fotografia aerea, quali le coordinate del punto principale, dei punti fiduciali, la lunghezza focale, la quota media di volo.

Data la mancanza di questi dati, soprattutto per i voli AM 1940 e RAF 1943, e data, inoltre, la difficoltà teorico-pratica di utilizzo di software-GIS con funzioni di correzione delle distorsioni, si è ricercato un protocollo di rettifica che ottimizzi i risultati senza onerose perdite di tempo utilizzando la tecnica dei punti di controllo di coordinata nota (GCP) con funzioni d'interpolazione localizzate conosciuto prevalentemente con il termine rubber sheeting. Il metodo richiede l'acquisizione di un elevato numero di GCP: per le immagini ad altissima risoluzione (da uno a cinque metri) l'ordine di grandezza è di almeno 10 GCP per km², cosa non sempre facile se ci si trova in aree con segni di presenza antropica (strade, edificato, coltivi, ecc.) relativamente scarsi o del tutto assenti o con ampie superfici boscate, ed in aree orograficamente accidentate. Il punto in cui cade il GCP viene fisicamente ancorato alla coordinate definita dall'utente e nell'intorno del punto viene applicata una semplice funzione lineare di interpolazione creata a partire dal 3 o dal 4 GCP più vicini tra coordinate di input e di output.

Trattandosi di un metodo di interpolazione localizzata i risultati non sono sottoponibili a verifica globale così come avviene utilizzando trasformazioni basate su equazioni polinomiali di vario ordine o con altri metodi che applicano algoritmi su tutta l'immagine. L'unica possibilità di analizzare la correttezza della rettificazione è quella dell'analisi visiva che si ha sovrapponendo la foto storica sottoposta a correzione con la base cartografica topografica e/o catastale o le ortofoto. Per esempio si possono utilizzare le funzioni Swipe e Flicker di ArcMap, la prima permette di "scoprire" gradualmente l'immagine sovrastante facendo scorrere con il mouse il margine di trasparenza della stessa, la seconda permette di attivare ad intervalli di tempo con frequenza opportuna l'immagine sovrastante. Stante la necessità di utilizzare questo tipo di trasformazione occorre fare molta attenzione alla fase della cattura dei GCP. Come detto la loro densità deve essere di almeno 10 GCP per km², ma trattandosi di un lavoro dispendioso occorre saper infittire i GCP

nelle aree dove le deformazioni sono maggiori. Esse sono le fasce esterne e le zone ad orografia accidentata quali valli e rilievi collinari-montuosi morfologicamente irregolari. Data infatti la proiezione centrale della foto aerea rispetto alla superficie terrestre è noto che, a parità di campo visivo (focale), minore è la quota di volo maggiori sono le deformazioni che si hanno ai margini. A complicare le cose poi ci sono le deformazioni dovute al fatto che difficilmente al momento dello scatto si rispetta la verticalità dell'asse focale, perché l'aereo può essere inclinato sia nella direzione di volo sia lungo l'asse delle ali (rollio, beccheggio), perciò spesso le deformazioni sono maggiori in un lato o meglio in un settore marginale della foto.

A queste si aggiungono quelle dovute al tipo di orografia del territorio che come è ovvio aumentano con la pendenza e con l'orientamento dei versanti rispetto alla direzione di volo causando oltre alle deformazioni i ben noti effetti di occlusione. Anche queste deformazioni aumentano allontanandosi dal centro della foto. In definitiva i GPP devono avere un gradiente di densità dal centro ai margini, inoltre, lavorando con un Modello Digitale del Terreno è possibile conoscere le aree di maggior accidentalità e quindi infittire i GCP in quelle aree.

Per fare un esempio delle procedure adottate si riporta la rettificazione del fotogramma n°40 del volo 1983 che riguarda una parte del SIC "Caldera di Latera". La sequenza con il fotogramma successivo indica che la direzione di volo è da sud a nord e più precisamente di un angolo pari a circa 6° rispetto al nord in senso orario. Dopo aver traslato e ruotato il fotogramma originale con 4 GCP posizionati nelle aree dei 4 angoli dell'immagine e con la trasformazione di primo ordine polinomiale (affine) si è costruito un reticolo a maglie di ampiezza un Km nei cui nodi (o nelle immediate vicinanze) sono stati posizionati ulteriori GCP. Applicando la trasformazione di primo ordine polinomiale si è ricavata la tabella degli errori dei GCP utilizzata per la spazializzazione dei valori puntuali degli errori con l'interpolatore deterministico Polinomio Locale (LP) di primo ordine.

La scelta di questo interpolatore locale è dovuta al fatto che la variabilità di morfologia che si ha in quest'area porta una certa variabilità del grado di deformazione degli elementi del paesaggio rispetto alla loro reale disposizione. Per tali motivi e per evitare di sottostimare le elevate deformazioni che si hanno ai lati dell'immagine, si è anche deciso di restringere ad un km il diametro di ricerca dei punti circostanti al valore incognito da interpolare e utilizzare solo il valore dei quattro punti più vicini. Infine, con la scelta di rimuovere il trend riscontrato a livello globale e di applicare i valori di modellizzazione del semivariogramma suggeriti dal sistema, si è ottenuta la mappa di predizione degli errori (fig. 27) che è utile per infittire i GCP nelle aree con maggiore probabilità di errore.

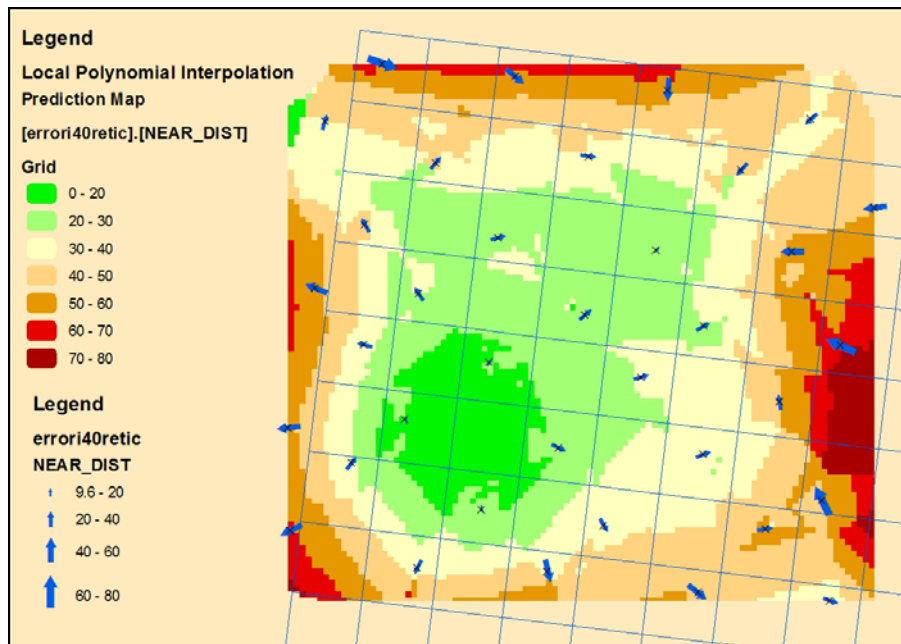


Fig. 27

Nella figura 27 è rappresentata la mappa di predizione relativa al fotogramma

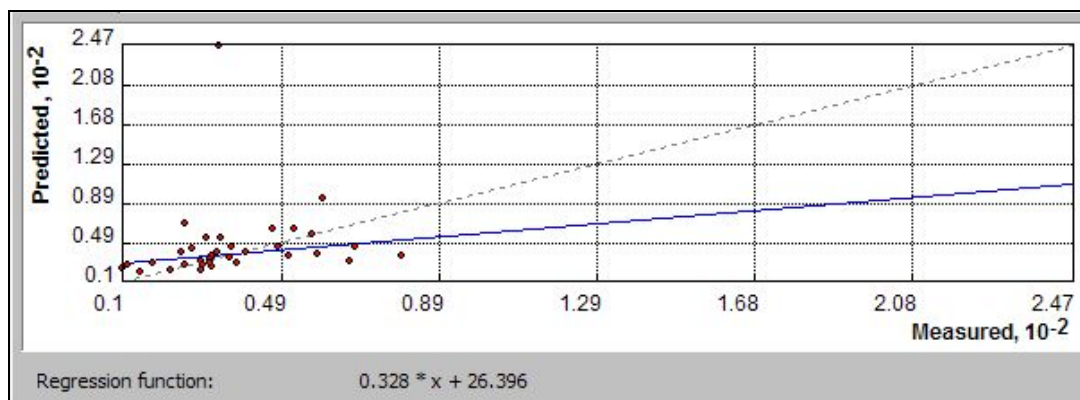


Fig. 28

Nella figura 28 è rappresentato il grafico della retta di regressione utilizzata per stimare i valori degli errori. Si nota, oltre ad un certo discostamento tra la retta ricavata e quella ideale, come solo un punto (quello dell'angolo inferiore destro del reticolo) presenta valori di predizione molto distanti, superiore ai 200 m.

A questo punto per ogni maglia chilometrica del reticolo sono stati posizionati i GCP avendo cura di non scendere mai al di sotto di una decina al Km^2 e di aumentarne fino a 20 in quelle dove la mappa degli errori presentava valori elevati e comunque nelle aree di margine e, sulla base del DEM, in quelle ad orografia accidentata, soprattutto se quest'ultime ricadevano anche nelle fasce perimetrali della foto, anche se come si vedrà più avanti si è deciso di eliminare comunque le fasce perimetrali di ciascuna immagine corretta in modo da limitare ulteriormente gli errori.

Si ribadisce tuttavia che ci si trova di fronte ad un metodo empirico e che il riscontro degli errori residui di rettifica è basato sull'analisi visiva. Occorre, infatti, una certa pratica nel saper scegliere i punti omologhi soprattutto se le due immagini di confronto si riferiscono ad epoche molto lontane e nel frattempo sono intervenuti drastici cambiamenti d'uso del suolo. A tal scopo è bene aiutarsi

anche con immagini intermedie. Se, infatti, occorre svolgere un'analisi della dinamica dell'uso del suolo è bene utilizzare voli che distano non meno di trenta anni tra una serie e l'altra e quindi supponendo di dover confrontare tre serie, partendo da quella più recente è meglio rettificare prima quella intermedia che servirà a rettificare quella più distante. Quest'ultima tuttavia dovrà sempre essere rettificata sulla base dell'immagine di riferimento della serie intermedia, nel nostro caso l'ortofoto IT2000, perché è metodologicamente corretto utilizzare sempre un unico strato di riferimento per tutte le immagini da rettificare, a prescindere dal tipo di accuratezza geometrica che questa abbia. Inoltre ci si può aiutare anche con la cartografia di base CTR o meglio ancora, come si è fatto nel caso dei voli AM 1940 e RAF 1943, al particellare catastale.

Con questo metodo, l'errore di posizionamento di un punto si ripercuote solo a livello dell'area racchiusa dai tre punti circostanti precedentemente posizionati, perciò occorre fare molta attenzione alla collocazione dei primi punti, mentre con i successivi infittimenti l'errato posizionamento dei punti può anche essere visivamente accertato con l'attivazione della correzione in tempo reale e, se necessario, può essere immediatamente corretto con l'eliminazione o lo spostamento del punto. Per quanto riguarda l'operazione di posizionamento, essa è in parte preponderante soggetta alle scelte dell'operatore sia per la scelta dei particolari di riconoscimento sia per l'esatta posizione di inserimento del punto. Ciò può sembrare ovvio per chi non è allenato a questo tipo di operazioni, ma va ribadito che occorre avere una buona esperienza e una rigorosa applicazione metodologica. Tutto comunque dipende dal tipo di precisione richiesta, dalla risoluzione delle immagini e quindi dalla scala di lavoro.

Per fare un esempio, lavorando ad una scala 1:2.000, scegliere una chioma di un albero può comportare un errore anche di qualche metro se la chioma non è regolare o se la geometria delle ombre è diversa da un'immagine all'altra. Le ombre, infatti, a volte aiutano a "staccare" visivamente meglio oggetti artificiali a sagoma geometrica, quali gli edifici, ma spesso confondono le forme degli oggetti naturali, quali appunto alberi isolati, siepi, strade che attraversano un bosco, ecc. Un altro aspetto da tenere in considerazione, soprattutto se si lavora a grande scala è quello della deformazione degli oggetti che hanno una dimensione verticale superiore ai 10 m soprattutto se si trovano ai margini della foto.

L'immagine finale dunque è il risultato dell'interpolazione lineare locale effettuata a livello dei singoli triangoli ricostruiti con il metodo Delaunay della rete dei GCP. Se l'immagine da correggere fa parte di un ritaglio di strisciata e quindi si hanno a disposizione più fotogrammi successivi con sovrapposizione di almeno il 50% del territorio, per migliorare ulteriormente la correzione è bene ritagliare comunque le fasce esterne dell'immagine.

Infine, spesso capita che il territorio da investigare è comunque sempre interno in tutto o in parte rispetto a quello coperto dai fotogrammi, quindi è inutile impegnarsi troppo a correggere i settori esclusi dall'indagine concentrandosi a svolgere un buon lavoro per quelli inclusi. Al limite è possibile ed anche auspicabile escludere totalmente dalla correzione le aree esterne, stando attenti però a inserire un adeguato numero di GCP per un buffer esterno al confine dell'area di studio di ampiezza adeguata.

Come detto l'analisi generale dell'errore basata su algoritmi di correzione in questo caso non è applicabile, trattandosi di un metodo localizzato. Nonostante ciò, per il fotogramma in questione si è effettuata una verifica a campione basata sulla stessa rete chilometrica, ma traslata di 500 m sia orizzontalmente che verticalmente applicando la trasformazione di primo ordine ed ottenendo uno scarto quadratico medio RSM pari a 5 m.

Questo risultato è fortemente influenzato dall'errore di posizione di un punto posizionato al vertice in alto a destra dell'immagine, la cui esclusione abbassa il valore RSM a 3 m. Riposizionando il punto in questione in direzione centrale di circa 100 m si nota una riduzione dell'errore RSM al valore 3,4 m, questo conferma come un errato posizionamento o una scarsa densità di punti nelle aree più deformate possa influire su tutta l'immagine, anche se per le ragioni viste sopra, con il metodo Rubber Sheetting gli errori sono localizzati.

Le foto aeree del volo AM 1940 e del volo RAF 1943 sono state rettificate aiutandosi con il particellare catastale. La cartografia catastale, oltre a essere obbligatoria nei piani di gestione, è utile per comprendere come la proprietà incide sulle scelte passate e future. Essa è anche utile nel lavoro di fotointerpretazione e di rettificazione delle foto aeree dei voli storici, soprattutto se lontani nel tempo. I fogli catastali, infatti, risalgono ai primi anni '50 e ad un primo confronto fra le divisioni particellari e l'uso del suolo attuale spesso si notano vistosi cambiamenti non riportati nella carta catastale. La definizione di particella catastale, cioè una ben delimitata porzione continua di terreno, situata in un unico comune, appartenente ad un unico possessore, assoggettata ad un'unica specie di coltura, con uniforme grado di opportunità, oppure, se non soggetta a coltura, riservata ad un'unica destinazione d'uso, spesso non è più rispettata a causa dei ben noti problemi di mancato aggiornamento dell'uso e copertura del suolo svolto dalle Agenzie del Territorio.

I casi più comuni, almeno per le aree oggetto di studio, riguardano l'accorpamento di più particelle contigue in un'unica tipologia di uso e copertura, oppure l'abbandono colturale di aree marginali con riconquista della vegetazione naturale arboreo-arbustiva. Al contrario i segni del territorio visibili dalle foto aeree degli anni '40 e '50, come quelle dei voli AM e RAF, e dovuti principalmente alle attività umane, rispecchiano molto di più le divisioni particellari ed è per questo che sono utili per la rettificazione (vedi figure 29, 30, 31).

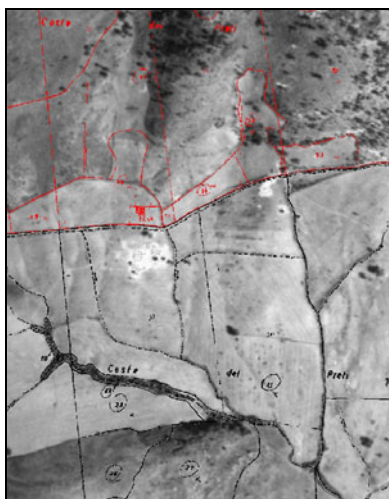


Fig. 29



Fig. 30



Fig. 31

La georeferenziazione dei fogli catastali è un'operazione complessa e delicata se si vuole ottenere un risultato con accuratezza adeguata alla scala degli stessi (1:2.000 e 1:4.000). A causa delle inevitabili deformazioni dei fogli originali le scansioni degli stessi presentano uno scostamento dalla ortogonalità lungo i margini a volte di tale entità da necessitare una preliminare serie di operazioni di correzione su un programma di disegno, quale per esempio Adobe Photoshop. Sullo stesso poi si ricostruisce il reticolo delle coordinate unendo le tacche dei margini con linee. I passi svolti per georeferenziare i fogli utilizzando il GIS nelle aree di studio sono stati i seguenti:

- si è costruito un reticolo di polilinee a maglie di 200 m con coordinate Cassini Soldner con allegata l'informazione tabellare delle coordinate con estensione tale da comprendere al suo interno i fogli interessati e tale per cui le coordinate dei suoi vertici siano un multiplo della divisione del reticolo disegnato su ciascun foglio;
- si è effettuata la trasformazione del reticolo da CASSINI SOLDNER alle coordinate delle ortofoto (UTM 33N ED50);
- sul GIS sono stati rettificati con il metodo Rubber Sheetting i singoli fogli originali sulla base del reticolo trasformato utilizzando per il riconoscimento delle maglie interessate da ogni foglio il label dell'informazione delle coordinate originali in Cassini Soldner; se il foglio non presenta deformazioni rilevanti è sufficiente utilizzare i quattro punti agli angoli del reticolo di ciascun foglio e verificare l'accuratezza visivamente e cioè vedere se i due reticoli combaciano trascurando errori inferiori ai 2-3 m. In caso contrario occorre utilizzare tutti i nodi del reticolo.

Sulla base delle coordinate dei punti fiduciali compresi dai fogli rettificati si è infine effettuata un'analisi degli errori che ha portato ad una sostanziale conferma dell'accuratezza posizionale dei raster georeferenziati con errore medio al di sotto di 2 m. La figura sottostante mostra la mappa dei punti fiduciali con relativo errore espresso sia numericamente che graficamente. La presenza di un

gradiente in senso verticale lascerebbe supporre ad un errore sistematico e quindi non imputabile ad una cattiva rettificazione. Non si è comunque indagata l'origine di questo errore perché comunque rientrante nel limite di accuratezza adottato per la scala di lavoro.

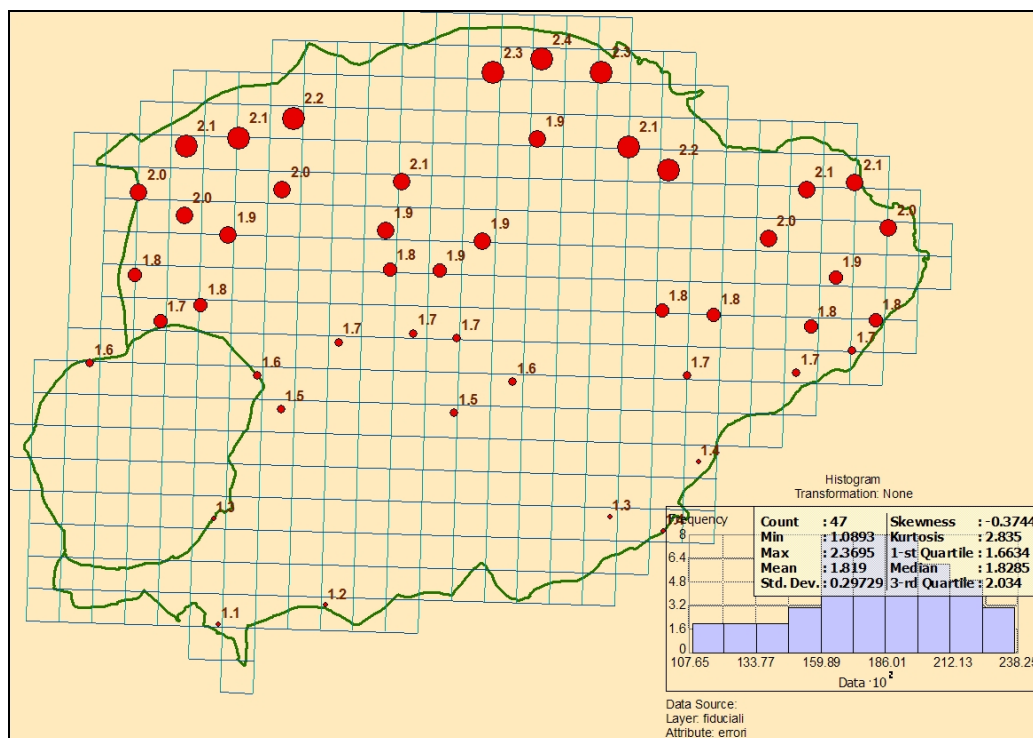


Fig. 32

4. COSTRUZIONE DEL MODELLO MORFOLOGICO

4.1 Metodi per il controllo della qualità dei DEM

L'utilizzo dei modelli digitali del terreno (o DEM dall'acronimo inglese Digital Elevation Model) nelle analisi morfologiche ha delle limitazioni che devono essere comprese prima del loro utilizzo nelle applicazioni di modellazione automatizzata. La qualità e la risoluzione dei DEM sono due importanti fattori che possono influenzare i prodotti delle elaborazioni. A tal proposito sono stati messi a confronto tra loro i due DEM più diffusi a livello tecnico nella Regione Lazio: quello a passo regolare di 20 m ottenuto interpolando i dati orografici IGM e quello a maglia quadrata con lati di 40 metri e con precisione di 5 metri derivato con tecniche di fotogrammetria dal volo Italia IT2000 della CGR di Parma. I due DEM sono stati successivamente posti a confronto con il DEM costruito nelle aree SIC-ZPS di Mezzano-Latera a partire dalla digitalizzazione delle curve di livello della Carta Tecnica Regionale.

Per agevolare le operazioni sul GIS si è generata una finestra di estensione delle elaborazioni attorno al confine delle aree SIC-ZPS e si sono ritagliati i due DEM, utilizzando opportune tecniche

per ridurre il più possibile l'alterazione dell'informazione altimetrica originale. Per ricavare il DEM dalle curve di livello digitalizzate su base CTR si è dapprima ricostruita la rete di triangoli irregolari con metodo Delaunay (TIN) e successivamente si è trasformato il TIN in grid optando per il metodo di interpolazione Natural Neighbors e valore dei pixel in numeri reali (FLOAT). Rispetto all'interpolazione lineare che attribuisce il valore del pixel esclusivamente sulla base dell'appartenenza o meno al triangolo TIN sovrapposto, questo è più corretto perché fa un'estrapolazione sulla base della distanza dei punti a cui attribuire la quota dai vertici dei triangoli circostanti ed inoltre tiene in considerazione le linee di discontinuità (hard breaklines) che il TIN crea per evidenziare le linee con rottura di pendenza. L'inconveniente è quello di rappresentare troppo le piccole variazioni di quota fra pixel contigui i cui effetti si vedono soprattutto con la derivazione dello strato delle esposizioni, ma si tratta di problemi risolvibili con successive tecniche di overlay o di ricampionamento con le finestre filtro a fronte di una maggior attendibilità ed accuratezza del dato dell'altimetria.

Una volta ricampionati i tre DEM ad una risoluzione di 20 m e con matrice di pixel geometricamente sovrapposta, è stato possibile con un'operazione di Raster Calculator ottenere i tre strati di differenza di quote DEM_CTR - DEM40m (fig. 33), DEM_CTR - DEM20m (fig. 34) e DEM40m - DEM20m (fig. 35) utilizzati per l'analisi di accuratezza altimetrica.

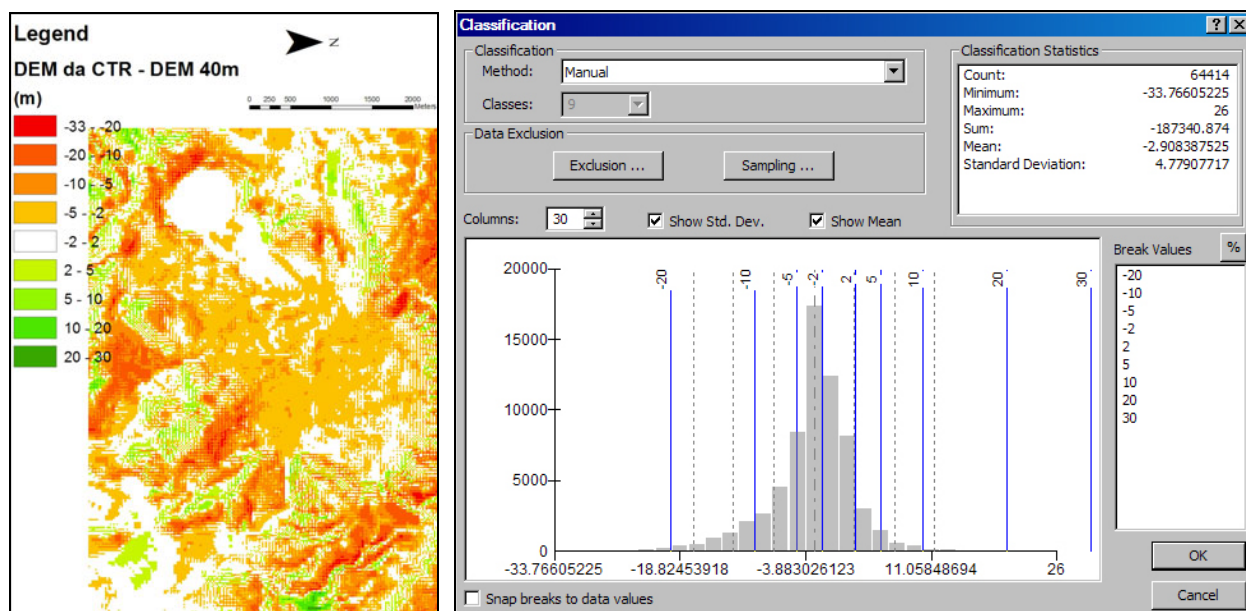


Fig. 33

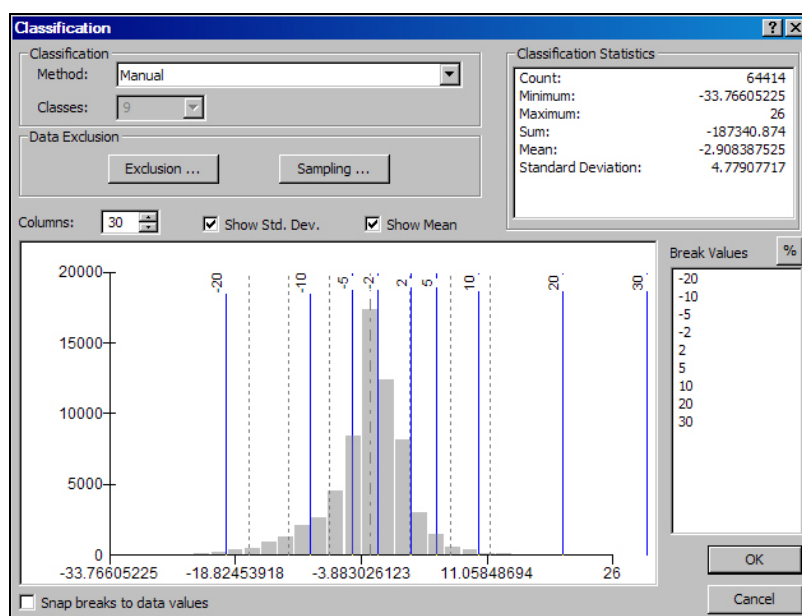
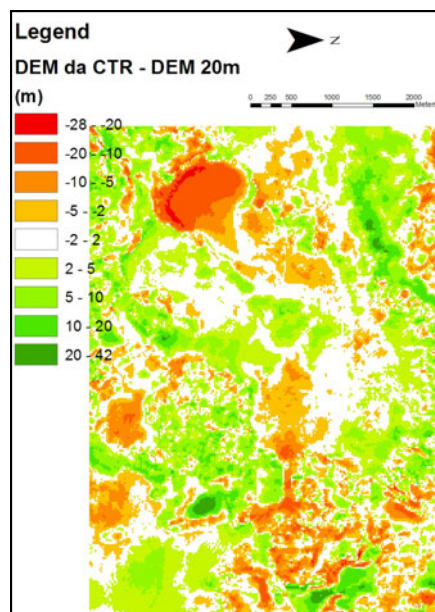


Fig 34

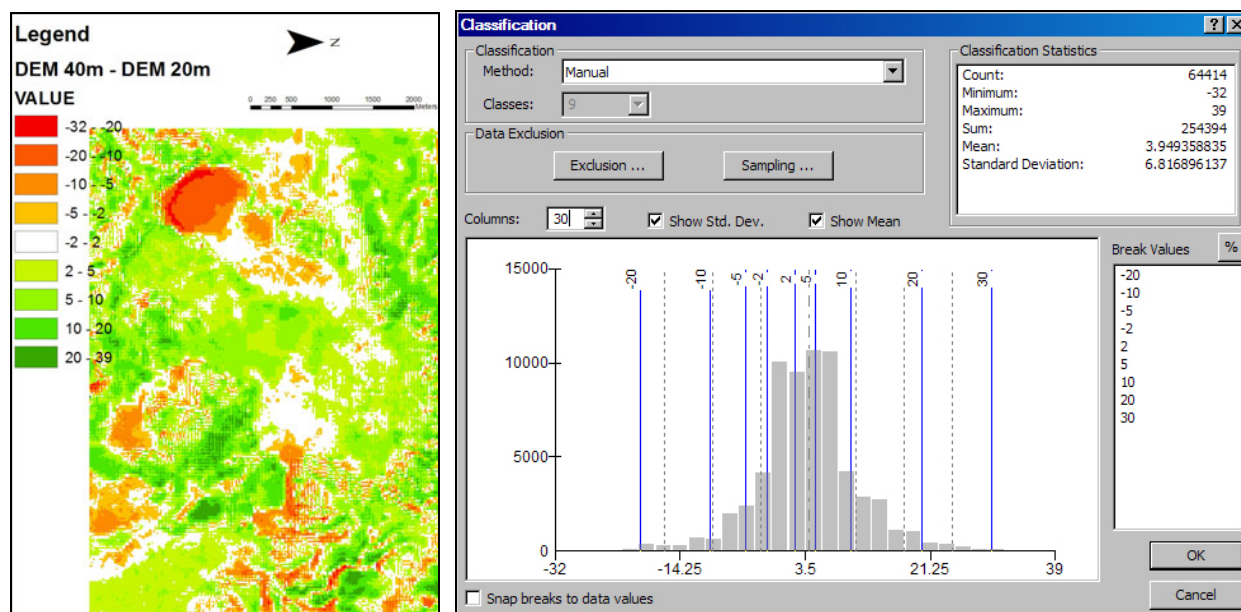
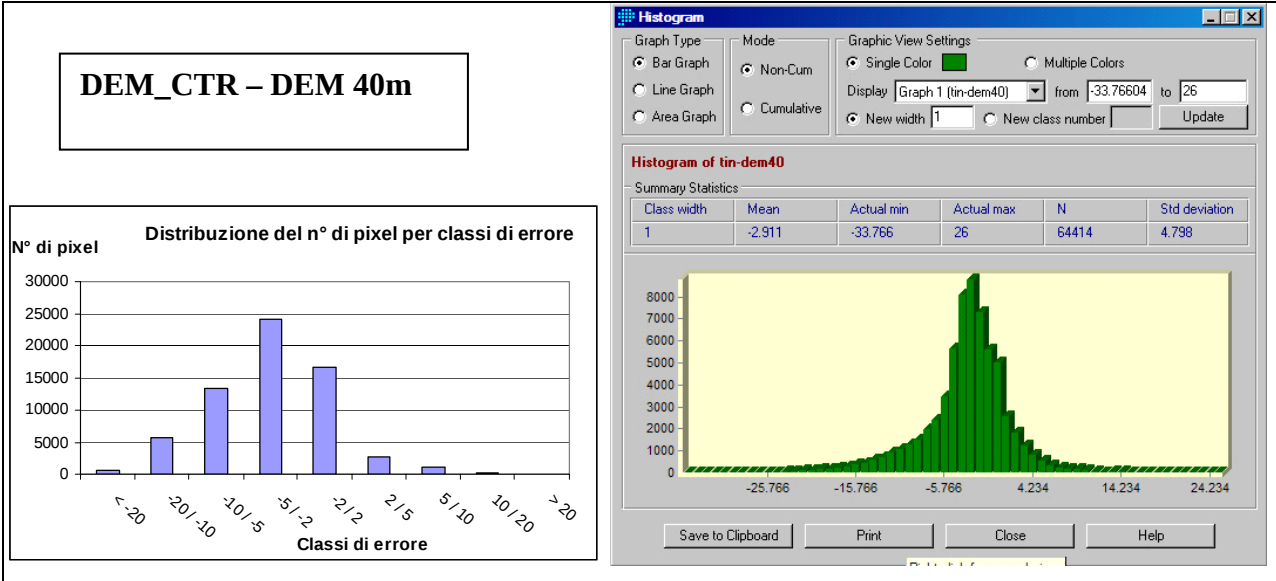


Fig. 35

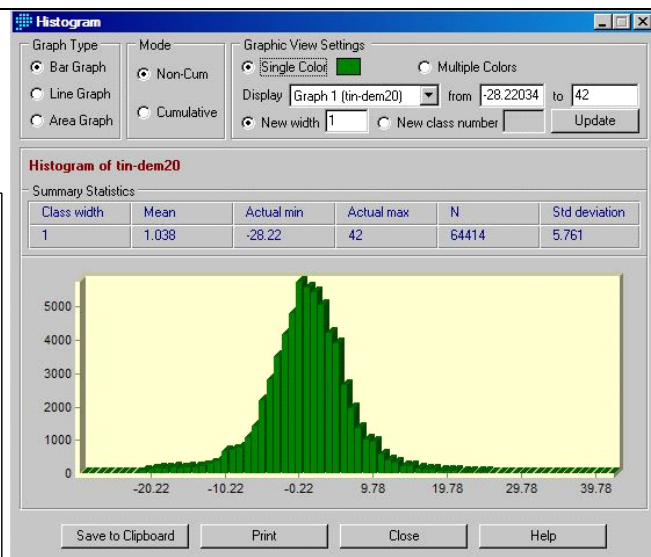
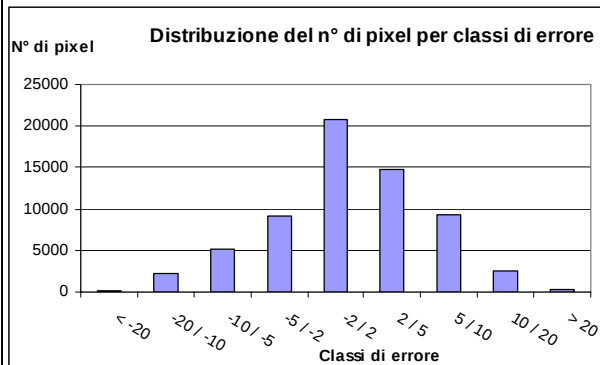
I risultati del controllo di qualità si sono basati sulla presupposta accuratezza del DEM ricavato dalla CTR, la quale, una volta appurata la qualità delle operazioni svolte per ottenerlo - dalla digitalizzazione alla costruzione del TIN e del successivo grid - (vedere paragrafo successivo), risiede nella qualità delle tecniche di restituzione aerofotogrammetrica che hanno determinato il disegno delle curve di livello sulle CTR.

Come si può notare dai grafici mostrati a termine del paragrafo, la differenza tra il DEM40 ed il DEM20 mostra il 15% dei pixel con errori superiori ai 10 m (sia in positivo che in negativo) e quasi la metà di essi con errori superiori ai 5 m. La natura di tali scostamenti con distribuzione di frequenza quasi normale potrebbe risiedere nella diversa risoluzione dei raster originari e quindi essere implicita nelle tecniche stesse di ricostruzione dei DEM. Tuttavia ad una prima indagine visiva su vista tridimensionale, supportata dal confronto con gli strati delle pendenze e delle esposizioni, fa suggerire che esista un gradiente di distribuzione degli errori sia in confronto con le pendenze sia soprattutto con le esposizioni. Mentre la maggior presenza di errori rispetto alle pendenze può ancora essere giustificata con la diversa risoluzione che penalizza i DEM a più alta risoluzione, poiché i versanti in declivio presentano, tranne rare eccezioni, conformazione concava comportando errori in positivo (il DEM40, infatti, presenta quote più alte soprattutto su pendenze maggiori del 30% rispetto al DEM20), se si confronta la distribuzione degli errori con l'esposizione si può vedere come esiste un gradiente rispetto alle esposizione est per gli errori in positivo superiori ai 10 m e di un gradiente rispetto al sud per tutti gli altri errori.

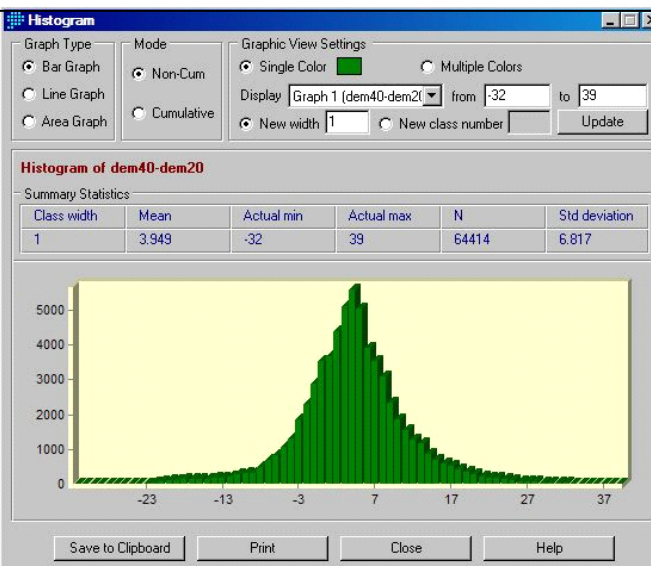
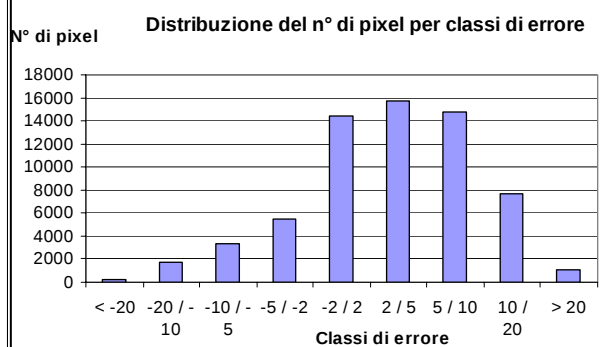
Il confronto tra il DEM ricavato dalla CTR (DEM_CTR) e gli altri due ha mostrato come il DEM 40 presenta il maggior numero di errori in assoluto rispetto al DEM 20 (con il 74% di errore



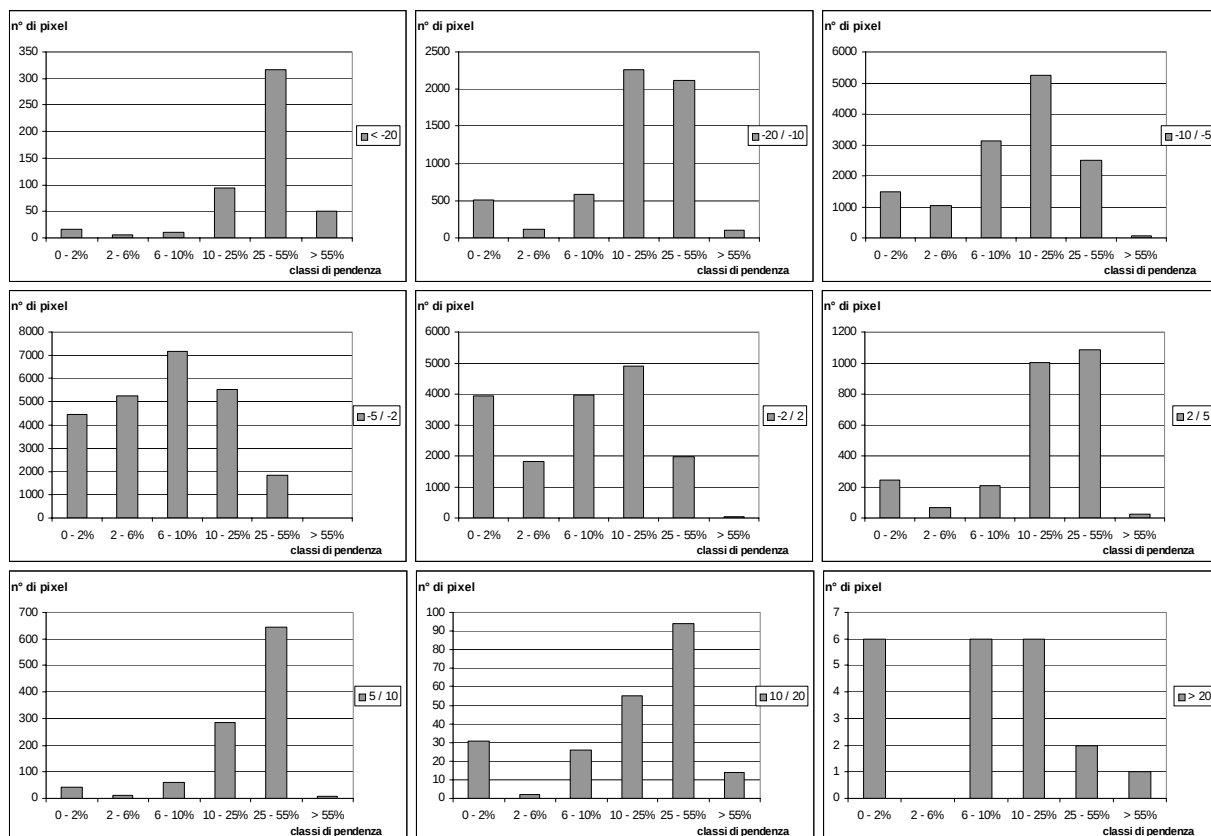
DEM_CTR – DEM 20m



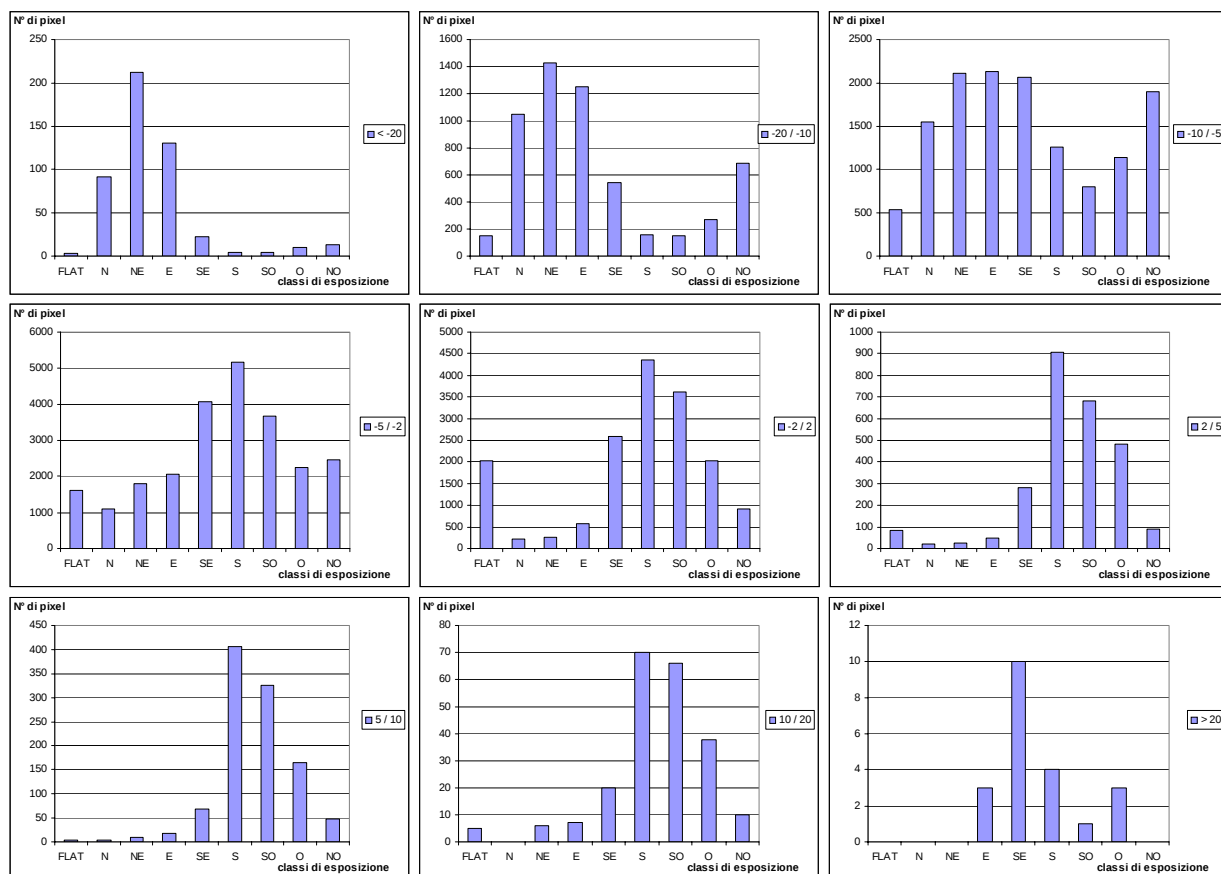
DEM40m – DEM 20m



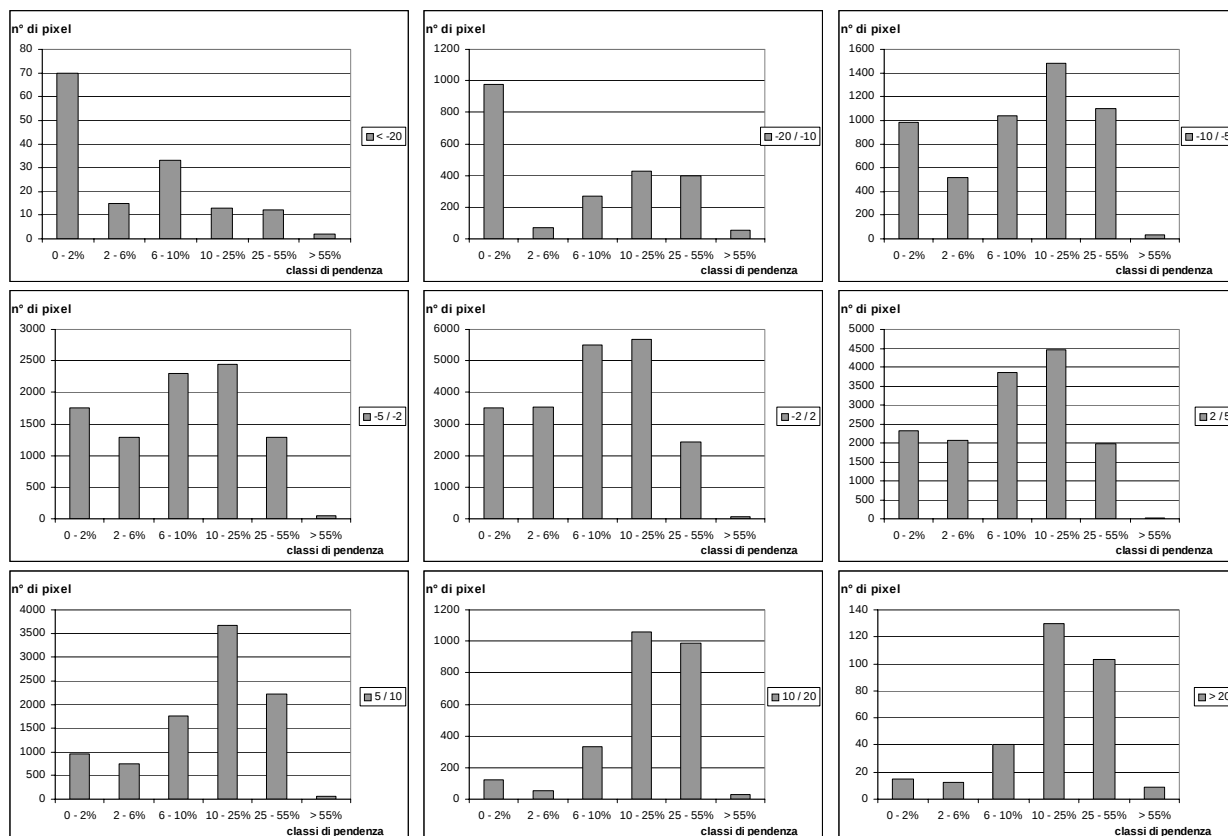
Grafici DEM_CTR – DEM 40m per classi di pendenza



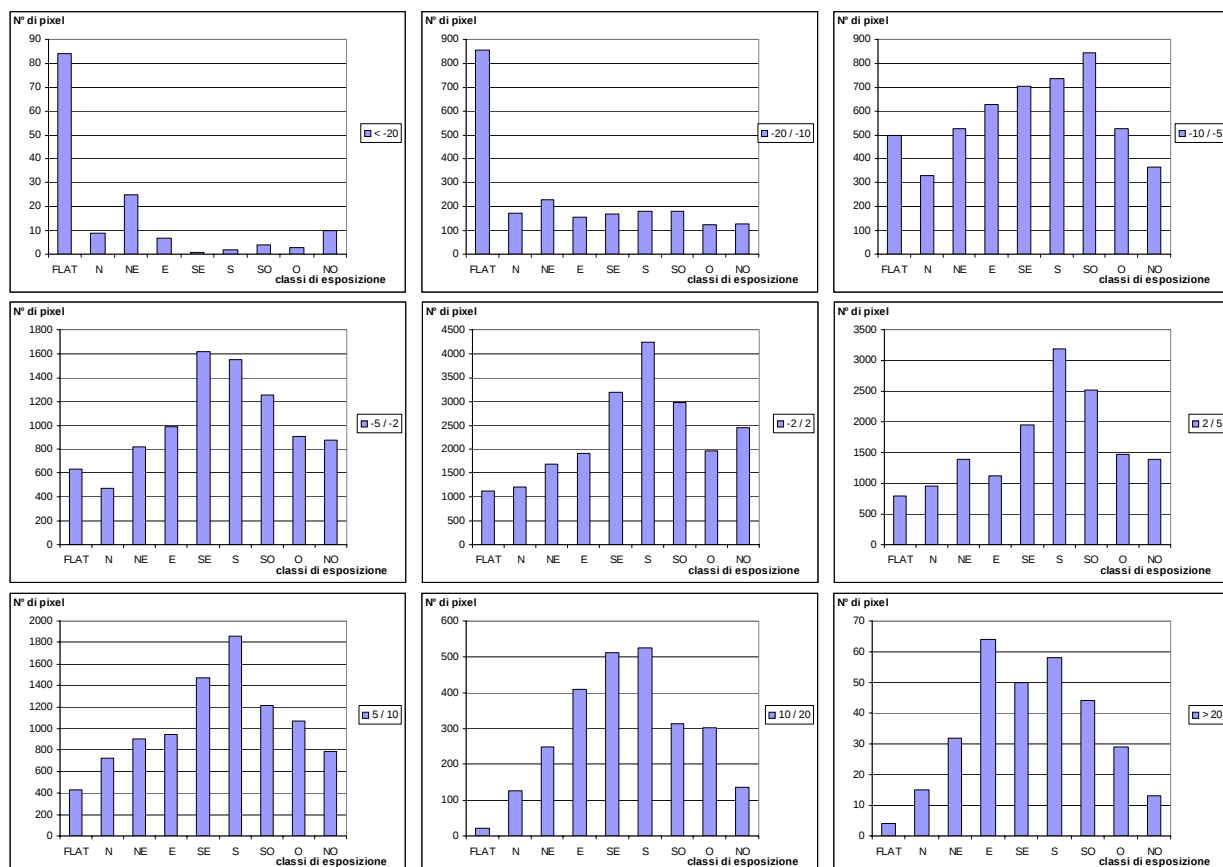
Grafici DEM_CTR – DEM 40m per classi di esposizione



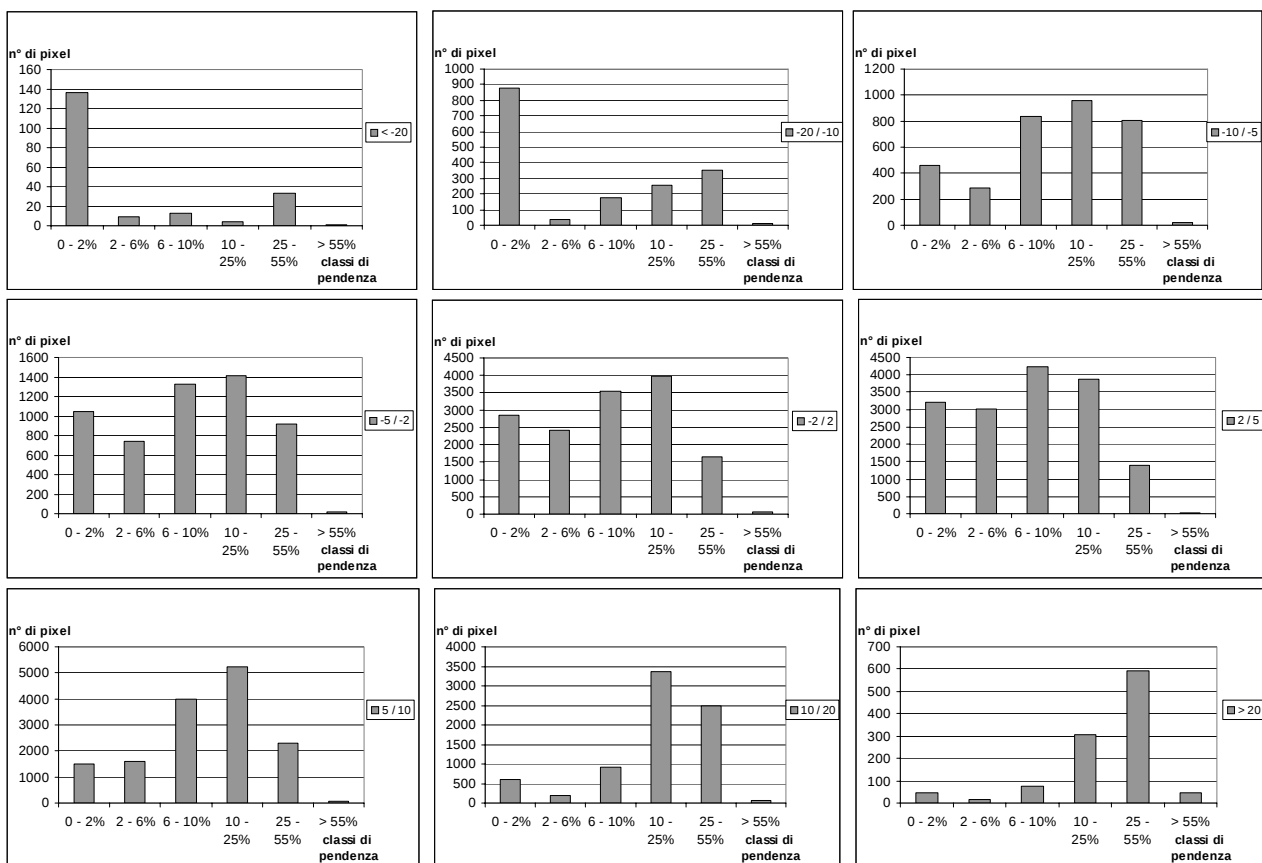
Grafici DEM_CTR – DEM 20m per classi di pendenza



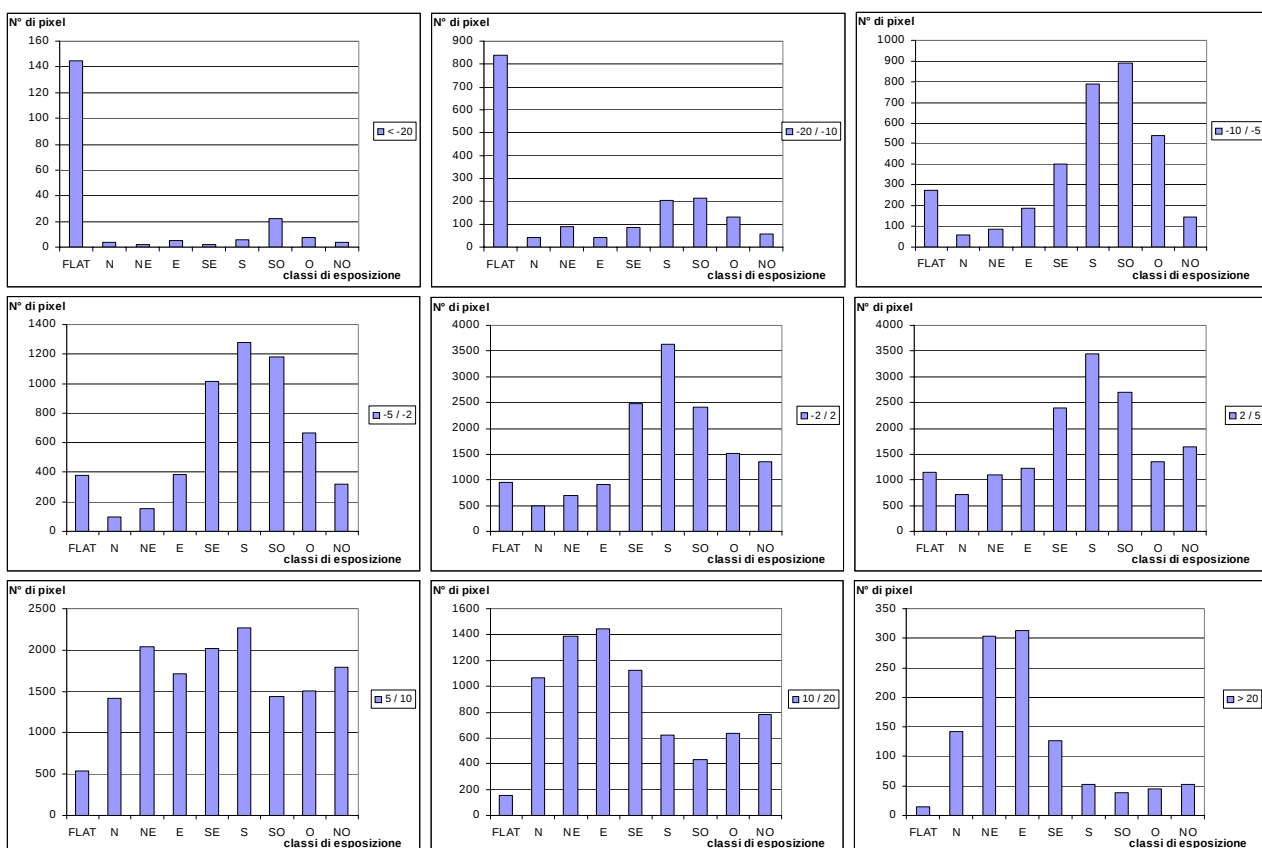
Grafici DEM_CTR – DEM 20m per classi di esposizione



Grafici DEM 40m – DEM 20m per classi di pendenza



Grafici DEM 40m – DEM 20m per classi di esposizione



4.2 Metodi speditivi e tecniche standardizzate per la costruzione del DEM sulla base della CTR.

Partendo dalle curve di livello disegnate sulle CTR delle aree di studio è stata trovata e utilizzata una tecnica di vettorializzazione delle stesse e di costruzione del Modello Digitale del Terreno, che ha comportato l'affinamento e la verifica graduale e alla fine la realizzazione di un metodo standard applicato ad ogni area di studio.

Questo metodo prevede la trasformazione dell'immagine topografica in file vettoriale e l'utilizzo di un sistema semiautomatico di formazione delle isolinee per digitalizzazione in ArcMap con la funzione "Trace tool".

Dopo una prima fase di pratica le operazioni sono risultate più veloci ed alla fine è stato sperimentato un abbattimento dei tempi di lavoro di quasi la metà rispetto alla digitalizzazione manuale, compresa la fase della correzione degli errori.

Quest'ultima si è resa necessaria sia per eliminare i percorsi a ritroso lungo il profilo raster delle isolinee, sia per regolarizzare la densità di punti di battuta che seguono le discontinuità del profilo raster delle linee e cioè eliminare alcuni di essi nei tratti troppo fitti e aggiungerli in quelli radi. Quest'ultima operazione è stata completamente automatizzata usando l'algoritmo di Douglas-Peucker implementato su ArcGis con la funzione "Generalize" utilizzata per le operazioni di digitalizzazione dei poligoni dell'uso del suolo (vedere par. 3.9). Infine, dato che le curve di livello non devono sovrapporsi, è stato applicato un metodo di controllo topologico che evidenzia tutti i casi di incrocio delle isolinee in modo da correggere gli errori manualmente.

Nelle aree a pendenza molto lieve e quasi pianeggianti si sono digitalizzate anche le isoipse tratteggiate di equidistanza di 2 metri. Successive verifiche effettuate dopo la costruzione del DEM hanno permesso di riscontrare l'appiattimento delle aree racchiuse da isoipse molto curve (per esempio promontori di forra e fondovalli molto strette). In tali zone, in assenza di isoipse di equidistanza 2 m si è artificialmente digitalizzata una curva intermedia ed equidistante tra le due adiacenti utilizzando opportune tecniche di editing per interpolazione su base GIS. Queste operazioni di affinamento del modello digitale del terreno sono dispendiose, in termini di tempo e normalmente non sono necessarie se lo scopo è quello di ricostruire il DEM su base CTR per la predisposizione di un SITL. Tuttavia sono servite a qualificare ulteriormente l'informazione altimetrica proveniente dalla CTR ai fini del controllo di qualità dei DEM descritto nel precedente paragrafo.

A partire dalle curve di livello vettorializzate si è costruita una rete TIN (Triangulated Irregular Network) che è un modello tridimensionale in formato vettoriale costituito dalla giustapposizione di triangoli (o facce) irregolari i cui vertici sono costituiti dai nodi delle polilinee che rappresentano le

curve di livello. In particolare è stato utilizzato il metodo Delaunay il quale si basa sul fatto che il cerchio che circoscrive ciascun triangolo possibile non contiene altri nodi (vedere figura 37).

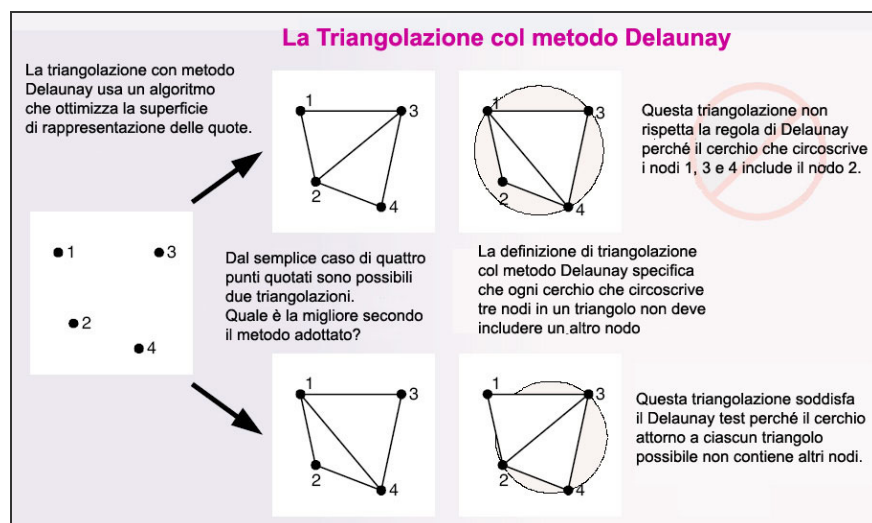


Fig. 37

Alla fine si è ricavato il DEM con risoluzione di un metro con le procedure viste nel precedente paragrafo e successivamente sono stati realizzati gli strati informativi relativi alle classi di pendenza, quelle di esposizione che sono serviti per la caratterizzazione dei boschi.

Le sovrapposizioni in formato “raster” di tali strati con quello della vegetazione sono utili per poter discriminare le unità di territorio omogenee per tipo di vegetazione e caratteristiche geomorfologiche che potranno servire per ulteriori analisi riguardanti la distribuzione spaziale delle stesse e l’ottenimento di indici utili a caratterizzare le aree dal punto di vista paesaggistico.

5. FASE DEI RILIEVI

Una volta effettuate le prime elaborazioni con il GIS in laboratorio si è passati a predisporre un protocollo operativo per razionalizzare la fase rilievi in campo. I boschi e le aree con vegetazione naturale o seminaturale sono stati visitati con il GPS, il palmare, il quaderno di campo, l’ipsometro e la macchina fotografica digitale.

Con un GIS portatile su un palmare, implementato con le estensioni di interfaccia GIS-GPS si è potuto programmare i percorsi da effettuare digitalizzandoli in laboratorio in modo da dividere le campagne di uscita in gruppi di circa sei ore ciascuno.

I rilievi hanno riguardato ciascun poligono omogeneo per struttura fotointerpretativa e per simili condizioni geomorfologiche, riducendone il numero laddove era chiaro dall’analisi visiva delle

ortofoto e dalle sovrapposizioni con gli strati delle pendenze, esposizioni e affioramenti litologici che si trattasse della medesima tipologia compositivo-strutturale.

Di ogni poligono visitato ne sono stati descritti le seguenti caratteristiche: composizione specifica, struttura, stato fitosanitario, tipo e densità del sottobosco, stato della rinnovazione naturale, stima del diametro medio e dell'altezza media, segni particolari quali presenza di massa morta al suolo o in piedi, passaggio pregresso del fuoco, accidentalità del suolo, segni della presenza di macrofauna, ecc.

6. QUALIFICAZIONE DEFINITIVA

Un ricco repertorio di immagini fotografiche ha documentato ogni rilievo effettuato. Numerose altre fotografie sono state scattate a distanza e nei principali punti panoramici, come è possibile vedere dalla figura seguente relativa all'area di Mezzano-Latera.

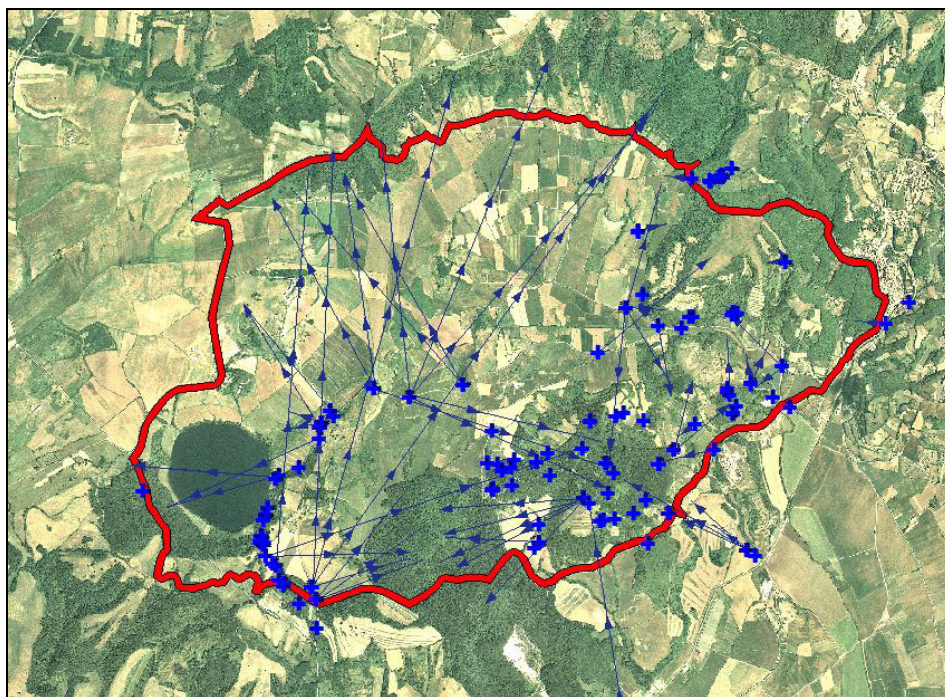


Fig. 38

Per i rilievi effettuati nelle aree protette in oggetto è stata utilizzata una fotocamera digitale Fuji E500 con sensore CCD 1/2.5" di formato 4:3 e dimensione 5.8 x 4.4 mm con risoluzione 4048x3040 pixel. Questa fotocamera, pur essendo adeguata agli scopi prefissi, rientra nella classe di media qualità; tuttavia, avendone la possibilità, sarebbe meglio utilizzare una fotocamera di alta qualità come le fotocamere REFLEX professionali con sensore di formato 3:2 ed un rapporto 1:1

con il fotogramma della pellicola, una dimensione quindi di 24x36 mm. Con queste dimensioni si ha un rapporto 1:1 fra lunghezza focale reale della fotocamera con sensore e quella equivalente al formato pellicola, in modo che si ha un elevato rapporto segnale/rumore e si garantisce che la lunghezza focale delle ottiche non sia alterata, caratteristica questa molto importante ai fini della ricostruzione della scena dell'immagine. Ancor più efficaci sono le fotocamere con sensore capace di registrare le lunghezze d'onda dell'infrarosso, utilissime ad indagare aspetti della vegetazione altrimenti difficilmente o affatto riconoscibili quali per es. il suo stato di salute.

Ogni fotografia è stata effettuata con scatto ritardato, con il cavalletto e la livella a bolla in modo da mantenere la macchina da ripresa in verticale ed evitare movimenti involontari. Una bussola orientata lungo la linea di mira ha permesso di registrare anche l'orientamento della macchina. Per migliorare la fase della ricostruzione della scena, lo scatto è stato effettuato col reticolo facendo attenzione di mirare un oggetto facilmente individuabile anche sulla ortofoto visualizzata sul GIS ArcPad implementato sul palmare con direzione della vista allineata a quella della bussola e con la posizione in tempo reale fornita dal GPS collegato. Infine, per ogni foto si sono registrate con il GPS le coordinate geografiche e la quota dei punti di scatto (posizione della macchina fotografica nello spazio reale). Tutte queste informazioni assieme a quelle riguardanti la distanza focale registrata in automatico nelle proprietà delle immagini digitali ottenute, sono servite per ricostruire sul GIS in modalità 3D la geometria della scena ripresa.

Pur cominciando ad esser diffusi funzioni GIS capaci di ricostruire in automatico il modello tridimensionale di ripresa a partire dalle informazioni viste sopra, quale per esempio quelle implementate nell'ultima versione del GIS GRASS, si è tentato un metodo manuale utilizzando il GIS ArcMap nella versione di visualizzazione in 3D (ArcScene).

Per prima cosa si è importata l'immagine su Photoshop migliorandone gli aspetti visivi ai fini di ottimizzare il riconoscimento della vegetazione arborea. Successivamente si è riportato sul GIS il punto di scatto e si è calcolata la differenza tra N magnetico e N geografico in quella zona per quel periodo in modo da poter disegnare la linea di mira.

Il calcolo dell'angolo di copertura orizzontale è stato fatto sulla base delle dimensioni del sensore in mm e della focale adottata per ogni fotografia (quella della foto 136 è di 12 mm). A parità di dimensioni del sensore, più la focale è lunga, più stretto è il campo inquadrato. Nell'esempio preso in considerazione si è utilizzato lo scatto n° 156 effettuato durante la campagna di rilievi svolta nel novembre del 2005 con una focale di 12 mm. Quindi prendendo in considerazione l'angolo di copertura orizzontale si ha: $\arctg((5.80068:2):12) = 27.17505^\circ$.

Sul GIS si è disegnata la proiezione orizzontale delle rette che costituiscono il limite del campo visivo tracciate impostandone l'angolo calcolato in precedenza e la bisettrice costituita dalla linea di mira (figura 39).

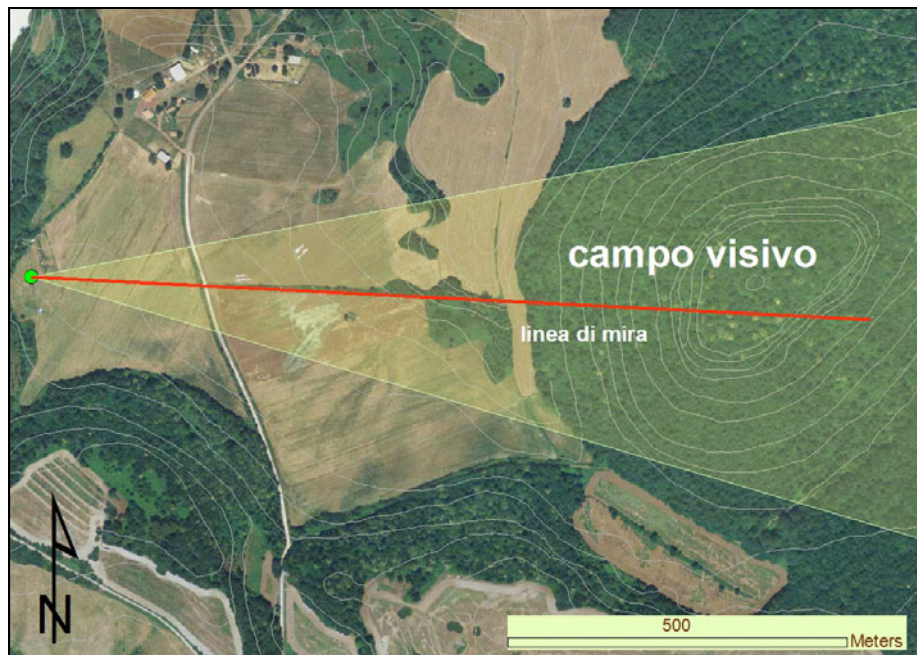


Fig. 39

Si sono riportati questi dati geografici assieme all'ortofoto più recente ed al tematismo d'uso del suolo parziale su ArcScene fornendo loro la dimensione verticale sulla base del DEM costruito per l'area in questione (fig. 40). Successivamente si è impostata la posizione X,Y,Z del punto di osservazione e sulla base della linea di mira si è determinata la posizione target in modo che tutte le linee risultino in prospettiva rette. Riportando su un'altra vista in parallelo l'immagine del fotogramma 156 (fig. 41) si è potuto avere un confronto tra le informazioni in essa contenute con quelle degli strati raster e vettoriali precedentemente acquisiti ed elaborati.



Fig. 40

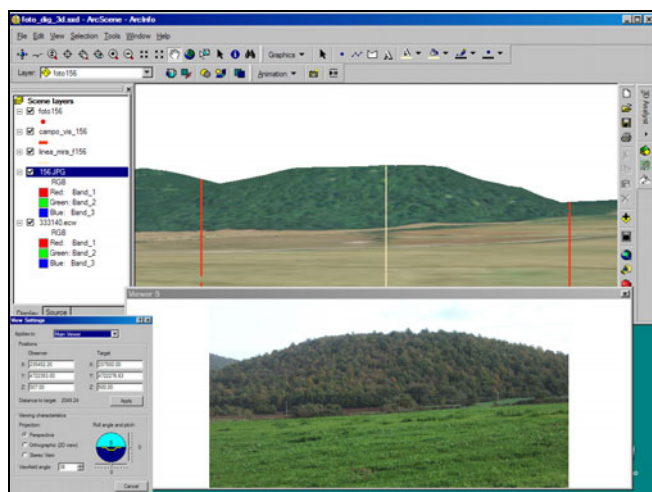


Fig. 41

Per quanto riguarda gli aspetti forestali questo lavoro di ricostruzione della scena di scatto ha permesso di ricavare utili approfondimenti circa la composizione specifica e la struttura delle formazioni arboree e di individuare e posizionare correttamente le linee di discontinuità fra tipologie differenti, confermando o aiutando a correggere con digitalizzazione effettuata direttamente in 3D su ArcScene la carta d'uso del suolo realizzata per fotointerpretazione on screen e successive modifiche.

La successiva fase ha riguardato l'elaborazione dei dati acquisiti con il GIS. E stata prima costruita una legenda sulla base delle tipologie di bosco e di vegetazione naturale riscontrate e del tipo di dettaglio richiesto, a cui è seguita la classificazione dei poligoni racchiudenti aree omogenee per soprassuolo vegetale e la costruzione del relativo data base.

Le informazioni derivate dei rilievi assieme a quelle ottenute con la renderizzazione delle foto digitali su GIS 3D sono servite per correggere la digitalizzazione effettuata per fotointerpretazione a video e per attribuire un codice di tipologia per ogni patche e per corredare la tabella allegata ad ogni patche di informazioni riguardanti la composizione specifica, il tipo di governo e trattamento, la densità di copertura, l'altezza e del diametro medio, la presenza e le caratteristiche del mantello arbustivo e delle specie arboree minori consociate ed altre informazioni eventualmente riscontrate.

Sulla base di tutti i dati disponibili e tenuto conto delle esigenze operative strettamente collegate alle finalità del lavoro, che è appunto la predisposizione di linee di gestione per i soprassuoli arborei e successiva verifica e aggiornamento, si è ricostruita una legenda gerarchica delle tipologie. Per quelle arboree si è giunti ad un grado di dettaglio pari al V livello del CLC e cioè a livello di composizione specifica, con l'aggiunta di un'ulteriore differenziazione riguardante il governo. Per le altre formazioni naturali e seminaturali (arboreo-arbustive, minori e di mosaico) con presenza consistente di individui arborei si è tenuto conto della prevalenza di specie arborea o arbustiva. Per

tutte le altre formazioni naturali e seminaturali con assenza o presenza sporadica di alberi ci si è limitati alla caratterizzazione primaria distinguendo strutturalmente le tipologie in base alla predominanza o meno degli arbusti rispetto alle formazioni erbacee. Un ulteriore dato è stato quello di censire le formazioni lineari, cenosi arboreo-arbustive (filari siepi, fasce boscate o cespugliate sottili) con dimensioni trasversali inferiori ai 10 m, e i singoli alberi isolati nella matrice agraria.

7. UTILIZZO DEL GIS PER L'ANALISI DELLA FRAMMENTAZIONE DELLE FORMAZIONI ARBOREE: APPLICAZIONE DI UN SISTEMA AUTOMATICO DI DISCRIMINAZIONE BOSCO_NO-BOSCO E VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA TEMATICA DEI RISULTATI.

Gli aspetti paesaggistici, intesi come distribuzione ed importanza degli elementi naturali e seminaturali nel contesto generale sono di grande importanza per lo studio e la successiva gestione delle aree naturali. Lo studio del paesaggio non può prescindere dall'analisi della sua evoluzione storica sia per capire quali eventi sono accorsi negli ultimi decenni sia per prevedere eventuali evoluzioni future o prospettare scenari.

L'analisi degli aspetti strutturali del paesaggio delle aree di studio ha riguardato esclusivamente la frammentazione delle formazioni arboreo-arbustive. In particolare ci si è soffermati sulla ricerca di una metodologia standard veloce, pratica ed economica ma al tempo stesso statisticamente attendibile per la restituzione in automatico dell'informazione bosco-non bosco a partire dalle ortofoto.

A seguito della necessità di fornire indicazioni circa la gestione dei boschi all'interno delle aree protette oggetto della mia ricerca di dottorato (piano di gestione) e dovendo interpretare la stessa gestione come un sistema di indicazioni pratiche di aspetto normativo atte a ridurre l'attuale frammentazione degli habitat naturali è stata effettuata un'analisi della struttura del paesaggio limitatamente alle formazioni arboree. Nel caso delle aree SIC-ZPS l'analisi di tali aspetti è non solo auspicabile ma anche necessaria perché rientra nello spirito stesso delle norme di tutela alla base della costituzione di queste aree.

Per poter confrontare il grado di frammentazione delle aree SIC-ZPS rispetto alle aree limitrofe si è reso necessario ampliare l'analisi anche alle aree circostanti. La definizione stessa di paesaggio rimanda al concetto di unità territoriale di studio e quindi le analisi che lo riguardano si possono effettuare solo dopo aver individuato un ambito territoriale circoscritto la cui estensione e la cui forma risponde ad esigenze che sono sia di ordine pratico che di tipo metodologico. Nel caso in

esame delle due aree SIC-ZPS “Lago di Mezzano” e “Caldera di Latera” l’ambito di analisi è per così dire imposto a priori come il confine delle stesse tuttavia a causa della artificiosità di questo confine rispetto alle linee naturali di interruzione delle forme di paesaggio, quali per esempio gli spartiacque tra due versanti, si è pensato di utilizzare una suddivisione del territorio in bacini e sottobacini. Con la funzione di Hydro-Watershed di Arcview si è dapprima ricavato il bacino del Fiume Olpeta e successivamente con la stessa funzione e con l’opzione di impostare il n° di sottobacini sono stati ricavati 32 sottobacini con superficie non troppo distante da quella dell’intera superficie delle aree SIC-ZPS. Le analisi del SIC-ZPS sono state fatte sia per il territorio racchiuso dal confine delle aree protette sia per il sottobacino che racchiude la maggior parte di territorio protetto, che non si discosta molto dall’area SIC-ZPS a causa del tipo di orografia della zona e del fatto che la perimetrazione delle aree protette ha tenuto conto della morfologia.

Confronto storico

Di ogni sottobacino si è ricavato lo strato bosco/no-bosco sulla cui base si potranno successivamente calcolare gli indici di frammentazione delle formazioni arboree. Inoltre solo per l’area in esame è stato ricavato lo strato bosco/no-bosco per le serie storiche del volo AM 1940, RAF 1943 e IGM 1985 per ricavarne gli indici i cui risultati potranno essere confrontati con quelli attuali per ricavarne utili indicazioni per la conoscenza del grado di frammentazione delle aree in esame.



Fig. 42



Fig. 43

Queste analisi serviranno poi a favorire la comprensione del fenomeno ed aiutare a immaginare e prospettare scenari futuri attraverso la simulazione di operazioni di “ricucitura delle patches” e cioè ipotizzando interventi ad hoc nei potenziali corridoi di congiunzione tra patches isolate e successivamente elaborando le varie gradualità di intervento sul GIS mostrandone visivamente gli effetti (anche su viste in 3D) e calcolando la variazione degli indici di frammentazione.

In questa sede ci si limita ad esplicitare gli aspetti tecnici riguardanti l'ottenimento dello strato bosco-no bosco e le analisi statistiche volte a confortare i risultati delle operazioni automatiche. Si vuole, infatti, qui dimostrare come con opportune operazioni sia possibile utilizzare le ortofoto con un GIS desktop quale ArcGis per raggiungere gli scopi prefissi.

Uso del Suolo

La classificazione di un'immagine telerilevata è il processo con il quale viene prodotta una cartografia tematica. La procedura operativa più comunemente impiegata, soprattutto in campo forestale, è la fotointerpretazione manuale. Per questo tipo di operazioni, in questi ultimi anni si stanno sempre di più utilizzando come base per la digitalizzazione in ambiente GIS le immagini multispettrali, utilizzando composizioni a colori naturali o a falso colore delle bande, eventualmente fuse con la banda pancromatica. Ad esempio, per la realizzazione di una carta di copertura del suolo, le differenti tessere territoriali (patch) vengono assimilate a poligoni cui viene attribuita una e una sola classe del sistema di nomenclature prescelto. Sebbene la fotointerpretazione manuale sia tuttora il sistema di classificazione più utilizzato per la produzione di cartografia tematica anche nel settore forestale, la procedura è condizionata da un certo grado di soggettività sia per quanto riguarda la scelta dell'attribuzione dei poligoni alle diverse classi tematiche, sia per quanto riguarda la delineazione del perimetro dei poligoni stessi.

Per superare tali limiti sono stati sviluppati metodi di classificazione automatica (unsupervised) e semiautomatica (supervised) nel tentativo di ottenere prodotti più oggettivi, in tempi più brevi e a costi più contenuti di quelli derivati per fotointerpretazione.

Le tecniche di classificazione semiautomatica delle immagini telerilevate sono state ampiamente sperimentate per la realizzazione di cartografie di uso/copertura del suolo. Essa di solito viene applicata quando le immagini sono ricavate da scanner aviotrasportati o satellitari che registrano la riflessione della superficie terrestre in varie bande o finestre spettrali il cui numero varia a seconda del tipo di sensore. Più bande vi sono e più è elevata la risoluzione radiometrica e geometrica delle scene di ripresa è maggiore è il grado di dettaglio degli oggetti ripresi e il numero delle tipologie che si possono distinguere. Per una buona discriminazione delle superfici vegetali, non solo rispetto alle altre ma anche all'interno delle stesse, sono fondamentali le finestre spettrali nell'infrarosso.

L'utilizzazione delle ortofoto AIMA e IT2000 per la classificazione in automatico dell'uso e copertura del suolo è problematica se non inutile. Queste immagini, infatti, non hanno le bande nell'infrarosso: le ortofoto AIMA hanno solo una banda nel visibile frutto della fusione dei tre colori fondamentali, mentre quelle a colori hanno le tre bande del visibile: il rosso, il verde ed il blu. Escludendo dal discorso le ortofoto AIMA e prendendo in considerazione un possibile utilizzo delle

tre bande RGB delle ortofoto IT2000 c'è da dire innanzitutto che, a parte l'assenza di informazioni nell'infrarosso, il processo di ricampionamento e di correzione dei campi spettrali delle singole immagini effettuato per mosaicarle ha banalizzato di molto l'informazione sul colore. E' stato comunque effettuato un tentativo di classificazione automatica (Supervised Classification) sul GIS IDRISI basata sulle tre bande visibili con il metodo della Hard classificazione supervisionata utilizzando 8 tipologie di poligoni di "training site" provenienti dalla fotointerpretazione dell'area ZPS Caldera di Latera. Già dal grafico che mostra la media e la varianza del valore dei pixel per ciascuna delle tre bande (fig. 44) si può vedere come i segmenti che rappresentano le media sono ben distinti in ogni categoria tranne che per i boschi radi e le formazioni minori dove sono quasi sovrapposti, ma il campo di variazione dei pixel per ogni tipologia, che è quello che più interessa per ottenere un buon risultato, è sempre ampiamente sovrapposto alle altre, tranne che per le aree nude (strade e cave) dove se ne distacca per un buon tratto.

La confusione dei campi di appartenenza dei pixel di ciascuna categoria per ogni banda è poi evidenziata dagli scatterogrammi che sono un modo per visualizzare sinteticamente la distribuzione dei valori delle riflettanze tra due bande sui quali è possibile mostrare anche la distribuzione dei pixel per ogni tipologia nelle due bande considerate. La figura 45 mostra la distribuzione dei valori della densità (log della frequenza) dei vari pixel nelle due bande del rosso e del verde: più è alto il valore più è alto il numero dei pixel con la stessa combinazione di valore di riflettanza nelle due bande e meno è significativa la combinazione stessa per quei pixel. Le altre due combinazioni di bande (rosso-blu e verde-blu) mostrano un andamento simile e relativamente peggiore dal punto di vista del numero di uguali combinazioni di valore dei pixel nelle due bande. Le areole di forma ellittica rappresentano il campo di distribuzione dei pixel per ciascuna categoria d'uso del suolo presa in considerazione. Esse, come si può notare, sono tutte racchiuse nella zona di maggior densità e quindi la variazione del valore dei pixel nelle due bande considerate non è significativa per discriminare le varie tipologie. Fa eccezione la categoria strade e cave con valori di uguale combinazione relativamente bassi.

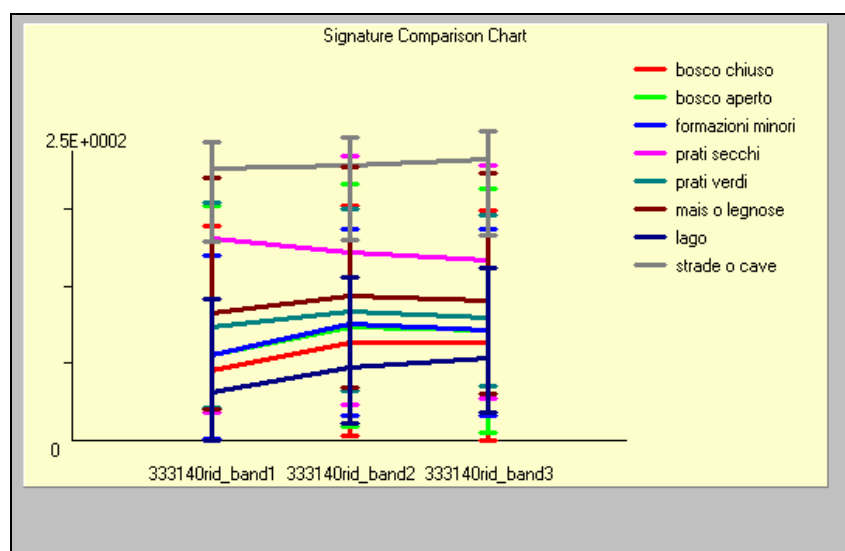


Fig. 44

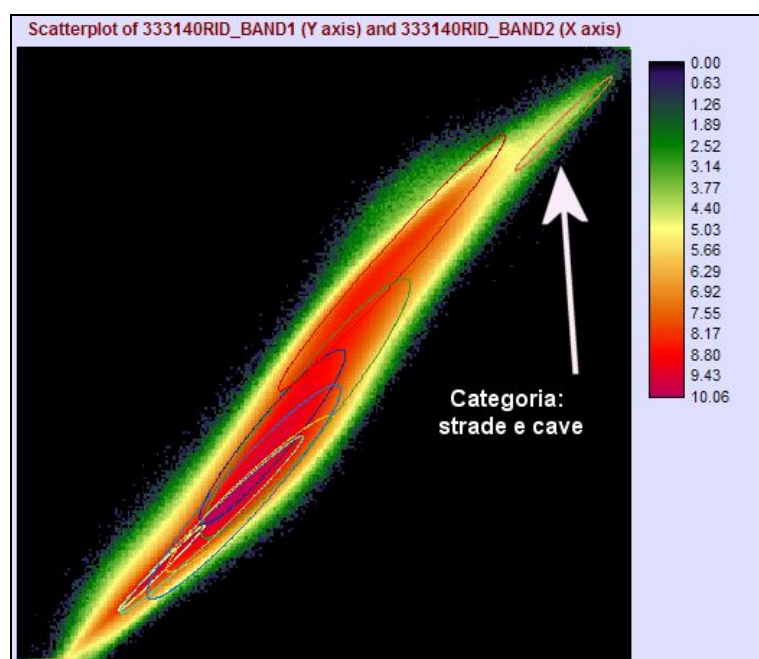


Fig. 45

Per la classificazione supervisionata sono stati utilizzati tutti i metodi implementati su IDRISI e tra tutti quello che si è avvicinato di più alla verità rappresentata dal confronto con l'ortofoto originale (fig. 46 e 47) è stato quello denominato MAXLIKE che utilizza la distribuzione del valore di riflettanza nelle aree di training site a cui fanno riferimento tutti i pixel da classificare è descritta da una funzione di probabilità della densità sviluppata in base alla statistica Bayesiana. Tuttavia come si poteva immaginare dalle considerazioni fatte sulla scarsa utilità della combinazione delle bande del visibile per la classificazione supervisionata vi sono molti errori di attribuzione soprattutto tra le categorie di bosco e formazioni minori e prati verdi.



Fig. 46

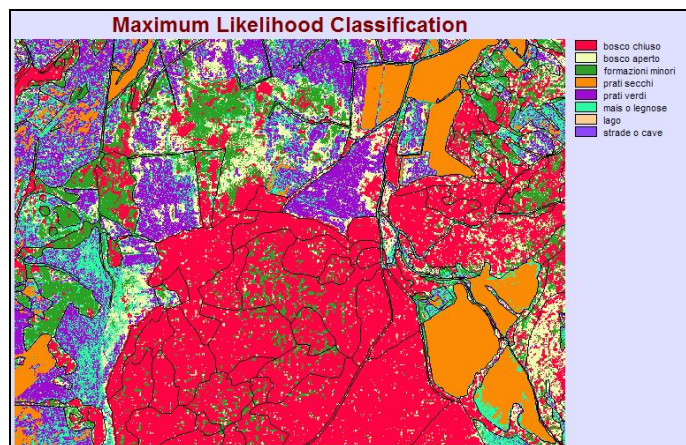


Fig. 47

L'attuale tendenza nel campo della classificazione con sistemi automatici è quella di abbandonare le classificazioni pixel per pixel (pixel oriented) perché i margini di errore, soprattutto a grandi scale, sono troppo elevati. Basti considerare che in uno stesso bosco vi sono continue alternanze tra aree più chiuse ed aree aperte con tutta una serie di passaggi intermedi e che i giochi delle luci e delle ombre sulle singole chiome hanno un peso significativo per alterare il valore della riflettanza di un pixel appartenente alla stessa tipologia di bosco. Più interessante è la determinazione della firma spettrale delle singole specie ai fini di ottenere la composizione specifica di un bosco. Si tende quindi ad inserire nel processo di classificazione criteri che attengono alla variazione del valore della riflettanza all'interno dei poligoni-training site o della deviazione standard o criteri geometrici dei poligoni stessi quali per esempio la forma, ecc.

Negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche di classificazione object oriented, che a differenza di quelli pixel oriented, permettono di ottenere un prodotto finale di tipo vettoriale dove i poligoni, generati attraverso un processo automatico di segmentazione delle immagini, possono essere classificati con algoritmi di tipo supervised o unsupervised oppure per fotointerpretazione manuale. A differenza dei classici algoritmi pixel oriented che classificano separatamente ciascun pixel dell'immagine, i vantaggi dell'approccio object oriented risiedono nel maggior contenuto informativo associabile ai poligoni vettoriali rispetto a quello derivabile per i singoli pixel dell'immagine. Infatti, mentre nella maggior parte dei metodi di classificazione pixel oriented le uniche informazioni disponibili per tutti i pixel sono quelle spettrali, ai poligoni sono associabile anche informazioni riguardanti la loro posizione, geometria e forma, i valori spettrali dei pixel contenuti e la loro distribuzione nel poligono.

Un ulteriore vantaggio offerto dall'approccio object oriented è la possibilità di oggettivizzare il processo di delineazione dei poligoni (segmentazione automatica), facilmente replicabile e estremamente più veloce della digitalizzazione manuale.

L'applicazione della classificazione object orientata alle ortofoto non produrrebbe gli effetti desiderati poiché, come si è visto le tre bande sono fortemente correlate e quindi producono informazione ridondante rispetto alla necessità di discriminazione delle categorie. Il processo che si utilizza nella classificazione object orientata è, infatti, quello dell'aggregazione dei pixel dell'immagine multispettrale originaria in una serie di passaggi successivi (segmentazione) fino a quando i poligoni creati non hanno caratteristiche corrispondenti a quelle volute. La procedura tende alla minimizzazione dell'eterogeneità spettrale di ciascun poligono, calcolata sulla base dei valori di riflettanza dei pixel inclusi, e successivamente dell'eterogeneità geometrica, dipendente dalla forma dei poligoni creati. L'eterogeneità spettrale di ciascun poligono generato con il processo di segmentazione è calcolata quale somma pesata delle deviazioni standard dei valori di riflettanza di ciascuna banda spettrale rilevati su ciascuno dei pixel inclusi nel poligono.

Dato che lo scopo che ci è prefissi è quello di ottenere lo strato bosco/no-bosco ai fini dell'analisi della frammentazione delle formazioni arboree all'interno delle aree protette oggetto di studio, si è cercato di sperimentare un processo di classificazione in automatico a partire dalle ortofoto in modo da ridurre notevolmente i tempi e i criteri soggettivi della digitalizzazione manuale e nel contempo di usare una procedura standard riutilizzabile per studi simili. Tale procedura contempla una serie di passaggi motivati e documentati ed un'analisi finale statistica dei risultati. In essa vengono presi in considerazione sia i risultati di un tipo di classificazione automatica pixel orientata sia criteri di riconoscimento e classificazione della tessitura delle varie tipologie d'uso e copertura del suolo, sia infine criteri geometrici quali la forma dei poligoni ottenuti e superfici minime cartografabili.

La prima operazione ha riguardato la trasformazione in grid della singola ortofoto e successiva riclassificazione della stessa. Questa è l'operazione più delicata perché precede tutta una serie di correzioni per limitare l'inadeguatezza delle ortofoto a colori per separare chiaramente il bosco dal resto con processi automatici (Unsupervised Classification) e semiautomatici (Supervised Classification), per le ragioni viste in precedenza. Si è trattato, infatti, di dividere i 255 valori dei pixel per ciascuna banda in classi discrete e sulla base di esse decidere come accorparle per la definitiva suddivisione in due classi.

Sulla base di esperienze effettuate in anni di fotointerpretazione si è deciso di suddividere l'istogramma di distribuzione dei valori dei pixel in tre classi utilizzando il metodo del "Natural Breaks". Questo metodo, chiamato anche metodo ottimizzazione di Jenks è piuttosto complesso, ma fondamentalmente minimizza la somma della variazione all'interno di ognuno delle classi. In pratica con esso il GIS individua dei punti di discontinuità nella distribuzione interpretandoli come confine tra gruppi di pixel con simile risposta spettrale (vedi fig. 48).

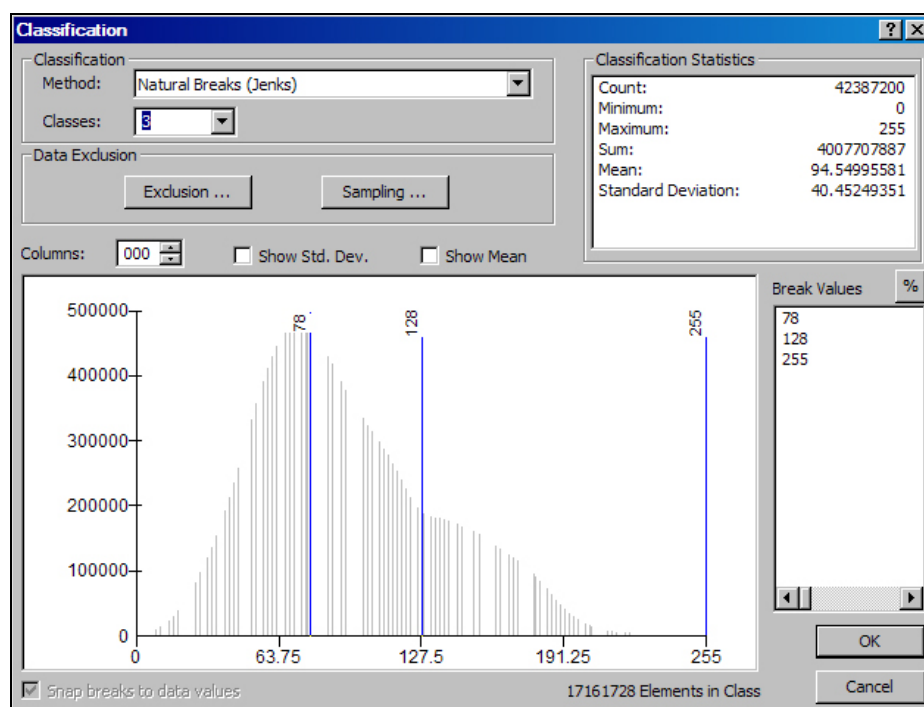


Fig. 48

L'immagine che si ottiene risulta divisa appunto in due categorie. La prima, quella del gruppo di pixel a valore più basso (inferiore a 78), comprende quasi tutti i pixel attribuibili al bosco ed è su questa che si è lavorato per includere i pixel appartenenti al bosco erroneamente non compresi ma d'altra parte per escludere i pixel di altre categorie. In definitiva si è trattato di fare una classificazione in automatico (Unsupervised Classification) che ha "brutalmente" diviso i valori dei pixel pervenendo ad una sorta di strato-raster bosco/no-bosco molto "sporco". Le operazioni successive, quindi, sono state effettuate per "pulire" questo strato. La prima di esse è consistita nel chiudere tutti i gap formati da piccoli gruppi di pixel della categoria no-bosco inclusi nella categoria bosco. Si tratta nella quasi totalità di piccole aree tra gli alberi dove si vede il sottobosco erbaceo e secco illuminato la cui riflessione si discosta notevolmente dalla matrice bosco ma che devono essere incluse nella categoria bosco.

Con un forte ingrandimento dell'immagine si è visto che la maggior parte di loro è costituita da pochi pixel pur essendoci numerosi casi di gap di maggior dimensione. Per eliminarli ed accorparli al bosco si è applicata una finestra filtro di maggioranza con dimensione 10x10 pixel-metri (dato che la risoluzione è di 1 m), concettualmente con questa funzione per ogni pixel si calcola il valore dei pixel circostanti nell'intorno di un quadrato 10x10 e si modifica il suo valore sulla base del valore della maggioranza dei pixel circostanti (fig. 49, 50 e 51).

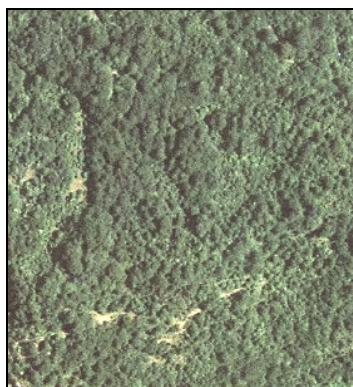


Fig. 49

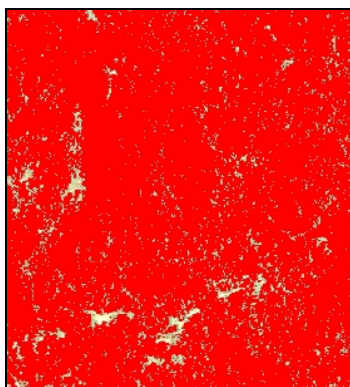


Fig. 50



Fig. 51

Come si è detto, la grossa difficoltà dei sistemi di classificazione automatica delle ortofoto è rappresentata dalla sovrapposizione delle categorie di copertura di tipo arboreo e di tipo erbaceo. Lo strato bosco-grezzo creato, infatti, pur comprendendo la quasi totalità dei boschi comprende anche sia le chiome degli alberi isolati, sia le legnose arboree quali olivi e filari di viti siepi, sia le formazioni minori quali cespuglieti, arbusteti, canneti ecc., sia, infine, le formazioni erbacee verdi, cioè tutte quelle tipologie di coltivazioni erbacee o di prati stabili che a causa del suolo umido o dell'irrigazione presentano tonalità scure confondibili con quelle dei boschi (vedi fig. 52 e 53).



Fig. 52

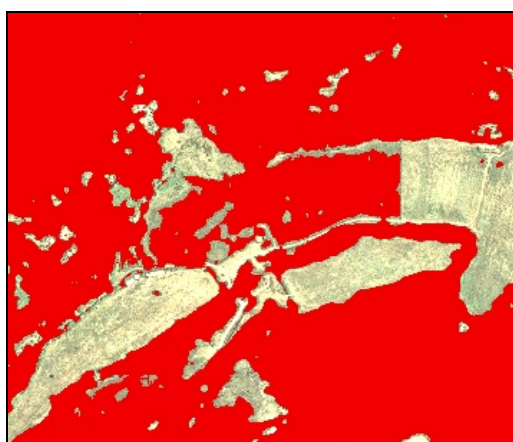


Fig. 53

Già con il filtro di maggioranza applicato sono state eliminate la maggior parte delle chiome di alberi isolati, e quasi tutte le legnose agrarie, solo, infatti, le chiome con ampiezza superiore ai 10 m di diametro medio sono state rilasciate seppur ridimensionate. Le altre andranno eliminate come si vedrà con le successive operazioni finali di pulizia con soglia di dimensione minima. Per quanto riguarda invece le tipologie di formazioni minori (roveti, arbusteti, robinieti, ecc.) e di coltivazioni agrarie verdi, ci si è affidati al criterio della loro tessitura fine in confronto a quella più o meno grossolana ed irregolare dei boschi. Le chiome degli alberi, soprattutto nei boschi con età vicina alla

maturità, formano un gioco di luci ed ombre che contrasta anche con le numerose piccole aperture viste sopra, tutto ciò fornisce all'insieme della canopy una struttura tipica facilmente riconoscibile. E' questa caratteristica tessiturale, assieme ovviamente al tono, che aiuta il fotointerprete a discriminare le tipologie delle formazioni arboree su schermo. Tuttavia se il bosco è giovane, come per esempio un ceduo di castagno nella fase di novelleto, esso ha una tessitura molto più fine, anche se attualmente l'obbligo di rilascio di un certo numero di matricine ad ha al momento del taglio (purché esse siano relativamente dense e di uno o due turni) riduce l'uniformità dei toni ed interrompe la regolarità della struttura.

Un metodo per estrinsecare l'informazione sulla tessitura è quello di calcolare la variabilità dei valori dei pixel rispetto ad un intorno. Si è pertanto applicata una finestra di filtro di ampiezza 20x20m per ricampionare il valore di ogni pixel sulla base della deviazione standard (SD) di tutti i 399 pixel circostanti costituenti la finestra di calcolo. L'ampiezza della finestra è stata scelta sia tenendo in considerazione la superficie minima sufficiente a rappresentare il tipo di tessitura sia con metodo reiterativo per prova ed errore cioè facendo delle prove con finestre di varia ampiezza finché non si è ottenuto un giusto compromesso fra la discriminazione delle superfici a prato e la perdita di informazione della superficie a bosco dovuta alla sottrazione di quelle aree di bosco a tessitura più uniforme.

In particolare una finestra ampia porta a ridurre il valore di variabilità dell'intorno di ciascun pixel ed a escludere una fascia di larga la metà dell'ampiezza della finestra attorno alle aree a tessitura omogenea (soprattutto se confinanti con aree a tessitura molto grossolana) pur riuscendo a contenere gli errori dovuti alla confusione tra settori di bosco con tessitura omogenea e formazioni erbacee verdi.

Al contrario, una finestra piccola determina una eccessiva frammentazione delle classi di omogeneità soprattutto all'interno del bosco.

Per evidenziare le differenze e, sulla base dei risultati ottenuti, motivare la decisione circa la dimensione della finestra-filtro da adottare, è stata fatta un'analisi statistica per tre dimensioni della finestra: 10x10, 20x20 e 30x30 m. Con la creazione di due poligoni sono state circoscritte due aree: una all'interno del bosco con superficie di circa 10 ha ed una di poco più di un ettaro all'interno di un prato verde. Questi due poligoni sono stati utilizzati per il ritaglio dei grid DS relativi alle tre dimensioni della finestra filtro. Di ciascun ritaglio (e quindi per ciascuna finestra-filtro adottata) e per ciascuna tipologia (prato-bosco) si sono ricavati gli istogrammi della distribuzione della frequenza in termini di numero di pixel dei valori SD divisi in 50 classi di uguale intervallo.

Come si può notare dalle tre figure sottostanti (fig. 54, 55, 56) l'aumento della dimensione della finestra porta ad un restringimento del campo di variazione dei valori ma quel che più conta è

l'aumento della deviazione standard dei valori il che fa pensare, come era da aspettarsi, che applicando una finestra filtro piccola si ha una maggior rappresentanza dei pixel a basso valore DS e quindi aumentano le aree con maggior omogeneità. Questo riduce da una parte il potere discriminante che ha l'immagine ottenuta con finestra 10x10 rispetto alle altre nel distinguere aree a tessitura fine dal resto, dall'altra, come si vedrà, porta alla frammentazione eccessiva delle suddette aree includendovi molte piccole aree all'interno del bosco. Si può notare inoltre come le differenze maggiori si hanno con il passaggio dalla finestra 10x10 a quella 20x20, perciò, dato che con l'aumentare delle finestre si ha una riduzione totale delle aree a tessitura fine senza migliorare molto il potere discriminante, si può concludere che la finestra 20x20 è quella che riduce gli effetti negativi della frammentazione senza ridurre troppo le aree a tessitura omogenea.

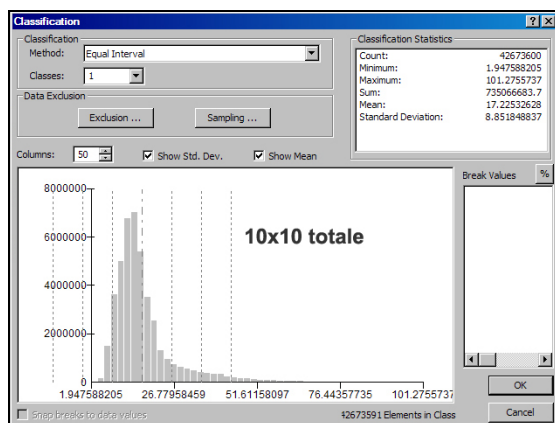


Fig. 54

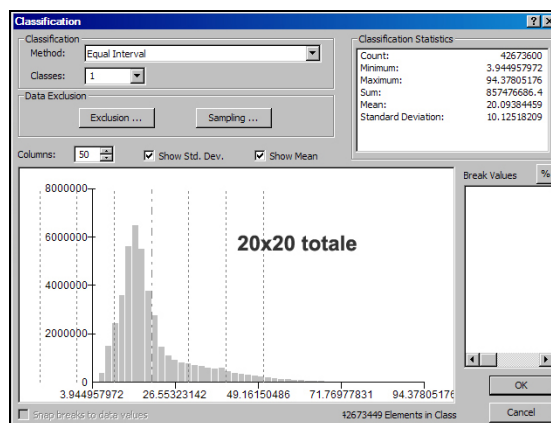


Fig. 55

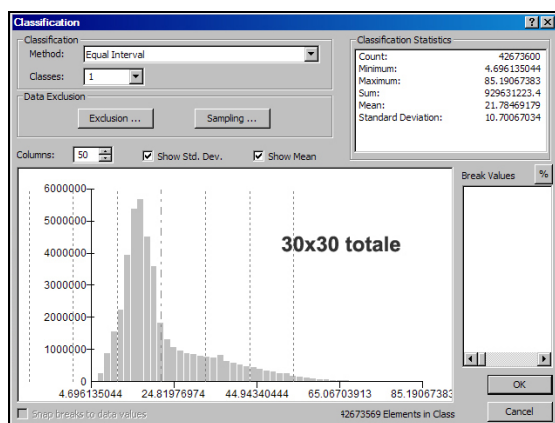


Fig. 56

Un conforto a quanto detto viene dall'analisi degli istogrammi di frequenza relativi alle due tipologie bosco-prato verde per ciascun tipo di finestra. Per la tipologia "bosco", come si può vedere dai grafici della distribuzione in 50 classi e con sovrapposizione degli intervalli di confidenza della deviazione standard (fig. 57, 58, 59), nella finestra 10x10 il 95% dei valori cade

nell'intervallo 7,3-22,6, nella finestra 20x20 tra 10,8 e 21,9 e in quella 30x30 tra 11,8 e 21,4, si ha quindi un restringimento della distribuzione con l'aumento della finestra ed anche qui le differenze significative si hanno nel passaggio dalla finestra 10x10 a quella 20x20.

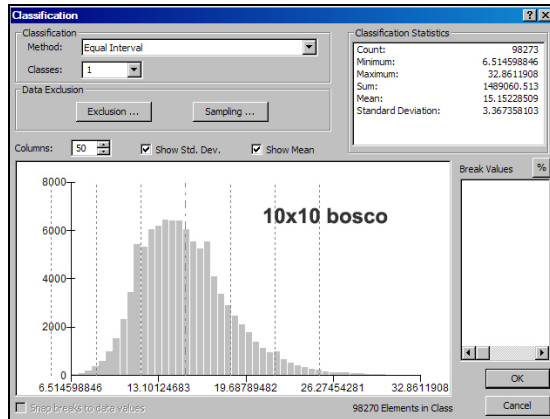


Fig. 57

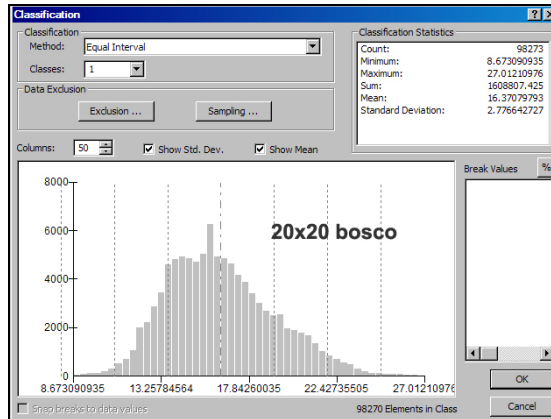


Fig. 58

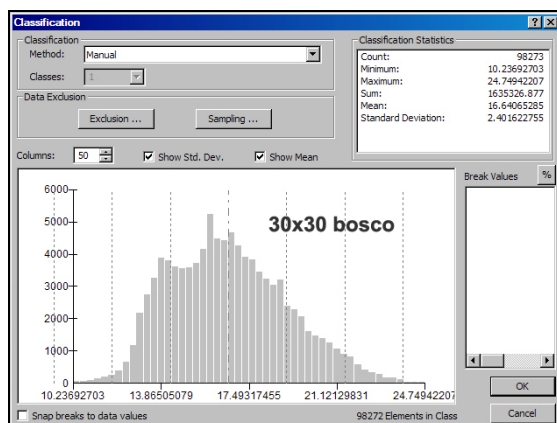


Fig. 59

Se questo dato si confronta con quello ottenuto dagli istogrammi delle aree a prato verde (fig. 60, 61, 62) si può vedere come le distribuzioni di frequenza occupano spazi di confidenza nettamente distinti da quelli dei boschi per ciascuna delle tre dimensioni della finestra-filtro ma che passando dalla finestra 10x10 a quelle successive il campo di confidenza del 95% sia molto più ristretto, permettendo quindi di poter distinguere nettamente le due tipologie di tessitura, come si può vedere dal quarto grafico (fig. 63) che mostra la distribuzione di frequenza dei valori di deviazione standard relativi alla finestra 20x20 dell'unione dei due grid prato e bosco.

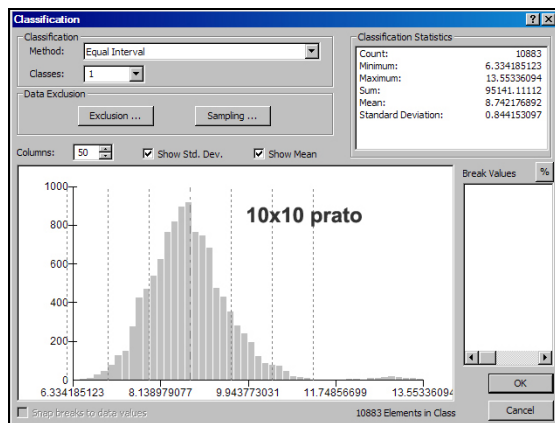


Fig. 60

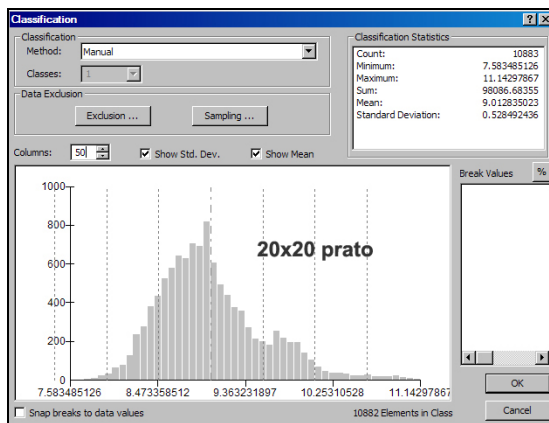


Fig. 61

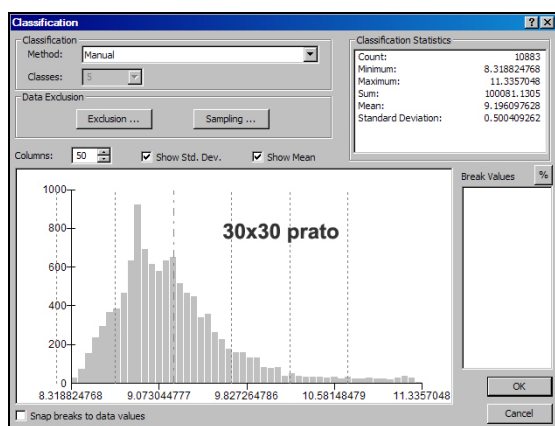


Fig. 62

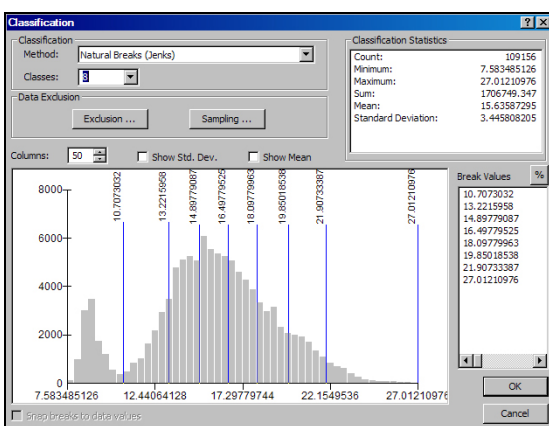


Fig. 63

Una volta fatta la scelta della finestra-filtro 20x20, sulla base delle indicazioni ottenute dalle analisi statistiche, si è trattato poi di riclassificare l'immagine ottenuta per dividerla in due sole categorie di SD e quindi di grado tessiturale. La scelta del limite del valore di SD, confortata anche dalle indicazioni qualitative avute dal confronto degli istogrammi bosco e prato verde, è stata effettuata anche qui con metodo reiterativo per prova ed errore sulla base dei suggerimenti richiesti al GIS applicando la suddivisione dell'istogramma delle frequenze dei valori di SD in classi col metodo di Jenks (Natural Breaks). Il valore di compromesso tra la necessità di esclusione delle aree a prato e quella di non togliere le aree di bosco con struttura più omogenea è quello di 10,7 SD.

Come si può vedere dalla figura 64, con questo valore si evidenziano bene i prati verdi, tuttavia il ricampionamento effettuato pixel per pixel ha necessariamente comportato la esclusione dalla classe con valori sotto la soglia di 10,7 SD delle fasce circostanti le aree a tessitura più fine che dovranno perciò essere reincluse.

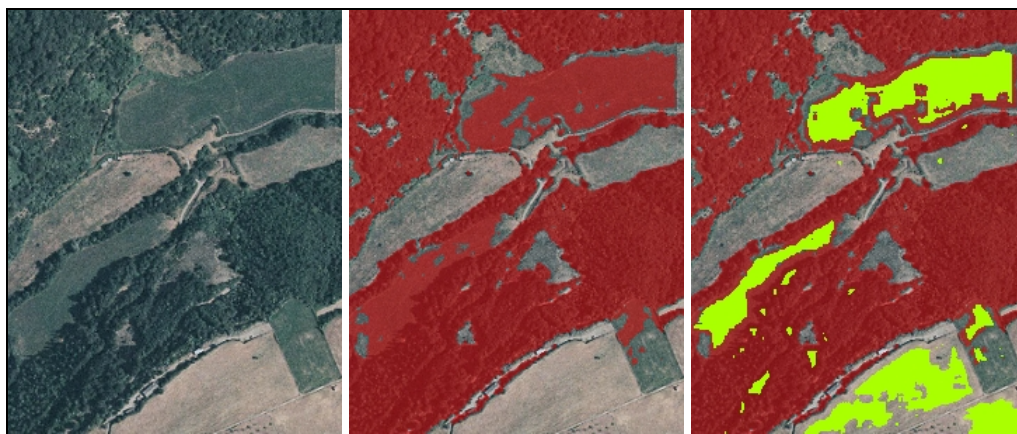


Fig. 64

Un altro problema è rappresentato dalla inclusione nella classe $SD < 10,7$ delle aree in ombra all'interno ed ai margini del bosco a causa della loro evidente omogeneità. Per escludere queste aree si è utilizzata l'elevata presenza all'interno di esse di pixel con tonalità scure. Si è ricampionato perciò il raster originale utilizzando un break più basso (50), tale cioè da includere le aree in ombra ma di escludere i prati verdi e dopo aver applicato un filtro di maggioranza 10×10 per ridurre la frammentazione in piccoli gruppi di pixel; si è riclassificato il raster con valore 0 per i pixel sotto la soglia di 40 ed 1 per tutto il resto e si è, infine, moltiplicato per il raster $SD < 10,7$.

Il risultato è stato successivamente trasformato in formato vettoriale generalizzando le linee per evitare la squadrettatura, poi, dopo aver eliminato i micropoligoni con soglia di 50 m^2 per riaggregazione, ed una volta eliminata la classe con valore superiore alla soglia si è creato un buffer esterno alla classe residua di estensione di 10 m pari alla metà della finestra-filtro SD.

Ritrasformato quest'ultimo strato da vettoriale a raster e riclassificato con valore 0 per le aree $SD < 10,7$ ed 1 per tutto il resto si è utilizzata la funzione Raster Calculator per moltiplicare il raster bosco/no-bosco grezzo con quello $SD < 10,7$ con seguente ritrasformazione in formato vettoriale ottenendo il risultato di eliminare tutte le aree con tessitura fine. L'ultima serie di operazioni ha riguardato la "pulitura" dello strato bosco e cioè 1) la "ricucitura" di tutte le aree racchiuse all'interno dei poligoni-bosco con superficie inferiore a $0,3 \text{ ha}$ per accorpamento alla classe bosco; 2) l'eliminazione di tutti i poligoni con superficie inferiore a $0,3 \text{ ha}$; 3) la eliminazione di tutte le formazioni lineari. Con le operazioni precedenti, infatti, non è stato possibile eliminare le formazioni lineari e cioè quelle formazioni arboree con larghezza media inferiore ai 10m, sia perché accorpate ai poligoni bosco come delle appendici, sia perché, pur isolate, sono superiori a $0,3 \text{ ha}$.

L'eliminazione delle formazioni lineari è necessaria per una corretta applicazione degli indici di frammentazione. Quest'ultima operazione ha comportato la creazione di un buffer interno di ampiezza pari a 6 m allo strato vettoriale bosco. Così facendo si sono eliminate e frammentate tutte le formazioni lineari. Ripulendo di nuovo, eliminando le superfici inferiori a $0,3 \text{ ha}$ e riapplicando il

buffer di 6m, questa volta esterno, per recuperare le fasce di contorno tolte con l'operazione precedente, si è infine ottenuto lo strato-bosco definitivo.

Riassumendo, le principali fasi sono state 8 (fig. 65):

- 1- conversione dell'ortofoto in raster;
- 2- riclassificazione dell'ortofoto originale in due categorie;
- 3- applicazione del filtro di maggioranza 10x10;
- 4- applicazione del filtro di deviazione standard $SD < 10,7$;
- 5- eliminazione delle aree in ombra nel raster $SD < 10,7$;
- 6- applicazione del buffer esterno di 10m al raster $SD < 10,7$;
- 7- moltiplicazione dei due raster per eliminare le aree in sovrapposizione;
- 8- pulitura ed eliminazione delle aree con forma molto allungata (larghezza $< 10m$).

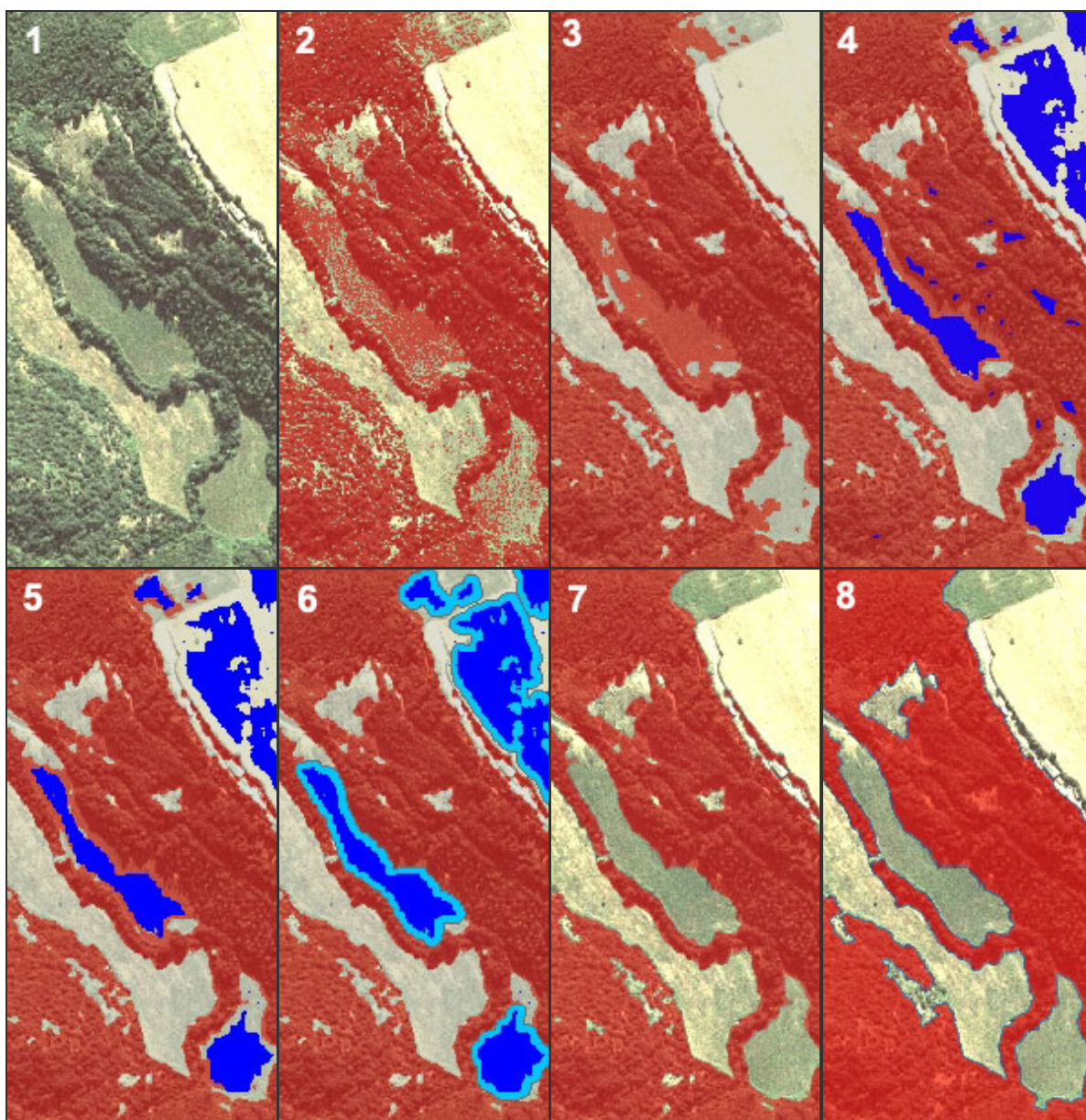


Fig. 65

Ad un primo confronto con l'ortofoto rimangono escluse erroneamente dallo strato bosco alcune piccole aree (comunque superiori a 0,3 ha) di bosco a tessitura più omogenea (fig. 66), mentre sono incluse erroneamente alcune fasce di orlo di boschi con pendenza elevata e in esposizione parallela alla proiezione della linea di illuminazione del sole nel momento di scatto della ortofoto (fig. 67).

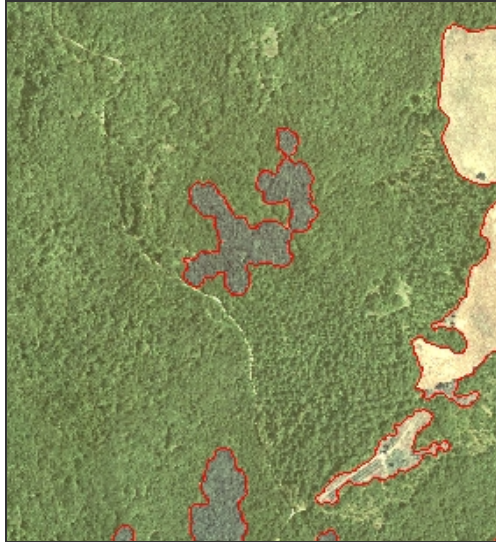


Fig. 66



Fig. 67

Tutte queste operazioni sono state assemblate in ambito GIS costruendo un modello (fig. 68) che permette di attivare una procedura in automatico una volta inseriti i nomi dei layer di partenza e quello finale.

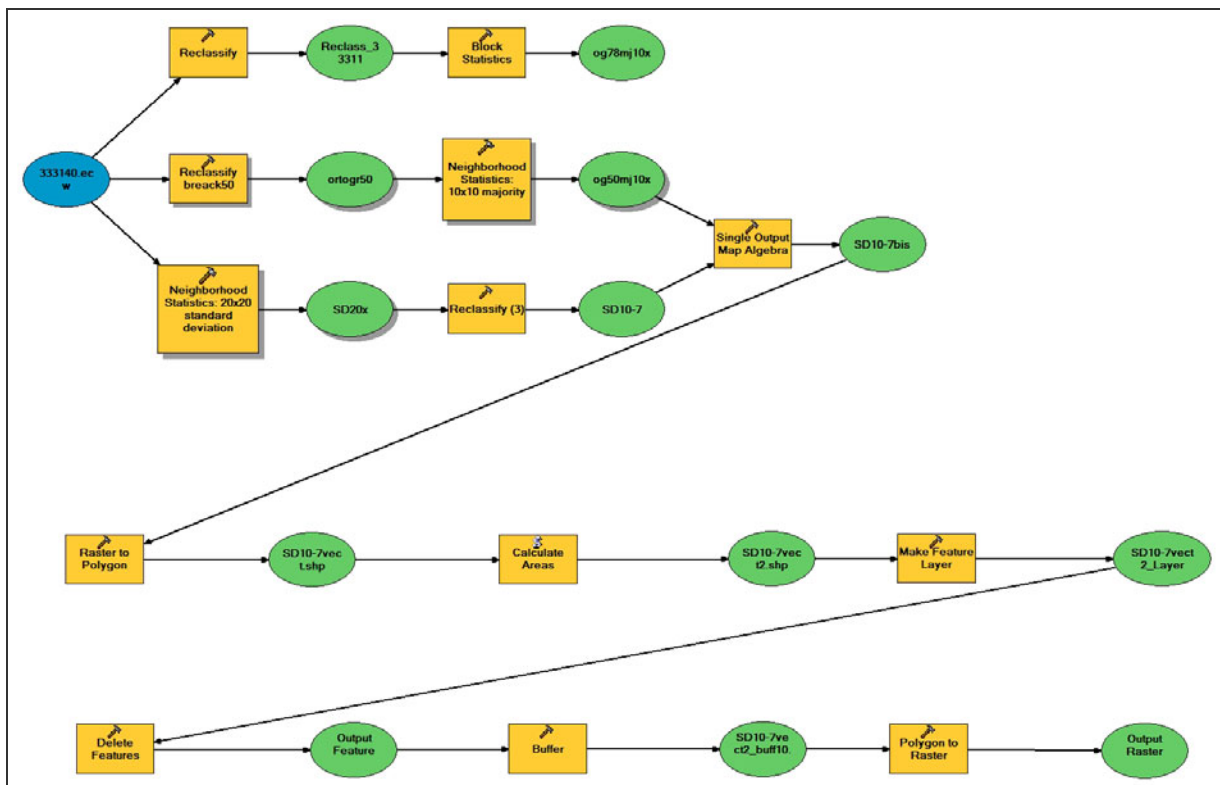


Fig. 68

Valutazione dell'accuratezza tematica

Nel contesto di indagini di una certa importanza, le classificazioni di immagini telerilevate e la realizzazione di prodotti cartografici devono essere accompagnate dalla definizione della loro accuratezza tematica. A tal fine è possibile utilizzare specifici test per stabilire il grado di affidabilità dei risultati ottenuti. Si tratta di verificare, attraverso controlli in campo, la quantità relativa degli elementi correttamente attribuiti alle classi tematiche di appartenenza. La suddetta verifica avviene in genere su un campione di punti opportunamente estratto.

Ciascun punto campione consiste in una porzione di territorio di superficie inferiore all'unità minima cartografabile. Il valore da dare al poligono che include questi punti viene desunto dalla fotointerpretazione a video della stessa immagine (se la classificazione è stata automatica) o immagini a più alta definizione. Quest'ultimo caso si verifica quando si è eseguita la fotointerpretazione su immagini a media risoluzione e si dispone per lo stesso territorio di indagine di ortofoto ad alta definizione. Se necessario si ricorre a sopralluoghi.

L'accuratezza tematica di una classificazione va intesa come concordanza tra essa e la verità a terra. Lo strumento fondamentale per valutare questa concordanza è rappresentato dalla matrice di classificazione degli errori. Questa matrice è costituita in forma di tabella a doppia entrata in cui è riportato il numero di punti campione attribuiti a una determinata classe tematica: convenzionalmente, le righe si riferiscono alla classificazione tematica dei punti, mentre le colonne si riferiscono alla verità a terra (vedi tabella seguente).

		<u>Verità a terra</u>		
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
<u>Rappresentazione e cartografica</u>	Tipo 1	n_1	n_2	n_3
	Tipo 2	n_4	n_5	n_6
	Tipo 3	n_7	n_8	n_9

La verifica dell'accuratezza tematica è stata effettuata sulla base della carta d'uso del suolo ricavata dalla fotointerpretazione delle ortofoto, verificata e corretta a seguito dei sopralluoghi fatti attraverso i procedimenti descritti nei paragrafi precedenti. Per prima cosa si è prodotta una griglia a maglie regolari di 20 m di passo. Successivamente si sono costruiti i centroidi dei quadrati costituenti la griglia e con un'operazione di overlay topologico punti – confine dell'area ZPS sono stati estrapolati solo i punti rientranti nei confini. Essi sono 10376 e costituiscono l'insieme dei

punti di verifica. La scelta della distanza ortogonale di 20 m è stato un giusto compromesso tra un eccessivo infittimento dei punti per distanze minori, che avrebbero comportato tempi lunghi e difficoltà di gestione dei dati e un numero statisticamente poco significativo nel caso di distanze maggiori.

La sovrapposizione dei punti campione sulla base dell'uso del suolo ha portato alla stratificazione degli stessi sulla base della tipologia intersecata. Dai grafici e tabelle riportati (fig 69-72) risulta che l'81,5% dello strato bosco-no bosco ottenuto in automatico rientra nella categoria aree boscate ma se si includono in questa categoria anche le formazioni ripariali e quelle lineari tale percentuale sale all'85% ed includendo anche le formazioni minori si arriva al 95%.

Delle restanti categorie le sole ad avere un certo peso nell'errata attribuzione sono quelle delle aree agricole (2,6%) e delle formazioni erbacee (1,4%) perché punti che sono ricaduti nelle aree urbane sono solo 5 (tutti nell'area di pertinenza di una casa colonica ma c'è da dire che l'area in esame è poco antropizzata) e quelli rientrati nelle strade sono attribuibili ad un errore dovuto al ricampionamento della funzione filtro di maggioranza che ha comportato l'inclusione dei pixel delle strade che attraversano boschi o che sono adiacenti ad un bosco da un lato ed ad una fascia boscata dall'altro. I punti erroneamente attribuiti ai prati o pascoli permanenti sono tutti da imputare ad una effettiva incapacità del sistema utilizzato a discernere i prati verdi con macchie di cespugli e quindi a tessitura simile alle formazioni minori ed ai mosaici di bosco rado e prato-pascolo.

I punti ricaduti nelle aree agricole rappresentano la categoria più elevata di errore (270 punti, 2,6%) c'è da dire che per quasi la metà si tratta di punti confinanti aree arboreo-arbustive non nettamente e bruscamente separate (fasce di 5-10 m di vegetazione in ricolonizzazione) attribuiti erroneamente per la diversa valutazione di inclusione degli orli e per un quinto di aree a legnose agrarie in stato di abbandono o comunque a copertura elevata (oliveti densi).

Applicate queste tare la percentuale di errore di attribuzione delle formazioni arboreo-arbustive nel loro complesso alle altre aree si abbassa a poco meno dell'1%, il che significa che il metodo utilizzato riesce a discriminare le aree boscate e quelle assimilabili a bosco (sensu L.R. Lazio 39 del 2002) per il 99% dei casi.

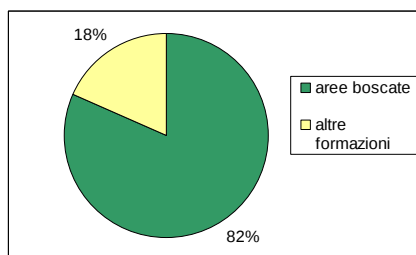


Fig. 69

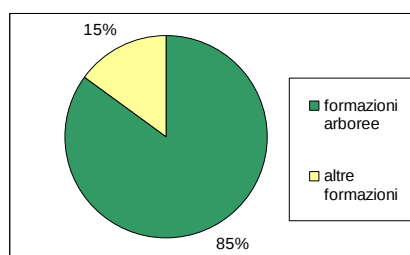


Fig. 70

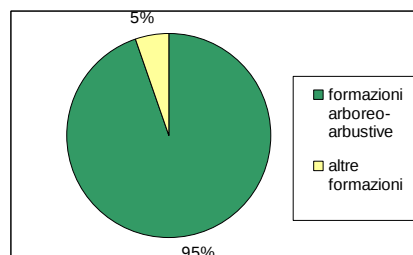


Fig. 71

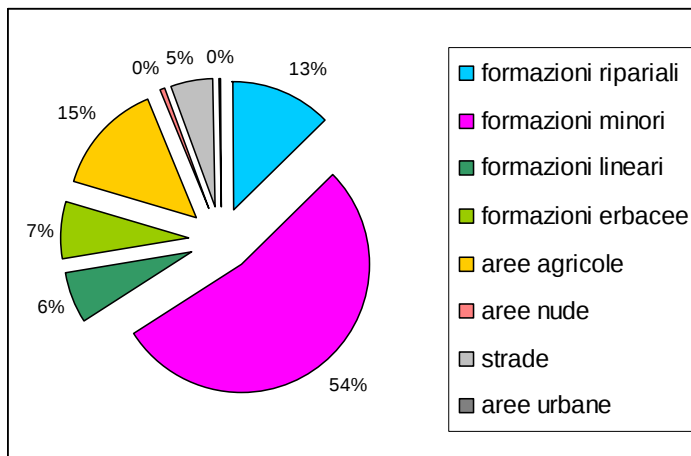


Fig. 72

BIBLIOGRAFIA

- Amadio G., 1999. *La derivazione del DB_25 da database e cartografia numerica tecnica regionale: problematiche ed esperienze*. Atti III Conferenza ASITA, Napoli. Vol. 1, pp. LVII-LXII.
- Ambrosini I., Buffoni A., Gherardi L., Viti M.L., 1994. *Valutazione del contenuto informativo a fini forestali di riprese aeree bianco/nero realizzate ad uso topografico*. L'Italia Forestale e Montana, n° 3: pp 241-254.
- Amadesi E., 1975. *Fotointerpretazione e aerofotogrammetria*. Pitagora Editrice, Bologna.
- Amministrazione Provinciale di Viterbo, Assessorato Ambiente, 2000. *Studio Ecologico del Sistema Lago di Mezzano-Fosso Olpeta*.
- Annoni A, Bocci M., Zine E., 1998. *Il censimento del territorio e il progetto CLC*. Ipertesto su "Tecnologie per lo studio del territorio: Il telerilevamento aereo e da satellite e SIT" pubblicato da AIT (Associazione Italiana Telerilevamento) e CEO (Centre of Earth Observation) JRC Ispra.
- Aronoff S., 1989. *Geographic Information Systems, a management perspective*. WDL Publications, Ottawa.
- Arsenio G, Coticchia A, Donatelli D, Maseroli R, Pierozzi M., 2002. *Il nuovo metodo dell'IGM per il passaggio fra sistemi di riferimento ed il software Verto1*. Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA. Perugia, 5-8 Novembre 2002, vol. 1: 189-194.
- Baiocchi V., Crespi M.G., Del Lorenzo C., 2002. *Trasformazioni di datum e di coordinate per scopi cartografici: analisi delle prestazioni di alcuni software*. Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA – Perugia, 5-8 Novembre 2002, vol. 1: 261-265.
- Barbarella M., Mancini F., Zanni M., 2003. *Immagini ad alta risoluzione e DEM*. Atti VII Conferenza ASITA, Verona, vol. I, pp. 203-208.
- Behrens T., 2005. *Texture Analys and Neighbourhood Statistics*. <http://arcsripts.esri.com/details.asp?dbid=12646>.
- Bernstein R., 1983. *Image geometry and rectification*. In R. N. Colwell (Ed.), *Manual of remote sensing*. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Biallo G., 2002. *Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici*. MondoGIS, Roma.
- Bianchin A., Martinucci D., 2003. *Generalizzazione cartografica: stato dell'arte*. Atti VII conferenza Nazionale ASITA, Verona, Vol. 1, pp. 327-332.
- Bianchin A., 2001. *Nuovi approcci alla validazione dei DB cartografici*. Atti della V conferenza nazionale ASITA, Rimini, 9-12 Ottobre 2001, Vol. I, V-XVI.

- Bologna S., Chirici G., Travaglini D., 2005. *Geomatica forestale: definizioni ed esempi applicativi*. Atti IX Conferenza ASITA, Catania, Vol I, pp. 395-400.
- Brivio P.A., Lechi G.M., Zilioli E., 1992. *Il telerilevamento da aereo e da satellite*. Franco Angeli Ed., Milano P.A.
- Brivio P.A., Zani G.. *Glossario trilingue di telerilevamento*. A.I.T.
- Bologna S., Chirici G., Travaglini D., 2005. *Geomatica forestale: definizioni ed esempi applicativi*. Atti IX Conferenza ASITA, Catania, Vol. I, pp. 395-400.
- Cambursano C., 1997. *Cartografia numerica*. Progetto Leonardo, Bologna.
- Campbell J.B., 1996. *Introduction to Remote Sensing*. 2nd ed. The Guildford Press, New York.
- Capanni G., Comparini A., Flamini F., 2004. *L'integrazione fra GIS e fotogrammetria digitale: esperienze e prospettive future*. Atti VIII Conferenza Nazionale ASITA.
- Capra A., Costantino D., Todaro S., 2003. *La georeferenziazione delle immagini cartografiche e telerilevate*. Atti VII Conferenza ASITA, Verona, vol. I, pp. 597-602.
- Carmel, Yohay & Kadmon, Ronen, 1998. *Computerized classification of Mediterranean vegetation using panchromatic aerial photographs*. Journal of Vegetation Science 9: 445-454 Uppsala, Sweden.
- Carosio A., Nocera R., 2001. *Norme tecniche internazionali per l'informazione geografica. Il ruolo dell'Europa*. Atti della V conferenza nazionale ASITA, Rimini, 9-12 Ottobre 2001, Vol. I, 393-398.
- Casazza I., Cirilli C., Maier M., 1980. *Sistemi informativi per il territorio: modelli semantici e basi di dati*. In Informatica per il Territorio, Quaderni IBM.
- Castleman K.R., 1979. *Digital Image Processing*. Prentice Halls.
- Chirici G., Corona P., 2005. *Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali*. Regione Lazio, Progetto 2002/38: "Integrazione di sistemi geografici informativi e dati telerilevati ad alta e altissima risoluzione per il monitoraggio e la ecocertificazione della gestione forestale nel Lazio".
- Cliffs E., Van Zuidam R.A., Van Z.C. *Terrain analysis and classification using aerial photographs*, ITC Text Book, Vol. VII Enschede N.L..
- Colwell R.N., 1960. *Manual of photographic interpretation*. American Society of Photogrammetry, Washington.
- Corona P., 2000. *Introduzione al rilevamento campionario delle risorse forestali*. Editrice CUSL, Firenze.

- Corona P., Ambrosini L., 1995. *Inventari forestali in Italia*. L'Italia Forestale e Montana, 2: 198-214.
- Corona P., Ferrara A., 1999. *Orientamenti tecnici innovativi nell'inventariazione e monitoraggio dei sistemi forestali*. In: Ciancio O. (a cura di), *Le nuove frontiere della gestione forestale*, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, pp. 217-242.
- Corona P., Marchetti M., Filesi L., 1999. *Mappatura in scala 1:10.000 di tipi forestale in Abruzzo*. Documenti del Territorio, 42: 31-34.
- Corona P., Tabacchi G., 2001. *Inventariazione delle risorse forestali su ampi territori. Finalità, metodi e prospettive*. Monti e Boschi, 6: 27-38.
- Corona P., Macri A., Marchetti M., 2004. *Boschi e foreste in Italia secondo le più recenti fonti informative*. L'Italia Forestale e Montana, 2: 119-136.
- Cullotta S., La Mela Veca D.S., Maccari F., Cibella R., Marchetti M.. *Metodi semplificati di spazializzazione di dati campionari: un'applicazione ai dati di prima fase dell'INFC in Sicilia*. Atti 5° Congresso SISEF: foreste e società - cambiamenti, conflitti, sinergie.
- Cutolo N., Fattori C., Rinaldo S., Salomone F., 2005. *Realizzazione della carta di copertura del suolo in aree protette del Lazio*. Atti IX Conferenza ASITA, Catania, vol. 1, pp. 835-841.
- De Natale F., Gasparini P., 2003. *Manuale di fotointerpretazione per la classificazione delle unità di campionamento di prima fase*. Documento preparato dall'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura per il Ministero per le Politiche Agricole e Forestali, Direzione Generale per le Risorse Forestali, Montane e Idriche; Corpo Forestale dello Stato.
- Del Gaudio A., 1990. *Topografia*. Edagricole, Bologna.
- Eastman J.R., 2006. *IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, Clark University, USA.
- Empler T., Bianconi F., Bagagli R., 2006. *La rappresentazione del paesaggio*. Tipografia del Genio Civile, Roma.
- Farina A., 2001. *Ecologia del paesaggio*. UTET, Torino.
- Favretto, 2000. *Nuovi strumenti per l'analisi geografica*. I G.I.S.. Bologna, Patron Editor.
- Franco V., Lo Brutto M., 2004. *Elementi di Geodesia*. Dispense. Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Ingegneria.
- Gomasasca M., 1999. *Il telerilevamento ed i sistemi informativi geografici*.
- Gomasasca M., 2004. *Elementi di geomática*. Associazione Italiana di Telerilevamento, Milano.

- Gomasasca M., 2005. *La Geomatica*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 32: 99–116.
- Grimaldi, R. (a cura di), 1988. *La cartografia e i sistemi informativi per il governo del territorio*. Franco Angeli Ed., Milano.
- Lamonaca A., Corona P., Portoghesi L., 2005. *Analisi strutturale multilivello in un bosco vetusto di faggio*. Comunicazione al V° Congresso SISEF "Foreste e società: cambiamenti, conflitti, sinergie". Grugliasco (LO), 27-30 settembre 2005.
- Leone A., Ripa M.N., Petroselli A., 2002. *Contenuti e percorsi della pianificazione sostenibile del territorio rurale*, Rivista di Ingegneria Agraria, 1:1-7.
- Leone A., 2004. *Ambiente e Territorio Agroforestale, Linee guida per la pianificazione sostenibile e gli studi di impatto ambientale*. Franco Angeli Editore.
- Mantovani F., Marcolongo B.. *Fotogeologia, il telerilevamento nelle scienze della terra*. NIS.
- Marchetti M., 2002. *Metodologie per una cartografia di uso del suolo multilivello e multiscala: analisi e sperimentazione applicative*. Documenti del Territorio, 49: 33-51.
- Migliaccio F., 2002. *Qualità dei dati e metadati all'interno di un GIS*. Atti della VI conferenza nazionale ASITA, Perugia, 5/8 Novembre 2002, Vol. II, 1551-1556.
- Minami M., 2006. *Using ArcMap™ by ESRI*.
- Morigi S., 2005. *Il sistema grafico: overview Hardware e Software*.
- Olmi M., Zapparoli M., 1992. *L'Ambiente della Tuscia Laziale*, Union Printing Ed.
- Palagiano C., 1969. *La Morfologia del Lago di Mezzano*, Bollettino della Società Geografica Italiana, pp. 10-18.
- Pelorosso R. e Boccia L., 2007. *Land cover and land use change in the italian central apennines: comparison among assessment methods*. Submitted to Applied Geography.
- Preto G., 1984. *Inventario forestale della Toscana. Manuale di fotointerpretazione*. Regione Toscana, Giunta Regionale, Firenze.
- Poletti A., 2001. *GIS metodi e strumenti per un nuovo governo della città e del territorio*. Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna.
- Procaccini P., D'Alessandro C., Zanella L., Passanisi V., 2001. *Il sistema informativo territoriale come funzione di governo verso l'attuazione dell'interoperabilità dei dati geografici*. Regione Lazio, Direzione Territorio e Urbanistica, Sistema Cartografico e Geografico.
- Provincia di Viterbo, EMAS Assessorato Ambiente, 2000. *Prima relazione sullo stato dell'ambiente nella Provincia di Viterbo*.

- Provincia di Milano. *Studio sull'integrazione di basi cartografiche numeriche diverse per provenienza e scala in un'unica architettura di sistema informativo territoriale*. Sistemi Territoriali S.R.L. – www.sister.it.
- Regione Lazio, Assessorato Ambiente, Dipartimento Territorio, 2003. *La rete natura 2000 nel Lazio. Caratterizzazione dei Siti di Interesse Comunitaria e delle Zone di Protezione Speciale per l'attuazione della sottomisura I.1.2. "Tutela e gestione degli ecosistemi naturali"* – DOCUP Obiettivo 2 (2000-06), 24 gennaio 2003.
- Regione Lazio, 2003. *La rete Natura 2000*. Atti del Workshop "DOCUP Ob 2 Lazio 2000-2006 Asse I Misura 1.1, Valorizzazione del patrimonio ambientale regionale. Sottomisura 1.1.2 . Tutela e gestione degli ecosistemi naturali, Roma.
- Ripa M. N., Boccia L., Leone A., Recanatesi F., 2005. *Valutazione dei fenomeni di frammentazione del paesaggio nella pianificazione territoriale*, VIII Convegno Nazionale di Ingegneria Agraria: "L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania 27-30 giugno 2005.
- Robinson A.H., Morrison J.L., Muehrcke P.C., Kimerling A.J., Guphill S.G., 1995. *Elements of cartography*. Sixth Edition, John Wiley and Sons.
- Rocchini D., Di Rita A., 2005. *Relief effects on aerial photos geometric correction*. Applied Geography, 25, 159–168.
- Romano C., 2004. *Il contributo metodologico dei GIS 2D/3D nei processi di pianificazione territoriale*. Atti VIII Conferenza Nazionale ASITA.
- Scoppola A., Caporali C., 1996. *I boschi caducifogli mesofili con faggio della provincia di Viterbo: aggiornamento sulla distribuzione*. Ann. Acc. Ital. Sc. For., 45: 167-188.
- Selvini A., Guazzetti F., 1999. *Cartografia generale - tematica e numerica*, Capitolo 15. UTET,
- Wulder M.A., Withe J.C., Niemann K.O., Nelson T., 2004. *Comparison of airborne and satellite high spatial resolution data for the identification of individual trees with local maxima filtering*. International Journal of Remote Sensing, 25: 2225-2232.
- Tosi V., Marchetti M., 1998. *I sistemi informativi forestali in Italia: uniformità e divergenze negli inventari delle risorse naturali*. L'Italia Forestale e Montana, 5: 220-252.
- Travaglini D., 2004. *Trasformazioni tra sistemi di coordinate: software disponibili, limiti e potenzialità*. Forest@ 1 (2): 128-134. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Vianello G., 1998. *Cartografia e fotointerpretazione*. CLUEB.
- Zilioli E.. *Appunti e spunti di Telerilevamento*. TELEA.