



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

**XVIII CICLO DEL
DOTTORATO DI RICERCA IN**

GEOSTORIA E GEOECONOMIA DELLE REGIONI DI CONFINE

**REMOTE SENSING E TECNICHE DI
CLASSIFICAZIONE PER L'ANALISI DEL LAND
COVER: L'AREA TRANSFRONTALIERA DI
GORIZIA – NOVA GORICA**

Settore scientifico-disciplinare M-GGR/01

DOTTORANDO

DOTT. MARCO MASTRONUNZIO¹⁷⁶

CS

COORDINATORE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI

**CHIAR.MO PROF. GIANFRANCO BATTISTI -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

TUTORE

**CHIAR.MO PROF. GIANFRANCO BATTISTI -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

RELATORE

**CHIAR.MO PROF. ANDREA FAVRETTO -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

CORRELATORE

**CHIAR.MO PROF. GIANFRANCO BATTISTI -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

**XVIII CICLO DEL
DOTTORATO DI RICERCA IN**

GEOSTORIA E GEOECONOMIA DELLE REGIONI DI CONFINE

**REMOTE SENSING E TECNICHE DI
CLASSIFICAZIONE PER L'ANALISI DEL LAND
COVER: L'AREA TRANSFRONTALIERA DI
GORIZIA – NOVA GORICA**

Settore scientifico-disciplinare M-GGR/01

DOTTORANDO

DOTT. MARCO MASTRONUNZIO

COORDINATORE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI

**CHIAR.MO PROF. GIANFRANCO BATTISTI -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

FIRMA

TUTORE

**CHIAR.MO PROF. GIANFRANCO BATTISTI -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

FIRMA

RELATORE

**CHIAR.MO PROF. ANDREA FAVRETTO -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

FIRMA

CORRELATORE

**CHIAR.MO PROF. GIANFRANCO BATTISTI -
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

FIRMA

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno sostenuto ed aiutato nella realizzazione e nel compimento di questo percorso di studi.

In particolare il Prof. Battisti, sempre largo di consigli preziosi ed utili nei momenti più critici, che rispolverano quotidianamente la passione per la geografia.

Naturalmente il Prof. Favretto, che mi ha sostenuto “vivacemente” (sic) nel corso di questo lavoro e che mi ha portato a scoprire il telerilevamento.

Rita e Gino che mi sono stati vicini sempre e che – tra i pochi – mi hanno aiutato e compreso nei momenti più difficili.

Ringrazio inoltre l'amico-professore Giovanni per gli imprescindibili consigli in merito ai problemi statistici, per le repentine intuizioni e per le “accese” discussioni di telerilevamento e quant'altro..

Infine ringrazio la mia Sandra, per aver sopportato me e tutti i miei “no, ora non posso”. A lei un grazie particolare..

SOMMARIO

INTRODUZIONE.

I PARTE

ASPETTI TEORICI

1. FONDAMENTI DI TELERILEVAMENTO IN AMBIENTE GIS.
 - 1.1 Elementi fisici di Telerilevamento.
 - 1.2 Analisi spaziali caratteristiche di un GIS (*Geographical Information System*).
 - 1.2.1 *Criteri di classificazione dei dati.*
2. CARATTERISTICHE DEL SATELLITE LANDSAT E DEI SUOI SENSORI.
 - 2.1 Caratteristiche generali dei vettori per il Telerilevamento.
 - 2.2 Il vettore Landsat e i suoi sensori MSS, TM e ETM+.
3. PROCEDURE ESPLORATIVE APPLICATE ALLE IMMAGINI SATELLITARI.
 - 3.1 Un primo approccio: l'interpretazione visiva.
 - 3.1.1 *Visualizzazione delle immagini satellitari.*
 - 3.1.2 *Istogramma delle frequenze assolute.*
 - 3.1.3 *Profili spettrali.*
 - 3.1.4 *Pattern.*
 - 3.1.5 *Tessitura.*
 - 3.1.6 *Dimensioni e forma.*
 - 3.1.7 *Scala spaziale.*

3.2 Pre-elaborazione delle immagini telerilevate.

3.2.1 *Correzione geometrica.*

3.2.1.1 *Metodo polinomiale.*

3.2.1.2 *Metodo di ortorettificazione.*

3.2.2 *Correzione atmosferica.*

4. LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI PER L'ANALISI DEL *LAND COVER*.

4.1 Classificazione *unsupervised*.

4.1.1 *Classificatore K-means o delle medie mobili.*

4.1.2 *Classificatore ISODATA.*

4.2 Classificazione *supervised*.

4.2.1 *Classificatore Maximum Likelihood.*

4.2.2 *Classificatore Minimum distance to mean.*

4.3 *Accuracy assessment* di una classificazione.

4.4 Analisi di controllo delle differenze (*Change Detection*).

4.4.1 *Tecniche di change detection.*

4.4.1.1 *Pre-classification comparison.*

4.4.1.2 *Post-classification comparison.*

4.4.2 *Caratteristiche delle immagini satellitari utilizzate per la change detection.*

II PARTE

IL CASO APPLICATIVO: L'AREA TRANSFRONTALIERA DI GORIZIA – NOVA GORICA

5. AREA DI STUDIO.

5.1 La regione transfrontaliera di Gorizia–Nova Gorica–Šempeter-Vrtojba.

5.1.1 *L'ambiente geografico generale.*

5.1.2 *Il confine politico italo-sloveno.*

5.2 Fonte dei dati.

5.2.1 *Cartografia CORINE Land Cover.*

6. PRE-ELABORAZIONE DEI DATI TELERILEVATI: GEOREFERENZIAZIONE, ORTORETTIFICAZIONE E CORREZIONE ATMOSFERICA.

6.1 Trattamenti preliminari: *subset* spaziale e georeferenziazione polinomiale.

6.2 Ortorettificazione.

6.3 Correzione atmosferica.

7. ELABORAZIONE DEI DATI TELERILEVATI: CLASSIFICAZIONE AUTOMATICA DELLE IMMAGINI SATELLITARI ED *ACCURACY* *ASSESSMENT*.

7.1 Metodologia della classificazione per pixel *unsupervised*.

7.2 Risultati della classificazione per pixel *unsupervised* delle immagini Landsat 5 TM.

7.3 Metodologia della classificazione per pixel *supervised*.

7.4 Risultati della classificazione per pixel *supervised* delle immagini Landsat 5 TM.

7.5 Validazione della classificazione supervised delle immagini Landsat 5
TM.

7.5.1 *Risultati dell'accuracy assessment.*

8. ANALISI DI CONTROLLO DELLE DIFFERENZE: *CHANGE DETECTION*
(1992 – 2003).

8.1 *Cross-tabulation.*

8.1.1 *Risultati della cross-tabulation.*

8.2 Discussione dei risultati.

CONCLUSIONI.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUZIONE.

Il *remote sensing* [percezione remota] o *telerilevamento* rimanda direttamente a quell'insieme di tecniche e metodologie per l'acquisizione di informazioni sulla superficie terrestre realizzate da una posizione – ed una postazione – remota: il contatto diretto con il territorio oggetto di analisi è assente.

Un GIS (*Geographical Information System*) è invece sinteticamente descritto come un sistema contenente dati georeferenziabili che possono essere analizzati e trasformati in informazioni per una determinata applicazione. Un GIS si distingue per la sua capacità nell'effettuare analisi spaziali di dati eterogenei per formato e fonte, tramite procedure di analisi proprie del GIS stesso ed anche attraverso procedure di tipo statistico.

Tra le analisi spaziali caratteristiche di un GIS – attraverso le quali è possibile produrre l'informazione geografica – un ruolo fondamentale è rappresentato dalla *classificazione*, procedimento attraverso il quale determinate entità geografiche vengono raggruppate in un insieme di classi omogenee al loro interno e, contestualmente, eterogenee verso l'esterno. Scopo fondamentale di ogni classificazione è la produzione di cartografia tematica delle superfici investigate. Per realizzare tale cartografia tematica è necessario ordinare il territorio in classi discrete corrispondenti a tipizzazioni omogenee del dato reale al suolo, ossia della *copertura del suolo* (*land cover*).

Attraverso l'utilizzo integrato delle tecnologie di telerilevamento implementate in ambiente GIS, è stato possibile operare un'analisi dettagliata retrospettiva ed al tempo stesso evolutiva dei cambiamenti intervenuti nella copertura del suolo nella regione transfrontaliera oggetto di studio; siffatta analisi è avvenuta in un'ottica diacronica (1992-2003).

Il periodo temporale considerato si inserisce utilmente in un intervallo intercensuario, quello tra il IV (1990) e il V (2000) Censimento Generale dell'Agricoltura della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia. Il rapporto tra

analisi della copertura del suolo tramite telerilevamento e i dati censuari è dunque biunivoco: il Censimento può essere utilizzato per una validazione finale delle analisi derivate dal telerilevamento effettuate nel presente studio, laddove queste possono essere utilizzate per un'aggiornamento del Censimento.

Ad integrazione di tali analisi sono stati applicati ed utilizzati indicatori statistici abitualmente utilizzati nel campo dell'ecologia ed impiegati nell'analisi del paesaggio.

Le diverse tipologie di copertura del suolo si inseriscono nelle peculiarità e nelle differenziazioni riscontrabili sul terreno, oggetto di studi della geografia regionale.

L'applicazione di tecniche quantitative non verte sul problema squisitamente geografico dei rapporti tra uomo e natura, ma solo sui modi con cui un dato tipo di società organizza gli elementi materiali della sua civiltà sul territorio (DEMATTEIS, 1970). In particolare la regione e i vari insiemi territoriali della geografia, se in teoria sono semplici "sezioni del mondo reale delimitate arbitrariamente" (HAGGETT, 1965), in pratica esistono perchè sono il risultato concreto dell'interazione società-territorio e sono pertanto le unità operative su cui deve basarsi l'organizzazione del territorio (DEMATTEIS, 1970).

Il territorio dell'area di studio è stato dunque – attraverso la redazione di cartografia tematica di copertura del suolo – oggetto di *classificazione tassonomica*.

La tassonomia è – come noto – parte delle discipline che si occupa della sistemazione degli elementi della conoscenza, sinteticamente, lo studio della conoscenza. In senso lato ha assunto il significato di insieme di procedimenti logici tendente a classificare gli oggetti attraverso i quali si sviluppa l'indagine scientifica. In senso stretto – per quanto concerne l'analisi geografica – la classificazione ha potuto connettersi all'impiego di procedure quantitative che, se compiute all'interno di principi classificatori, costituiscono la c.d. *tassonomia numerica* (*numerical taxonomy*).

Un'espressione qualificata della geografia regionale diventa dunque quella di classificare le aree ovvero identificare classi spaziali (VALLEGA, 1976). Questo avviene seguendo due itinerari: quello disaggregativo e aggregativo. In altri termini la scomposizione del territorio in spazi o, rispettivamente, il raggruppamento di unità spaziali elementari in spazi più ampi.

Le procedure di disaggregazione constano di tre fasi: ordinamento delle informazioni, misura delle connessioni (o di somiglianza) e scomposizione. Le procedure di aggregazione, invece, sostituiscono alla fase di scomposizione quella del raggruppamento, ferme restando le prime due fasi (VALLEGA, 1982).

Scopo della prima fase è giungere ad una matrice di informazioni da cui avviare le procedure tendenti ad accertare – questa la seconda fase - quali livelli di somiglianza si delineino tra le unità tassonomiche. Tale fase necessita dell'analisi statistica frequentemente utilizzata in geografia quantitativa.

Successivamente – utilizzando le stime conseguite nella fase delle misure di connessione – si procederà alla scomposizione o al raggruppamento.

Il parallelismo della classificazione delle immagini satellitari con la tassonomia tipica della geografia quantitativa è dunque d'obbligo.

Individuare sul dato telerilevato un'area campione di una specifica tipologia di copertura del suolo è procedura tassonomica disaggregativa se implementata per tante aree campione quante sono le classi di copertura individuate.

D'altro canto l'utilizzo di algoritmi classificatori rimanda direttamente alle tipiche analisi statistiche della geografia quantitativa, attraverso le quali è possibile determinare i livelli di somiglianza tra le aree campione, cioè tra le unità tassonomiche. Segue, infine, la procedura aggregativa: le aree campione individuate sull'immagine telerilevata vengono raggruppate in base a caratteristiche comuni – i livelli di somiglianza di cui sopra – attraverso l'utilizzo degli algoritmi classificatori.

Classificare il territorio tramite l'utilizzo del telerilevamento e metodologie GIS significa utilizzare procedure tassonomiche disaggregative ed aggregative al tempo stesso, inserendosi nel campo di studi della geografia regionale.

I PARTE

ASPETTI TEORICI

1. FONDAMENTI DI TELERILEVAMENTO IN AMBIENTE GIS.

Il telerilevamento (*remote sensing*)¹ ovvero l'osservazione della terra dallo spazio è la metodologia atta ad ottenere informazioni inerenti un oggetto, attraverso l'analisi di dati acquisiti da uno strumento (nel caso specifico, un sensore montato su un vettore) che non è in contatto diretto con l'oggetto indagato. I sensori utilizzati registrano le diverse modalità di riflettere l'energia elettromagnetica da parte degli oggetti presenti sulla superficie terrestre. I dati così acquisiti restituiscono informazioni sugli oggetti oggetto analizzati (LILLESAND E KIEFER, 1999).

Il termine inglese *remote sensing* [percezione remota] risulta maggiormente esplicativo, in quanto rimanda direttamente a quell'insieme di tecniche e metodologie per l'acquisizione di informazioni derivanti dalla superficie terrestre da una posizione – ed una postazione – remota: il contatto diretto con il territorio oggetto di analisi è dunque assente.

1.1 Elementi fisici di Telerilevamento.

Una delle diverse forme in cui si presenta l'energia elettromagnetica è la luce². Essa può essere descritta come una forma di energia viaggiante in modo sinusoidale e armonico alla velocità della luce, sottoforma di onda elettromagnetica. Ogni onda elettromagnetica ha una frequenza definita ed una lunghezza d'onda associata a questa frequenza. Grazie a queste caratteristiche le onde possono essere ordinate in un grafico noto come *spettro elettromagnetico-EM* (Fig.1.1).

¹ Un altro termine sinonimo di telerilevamento è "*earth observation from space*" [osservazione della terra dallo spazio].

² Luce solare o fornita da radar. Nel primo caso si tratterà di sensori passivi, che registrano cioè l'energia elettromagnetica del sole o di altre fonti esterne (come il calore) riflessa dagli oggetti presenti al suolo; nel secondo caso invece, si tratterà di sensori attivi, che utilizzano cioè la loro energia (CAMPBELL, 1996).

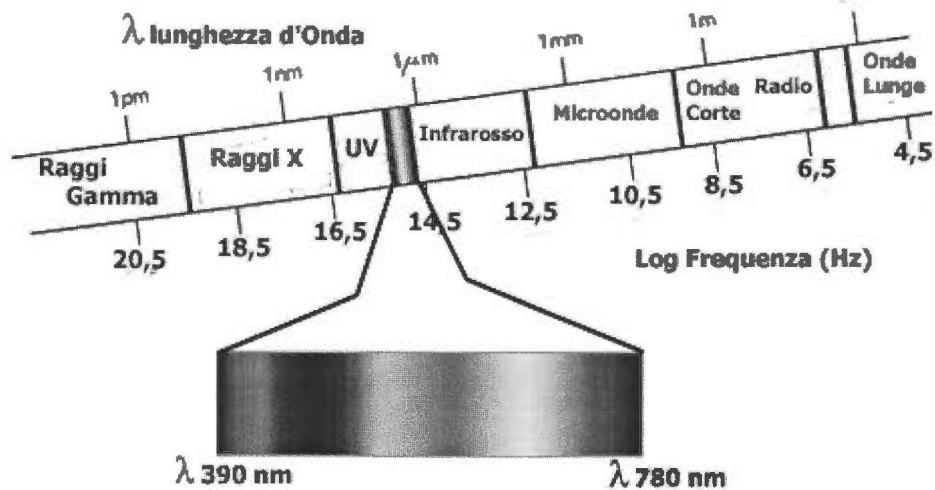


FIGURA 1.1: spettro elettromagnetico.

Lo spettro EM è stato convenzionalmente suddiviso nelle seguenti regioni:

- Raggi gamma* (<0,03 nm) e *raggi X* (0,03 –300 nm): radiazione ad onde corte con elevato “contenuto” energetico.
- Radiazione ultravioletta* (0,28-0,40 μm): questa regione viene suddivisa nel *vicino ultravioletto* (UV-A, 0,32-0,40 μm), nel *lontano infrarosso* (UV-B, 0,28-0,32 μm) e *ultravioletto estremo* (UV-C, <0,28 μm).
- La *regione visibile* occupa l'intervallo fra 0,4 e 0,7 μm. La luce visibile può essere divisa in tre segmenti, i c.d. colori primari: da 0,4 a 0,5 μm la luce riflette il colore *blu*, da 0,5 a 0,6 μm il *verde* e da 0,6 a 0,7 μm il *rosso*.
- La *regione infrarossa* (IR), compresa fra 0,7 e 100 μm, viene divisa in tre sotto-intervalli: *IR vicino* (0,7–1,3 μm), *l'IR medio* (1,3-3 μm), *IR lontano* o *IR termico* (3-100 μm).
- La regione delle *microonde* va da 0,1 a 100 cm.

- f. La regione di lunghezze d'onda maggiori oltre i 100 cm corrisponde alle *bande radio* (CAMPBELL, 1996).

Tutte le radiazioni elettromagnetiche utilizzate per il telerilevamento devono attraversare l'atmosfera³. Le particelle e i gas presenti in atmosfera possono attenuare la luce in entrata. Ciò è determinato principalmente dalla diffusione atmosferica e dall'assorbimento.

La diffusione atmosferica è una diffusione imprevedibile di radiazione attraverso le particelle atmosferiche (LILLESAND E KIEFER, 1999). Le radiazioni possono interagire con molecole atmosferiche di grandezza molto inferiore rispetto alla lunghezza d'onda della luce solare incidente. Il risultato è la diminuzione del contrasto⁴ spettrale dell'immagine telerilevata. Quando le radiazioni incontrano particelle aventi diametro uguale o maggior alla propria lunghezza d'onda, l'immagine risulta disturbata in particolare nelle bande registrate nel campo dell'infrarosso.

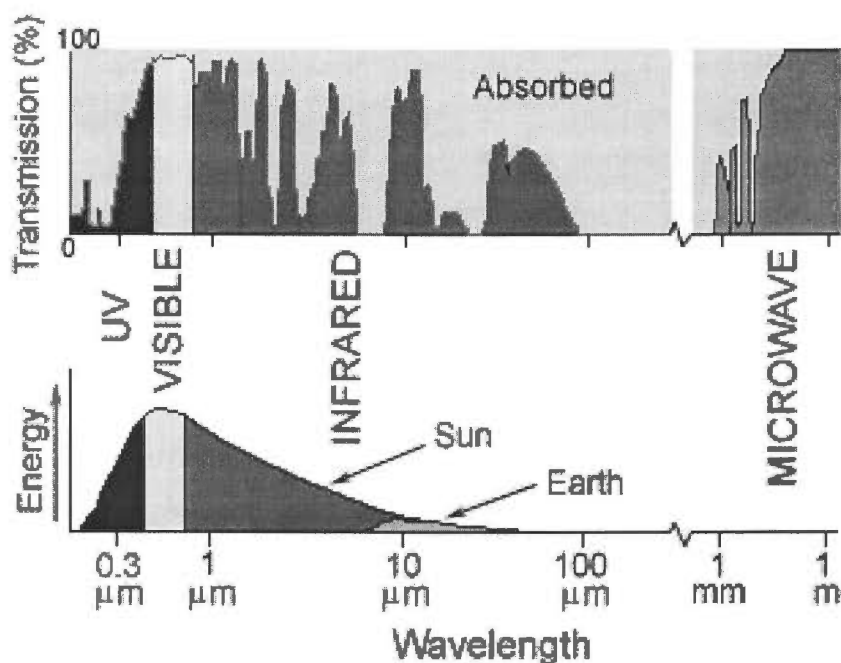


FIGURA 1.2: trasmissione e assorbimento atmosferico; sorgenti di energia luminosa (fonte: CCRS, 1998).

³ Per un'approfondimento in merito agli effetti radiometrici si veda sotto, par. 3.2.2.

⁴ Il contrasto non ha una definizione precisa. Esso può essere definito dal confronto tra le parti più chiare e quelle più scure di un'immagine. Un basso contrasto indica un'immagine molto grigia, mentre un alto contrasto rappresenta differenze molto definite tra chiaro e scuro.

L'assorbimento atmosferico (Fig.1.2) riduce in quantità maggiore l'energia delle radiazioni rispetto alla dispersione. I maggiori intrappolatori di radiazione solare sono il vapore acqueo, il biossido di carbonio e l'ozono, che possono notevolmente variare presso le aree urbane. Di conseguenza l'umidità, l'altimetria, l'urbanizzazione e i fattori antropici in genere sono variabili che influenzano l'assorbimento atmosferico ed i suoi effetti sull'immagine telerilevata.

I gas citati assorbono l'energia solare in bande di lunghezza d'onda specifiche: la radiazione solare può attraversare o non attraversare lo strato atmosferico in funzione della lunghezza d'onda. Questo parametro definisce così la relativa opacità dell'atmosfera all'onda, individuando intervalli di trasparenza c.d. *finestre atmosferiche* (Fig.1.3). In corrispondenza di queste lunghezze d'onda l'assorbimento delle radiazioni è ridotto o nullo, ossia le onde vengono disturbate solo minimamente dalla presenza dell'atmosfera. Ovviamente tutti i sensori montati su vettori satellitari sono stati calibrati per registrare immagini in corrispondenza di queste lunghezze d'onda.

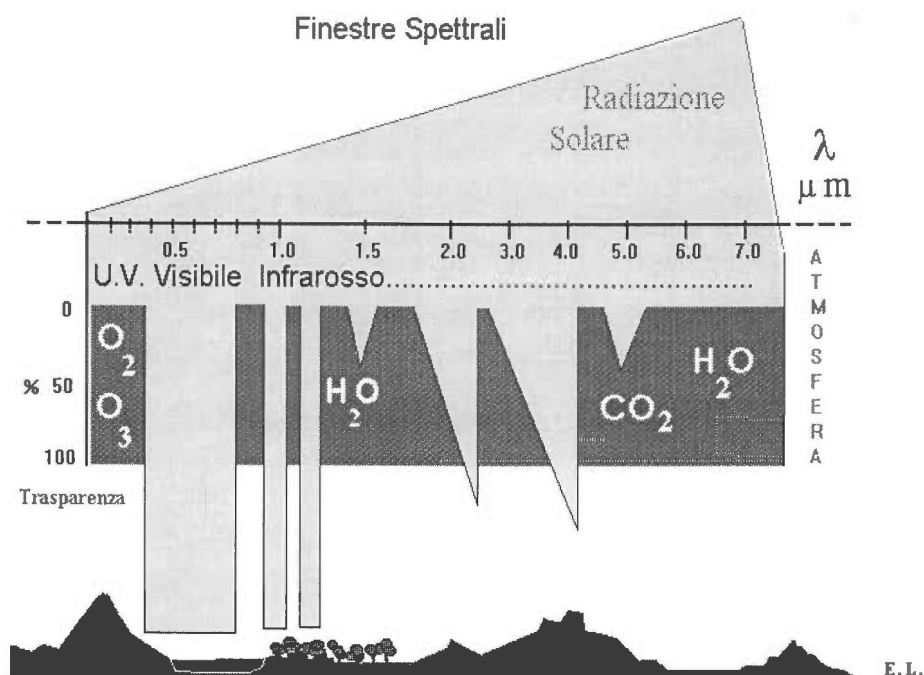


FIGURA 1.3: finestre Spettrali (fonte: CECCHI ET AL., 1994).

Quando un'onda elettromagnetica (*energia incidente totale*) colpisce un oggetto o una superficie qualsiasi sono possibili tre fondamentali interazioni:

- a. *Riflessione*: parte della radiazione è effettivamente riflessa (e diffusa) dal bersaglio a diversi angoli (in funzione sia della rugosità della superficie che dell'orientamento della radiazione solare⁵), inclusa la direzione del sensore che effettua l'osservazione;
- b. *Assorbimento*: parte della radiazione è assorbita attraverso interazioni molecolari o elettroniche con il mezzo attraversato; in seguito potrà essere parzialmente riemessa (*emittanza*), soprattutto in corrispondenza delle lunghezze d'onda maggiori, cosicché la radiazione solare contribuisce al riscaldamento dei corpi che forniscono una risposta termica;
- c. *Trasmissione*: parte della radiazione penetra in alcuni mezzi, per esempio nell'acqua.

Per il principio di conservazione dell'energia vale :

$$E_r(\lambda) = E_i(\lambda) - E_a(\lambda) - E_t(\lambda)$$

Dove: E_r = Energia riflessa (*riflettanza*)

E_i = Energia incidente totale

E_a = Energia assorbita

E_t = Energia trasmessa

(λ) = in funzione della lunghezza d'onda λ

La *riflettanza* (espressa in percentuale) misura la quantità di energia incidente che viene riflessa. Altre grandezze radiometriche importanti sono: l'*irradianza* (E), il flusso radiante incidente su una superficie unitaria; l'*intensità radiante* (I)

⁵ L'orientamento della radiazione solare va considerata rispetto alla direzione di incidenza sulla superficie colpita dall'onda elettromagnetica.

e la *radianza* (L) che si riferiscono alla radiazione secondo un certo angolo di osservazione, indicando rispettivamente il flusso radiante⁶ uscente da unità di angolo solido e il flusso radiante per unità di superficie e per unità di angolo solido, misurato su di un piano perpendicolare alla direzione considerata. La radianza è particolarmente importante perché descrive ciò che viene in realtà misurato dai sensori utilizzati per il telerilevamento.

Le proporzioni di energia riflessa, assorbita e trasmessa variano a seconda dell'oggetto delle condizioni e del tipo di materiale colpito. Questa importante proprietà della materia consente l'identificazione e la separazione di diverse sostanze o classi attraverso la loro *firma spettrale* (*curve spettrali*).

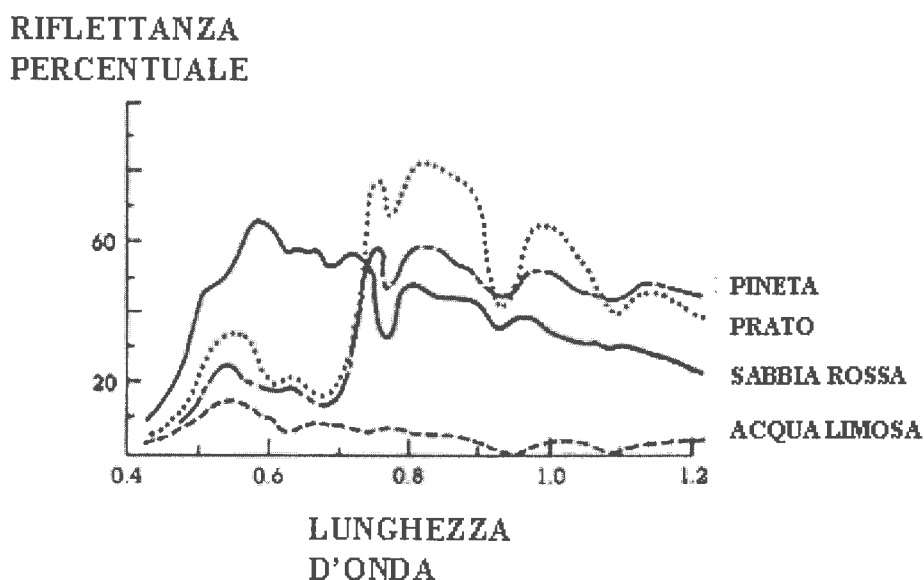


FIGURA 1.4: diagramma della riflettanza percentuale per alcuni materiali (fonte: SHORT, 1999).

Il grafico della riflettanza spettrale di un oggetto, in funzione delle lunghezze d'onda, viene denominato *firma spettrale*. La conformazione delle curve di riflettanza spettrale fornisce informazioni sulle caratteristiche spettrali di un dato oggetto. Ad esempio(Fig. 1.4) in funzione della risposta spettrale si possono distinguere numerose classi di elementi che occupano un territorio, dalla pineta al prato, dal spiaggia rossa all'acqua limosa.

⁶ La quantità di energia radiante (cioè trasportata dalle onde elettromagnetiche) trasferita da un punto o superficie ad un'altra superficie nell'unità di tempo. La radianza si misura dunque in $W m^{-2} sr^{-1}$ (Watt allo steradiano per unità di superficie) (FAVRETTO, 2006).

La scelta della regione (i) dello spettro elettromagnetico nella quale acquisire l'immagine telerilevata è fortemente influenzata dal comportamento spettrale dell'oggetto esaminato.

1.2 Analisi spaziali caratteristiche di un GIS (*Geographical Information System*).

Un GIS (*Geographical Information System*⁷) può essere considerato come un sistema di software, hardware, dati, persone, organizzazioni ed accordi istituzionali per raccogliere, registrare, analizzare e distribuire informazioni sulle aree del pianeta terra (CHRISMAN, 1997). Tale definizione di ampio respiro può essere efficacemente integrata da un'altra definizione, in cui un GIS è indicato come un sistema contenente dati georeferenzabili⁸ che possono essere analizzati e trasformati in informazioni per un determinato scopo o applicazione (ANTENUCCI ET AL., 1991).

In questa sede, allo scopo di offrire una visione esaustiva dei GIS e delle sue caratteristiche peculiari, si preferisce rimandare alla cospicua bibliografia in materia (tra gli altri, FAVRETTO, 2006, GOMARASCA, 2004). Occorre invece, in questa sede, soffermarsi sulle analisi spaziali dei dati caratteristiche di un GIS.

Un GIS si distingue per la sua capacità nell'effettuare analisi spaziali dei dati, sia dei dati attributo che dei dati spaziali. Le funzioni di analisi possono essere suddivise in due categorie: analisi numerico-statistiche su attributi numerici e analisi spaziali caratteristiche dell'ambiente GIS su dati spaziali e attributi numerici (FAVRETTO, 2006).

Nel primo caso tale funzione organizza i dati nel *database* del GIS, in modo che questi possano essere estratti (una volta immessi nel sistema), aggiornati ed elaborati tramite procedure matematico-statistiche; una volta così processati saranno pronti e disponibili per le successive analisi spaziali.

Nel secondo caso invece si può affermare che solo tramite le analisi spaziali su dati spaziali e dati attributo il GIS riesce a produrre l'informazione geografica che semanticamente è presente nel suo acronimo (FAVRETTO, 2006). I dati vengono

⁷ *Sistema Informativo Territoriale* – SIT in italiano.

⁸ Procedimento attraverso il quale un dato elemento è posizionato su una carta secondo un sistema di coordinate (FAVRETTO, 2006).

elaborati attraverso metodi di analisi propri del GIS stesso ed anche attraverso procedure di tipo statistico. Si rimanda sempre alla cospicua bibliografia in materia (FAVRETTO, 2006, GOMARASCA, 2004) per una presentazione esaustiva delle analisi spaziali, che possono essere sinteticamente distinte in: *misurazioni*; accesso ai dati del *database* (*query* e *query spaziali*); *georeferenziazione*; *classificazione*; riclassificazione (*recode*), *buffering*; sovrapposizione di strati (*overlay*), interpolazioni spaziali (TIN – *Triangular Irregular Network* e DTM – *Digital Terrain Model*).

1.2.1 Criteri di classificazione dei dati.

In particolare si intende per classificazione il procedimento attraverso il quale determinate entità geografiche vengono raggruppate in un insieme di classi aventi determinati dati attributo in comune (FAVRETTO, 2005). La classificazione è dunque un'operazione di generalizzazione del dato reale al suolo; tale generalizzazione precede le analisi spaziali e i risultati delle stesse che portano alla produzione cartografica in genere e, nel caso specifico, alla produzione di cartografia tematica da fonti satellitari.

Scopo di ogni classificazione è sostanzialmente la creazione di gruppi (*classi tematiche*) omogenei al loro interno e, al tempo stesso, eterogenei verso l'esterno (FAVRETTO, 2005). Variabili continue vengono quindi elaborate e trasformate in variabili discrete. Fondamentale – per come l'informazione è elaborata e trasmessa - è la metodologia con cui gli intervalli tra le classi vengono prodotti. I principali sistemi per generare gli intervalli tra le classi sono (BURROUGH, 1986):

- *intervalli arbitrari*: determinati indipendentemente dalla distribuzione dei dati o dalle caratteristiche delle variabili continue;
- *intervalli esogeni*: determinati conseguentemente ai parametri derivati dal soggetto studiato (non derivati dalla distribuzione di frequenza dei dati);
- *natural breaks*: gli intervalli sono ricavati dalla distribuzione di frequenza dei dati. Vengono individuati gli intervalli maggiori, quelli cioè che raccolgono la maggiore quantità di dati considerando l'intero *trend*. Tale

sistema utilizza molto spesso i grafici ad istogramma per porre in evidenza le diverse classi.

- *intervalli seriali*: determinati dopo una suddivisione matematico-statistica dei dati. Tale sistema può essere a sua volta distinto in *equal interval* (il *trend* di dati è suddiviso in una serie di intervalli della stessa dimensione; il *range* degli intervalli è determinato dal rapporto tra la variabilità del dato continuo e il numero delle classi desiderate), *deviazione standard* (la dimensione degli intervalli è determinata sulla base della deviazione standard) e, infine, il metodo dei *quantili* (gli intervalli vengono identificati ponendo in ciascuna classe lo stesso numero di dati raccolti; il numero di dati raccolti in ciascuna classe è dato dal rapporto tra il numero totale dei dati raccolti e il numero delle classi).

2. CARATTERISTICHE DEL SATELLITE LANDSAT E DEI SUOI SENSORI.

2.1 Caratteristiche generali dei vettori per il Telerilevamento.

I sensori trasportati dai satelliti artificiali (vettori) compiono periodicamente un'orbita attorno alla terra. Le condizioni di ripresa dei sensori a bordo dei vettori dipendono dunque dalle loro caratteristiche orbitali, come la distanza dalla terra, l'angolo di presa, la cadenza temporale dei sorvoli. Le orbite descritte dai vettori sono *ellittiche kepleriane*: se l'eccentricità diventa piccola si avrà un'orbita circolare con rivoluzione costante (*periodo orbitale*); i punti di intersezione dell'orbita con il piano dell'equatore terrestre sono detti *nodi*, convenzionalmente nodo *ascendente* è il punto dove il vettore attraversa il piano equatoriale dall'emisfero sud verso l'emisfero nord, quello *discendente* invece dall'emisfero nord a quello sud. L'angolo fra il piano dell'orbita e il piano dell'equatore viene detto *inclinazione* dell'orbita (MATHER, 2003). L'inclinazione definisce anche l'estensione territoriale oggetto della ripresa: infatti, ad esempio, un vettore la cui orbita è inclinata di 60° può sorvolare esclusivamente una fascia compresa tra i 60° di latitudine nord e i 60° di latitudine sud.

Un'orbita viene detta *geostazionaria* quando la sua inclinazione è 0° ; viene detta *quasi polare* se l'inclinazione è prossima ai 90° .

L'orbita geostazionaria viene compiuta dal vettore ad un'altezza elevata (anche 36.000 Km s.l.m.), alla latitudine 0° (equatore), alla stessa velocità della rotazione terrestre, in modo da sembrare fermo rispetto alla superficie terrestre (è il caso dei satelliti meteorologici e per le telecomunicazioni).

L'orbita quasi polare è invece compiuta ad altezza nettamente inferiore (fra i 500 e i 1000 Km s.l.m.); il vettore viaggia da un polo all'altro con un'inclinazione ed un periodo orbitale tale da permettergli di passare alla stessa ora locale sopra l'equatore durante ogni orbita; questo determina il passaggio del vettore sopra ogni parte del globo terracqueo alla stessa ora locale. Mentre il vettore viaggia da

un polo all'altro, la Terra ruota attorno al suo asse da ovest ad est, permettendo al sensore di registrare una diversa porzione di superficie terrestre ad ogni orbita compiuta.

2.2 Il vettore Landsat e i suoi sensori MSS, TM e ETM+.

Le immagini satellitari utilizzate nel corso del presente lavoro di tesi si riferiscono al satellite (vettore) Landsat 5 e al sensore TM (*Thematic Mapper*) a bordo dello stesso. Le immagini satellitari Landsat 5 TM rientrano in quella fascia di dati telerilevati definiti a *medio-alta risoluzione* spaziale. Qui di seguito è riportata una breve descrizione della storia, delle caratteristiche tecniche del vettore e del sensore, così come pure degli altri vettori e sensori del programma Landsat.

Nel 1967 la NASA si pose il problema della progettazione di satelliti automatici per l'esplorazione delle risorse della superficie terrestre. Nacque così il progetto dei satelliti ERTS (*Earth Resources Technology Satellites*, dal 13 Gennaio 1975 denominati Landsat). Il progetto originario fu di montare due tipi di sensori differenti a bordo del sensore. Il primo satellite Landsat 1 (in origine ERTS – 1) fu lanciato in orbita con successo il 23 Luglio 1972. I satelliti Landsat hanno raccolto immagini della superficie terrestre per più di trent'anni, senza soluzione di continuità dal 1972 ad ora (Tab. 2.1). Nell'ambito del programma ERTS sono stati lanciati i seguenti vettori.

Satellite	Lancio	Dismissione	Sensore
Landsat 1	Luglio 1972	Gennaio 1978	MSS/RBV
Landsat 2	Gennaio 1975	Febbraio 1982	MSS/RBV
Landsat 3	Marzo 1978	Marzo 1983	MSS/TM
Landsat 4	Luglio 1982	Giugno 2001	MSS/TM
Landsat 5	Marzo 1984	Operativo	MSS/TM
Landsat 6	Ottobre 1994	Irrimediabilmente perso nell'atmosfera	ETM
Landsat 7	Aprile 1999	Maggio 2003	ETM+

TABELLA 2.1: missioni del programma Landsat e relativi sensori.

I vettori Landsat disegnano un'orbita quasi-polare, sincrona-solare⁹, garantendo una copertura di presa dalla latitudine 81° N a 81° S. L'orbita è discendente (dall'emisfero nord a quello sud) e, per tutte le missioni Landsat, il vettore passa in corrispondenza dell'Equatore tra le ore 9.30 e le ore 10 (ora locale).

Landsat 1, 2 e 3 orbitavano ad un'altitudine di 920 Km s.l.m., compiendo un'orbita completa in 103 min. (14 orbite in un giorno). La copertura di ripresa dell'intera superficie terrestre¹⁰ era così effettuata in 18 giorni con un "taglio"¹¹ dell'immagine di 185 Km per lato. I sensori montati su questi tre vettori erano l'RBV¹² (*Return Beam Vidicon Camera*) e l'MSS (*Multispectral Scanner*). L'MSS è uno scanner multispettrale; sui vettori Landsat 1 e 2 operava in tre bande¹³ del visibile e in una dell'IR vicino; su Landsat 3 opera anche in una banda dell'IR termico (TAB. 2.2). La risoluzione geometrica è di circa 80 m¹⁴.

Landsat 5¹⁵ (come Landsat 4, ormai dismesso) orbita invece ad un'altitudine di 705 Km s.l.m.; compiendo un'orbita completa in 98,9 min. (14,5 orbite in un giorno), la copertura di ripresa dell'intera superficie terrestre è di 16 giorni con uno *swath* sempre di 185 Km¹⁶. Identiche sono le caratteristiche del vettore Landsat 7, ma traslato temporalmente rispetto a Landsat 5 di 8 giorni.

Il successivo sensore montato a bordo di Landsat 4 e 5 fu il TM (*Thematic Mapper*), a tutt'oggi l'unico operativo. Tale scanner multispettrale opera nella regione del visibile e dell'infrarosso, includendo però a differenza del precedente diverse bande in più (tre) nel vicino-IR, medio-IR e nell'infrarosso termico. La risoluzione geometrica è di circa 30 m. (120 m. per la banda dell'IR-termico). Landsat 7 montava invece il sensore ETM+¹⁷ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), con una risoluzione geometrica per le bande dalla 1 alla 5 e per la banda 7

⁹ Orbita nella quale il vettore viaggia attorno alla Terra alla stessa velocità di rotazione di quest'ultima intorno al suo asse (FAVRETTO, 2006).

¹⁰ Copertura quasi completa, essendo l'orbita quasi-polare e non perfettamente polare (90°).

¹¹ Si definisce *swath* la porzione orizzontale di superficie terrestre che il sensore registra con una linea di scansione durante ogni orbita.

¹² Insieme di 3 telecamere per Landsat 1 e 2 orientate verso la stessa area del suolo con risoluzione geometrica di circa 80 m. e di 2 telecamere appaiate con risoluzione spettrale pancromatica e risoluzione geometrica di circa 40 m.

¹³ Le bande sono la 4, la 5, la 6 e la 7: tale numerazione è dovuta al fatto che le prime 3 bande erano destinate all'RBV.

¹⁴ Esattamente 57 x 79 m. inizialmente, poi ricampionata a 76 x 76 m.

¹⁵ Il sensore MSS a bordo di Landsat 4 e 5 era identico a quello montato sul vettore Landsat 3.

¹⁶ Esattamente di 183 x 172.8 Km.

¹⁷ Laddove il vettore Landsat 6 montava a bordo il sensore ETM, analogo al successivo ETM+.

di 30 m., per la banda dell'IR-termico di 60 m. e per la banda pancromatica aggiuntiva di 15 m (Tab. 2.3).

Bande spettrali	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione spaziale (m.)
Banda 1 - <i>Verde</i>	0.5 – 0.6	80
Banda 2 - <i>Rosso</i>	0.6 – 0.7	80
Banda 3 - <i>IR-vicino</i>	0.7 – 0.8	80
Banda 4 - <i>IR-vicino</i>	0.8 – 1.1	80

TABELLA 2.2: descrizione delle bande del sensore MSS (Landsat 4 e 5).

Bande spettrali	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione spaziale (m.)
Banda 1 - <i>Blu</i>	0.45 – 0.52	30
Banda 2 - <i>Verde</i>	0.52 - 0.60	30
Banda 3 - <i>Rosso</i>	0.63 - 0.69	30
Banda 4 - <i>IR-vicino</i>	0.76 - 0.90	30
Banda 5 - <i>IR-vicino</i>	1.55 - 1.75	30
Banda 6 - <i>IR-termico</i>	10.42 - 12.50	120 (TM)-60 (ETM+)
Banda 7 - <i>IR-medio</i>	2.08 - 2.35	30
Banda 8 - <i>Pancromatico</i> (ETM+)	0.52 - 0.90	15

TABELLA 2.3: descrizione delle bande del sensore TM ed ETM+ (Landsat 5 e 7).

Verranno di seguito descritte le principali caratteristiche di utilizzo associate alle bande del sensore TM.

- *Banda 1 - Blu (0.45 – 0.5 μm)*

Utilizzata per le capacità di penetrazione delle radiazioni EM nei corpi idrici. Il limite inferiore corrisponde al picco di trasmissione dell'acqua limpida; quello superiore al limite superiore della regione di assorbimento della clorofilla. Le informazioni fornite da tale banda inoltre, forniscono una discriminazione delle

conifere (discriminazione maggiormente difficoltosa per il sensore MSS, dove la banda blu è assente).

- *Banda 2 - Verde (0.52 – 0.60 μm)*

Utilizzata per determinare il vigore della vegetazione, in quanto centrata attorno al picco di riflessione nel verde della vegetazione stessa. Tale banda ricopre l'intervallo spettrale tra le due regioni di assorbimento della clorofilla.

- *Banda 3 - Rosso (0.63 – 0.69 μm)*

Utilizzata nella regione del visibile per determinare i limiti dei suoli (*soil boundary*) e i limiti geologici (*geological boundary*). le forme superficiali mostrano spesso un alto contrasto in questa banda e il disturbo atmosferico (*haze*) è minore che nel resto del visibile. Tale banda ricopre la regione di assorbimento della clorofilla nel rosso.

- *Banda 4 - IR-vicino (0.76 – 0.90 μm)*

Utilizzata per determinare la quantità di biomassa (combinata con la banda 3) della vegetazione e per la delimitazione dei corpi d'acqua. I rapporti¹⁸ tra le bande 3 e 4 sono sensibili alla quantità di biomassa e di umidità presente nella vegetazione; tale banda corrisponde alla regione del picco di riflessione della vegetazione.

- *Banda 5 - IR-vicino (1.55 – 1.75 μm)*

Indicativa del contenuto d'acqua nella vegetazione e dell'umidità del suolo. Utilizzata anche per differenziare la neve dalle nuvole, in quanto la prima riflette, mentre le seconde assorbono. In tale banda la riflessione del manto fogliare è fortemente dipendente dal contenuto di umidità delle foglie. Tale banda si presenta dunque utile nel rilevamento delle condizioni di siccità. Inoltre la regione spettrale interessata da questa banda è utile nella differenziazione tra alcuni tipi di rocce.

¹⁸ Sui rapporti tra bande e, più in generale, sulle *trasformazioni multispettrali* delle immagini satellitari (*Indici di vegetazione*) – non utilizzati nel presente studio – si rimanda alla cospicua bibliografia in materia (tra gli altri LILLESAND E KIEFER, 1999, GOMARASCA, 2004, FAVRETTO, 2006).

- *Banda 6 - IR-termico (10.40 – 12.50 μm)*

I rilievi di questa banda forniscono informazioni sull'andamento delle temperature superficiali. Tale banda si rivela utile per la valutazione degli stati di stress della vegetazione.

- *Banda 7 - IR-medio (2.08 – 2.35 μm)*

Utilizzata per discriminare i tipi di roccia (litotipi) e per la mappatura idrotermale. In particolare si rivela utile per le zone di rocce alterate da fattori idrotermali.

Le immagini Landsat 5 TM sono disponibili sia interamente (*Full scene*: 183 x 172.8 Km), che relative ad un quarto del totale (91.5 x 86 Km) che, infine, per un suo sedicesimo (47.2 x 44 Km) (FIG. 2.1). I dati telerilevati del programma Landsat sono disponibili secondo tre livelli di elaborazione: 0R – *Raw*, 1R – *Radcor* e 1G – *System Corrected*. Nel primo livello di elaborazione dei dati i pixel non sono corretti nè geometricamente nè radiometricamente: sono applicate esclusivamente le c.d. *correzioni di sistema*¹⁹. Il livello 1R costituisce una correzione radiometrica del precedente livello; tali correzioni radiometriche non sono eliminabili; come per il livello 0R non è presente correzione geometrica nè ricampionamento; il livello 1G è invece corretto sia geometricamente che radiometricamente: la correzione geometrica di *defaults* è quella nel sistema UTM WGS 84 tramite gli algoritmi di ricampionamento *Nearest neighbour* o *Cubic convolution*. Non è fornita invece la correzione atmosferica.

¹⁹ Si rimanda al par. 3.2 per una trattazione – non esaustiva – in merito alle correzioni di sistema; per una trattazione esaustiva si rimanda invece alla bibliografia (LECHI, 2002).

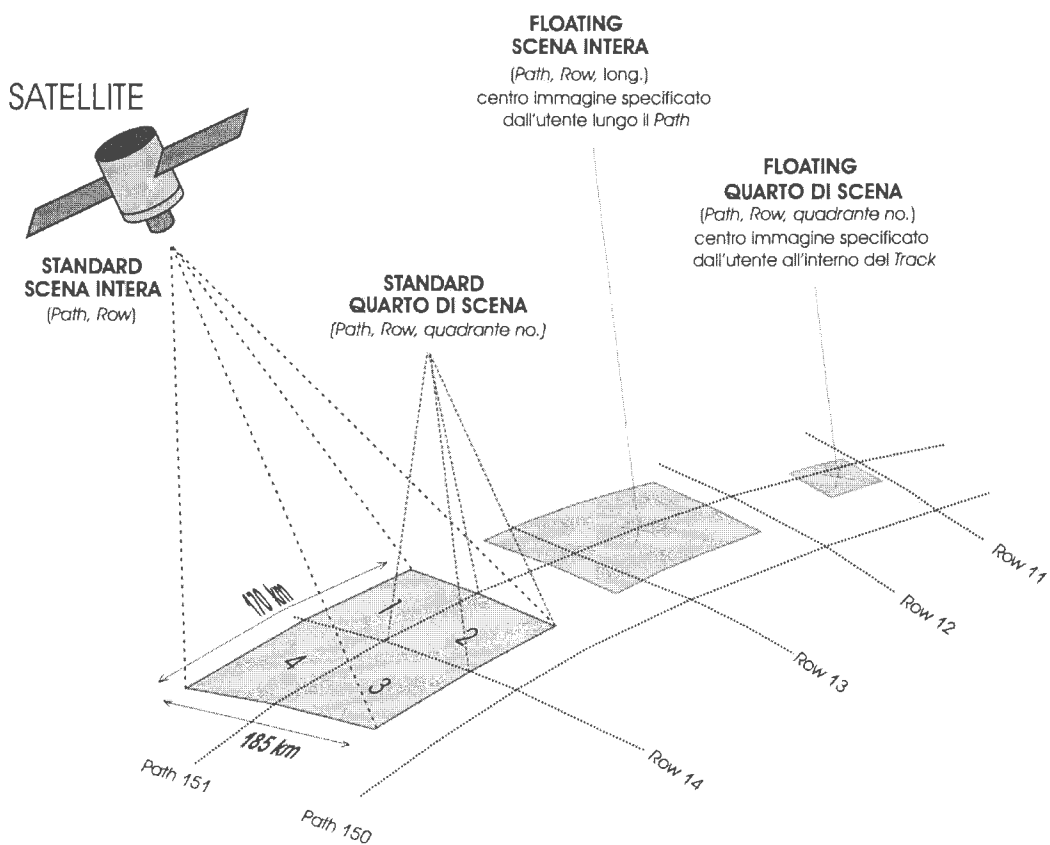


FIGURA 2.1: disponibilità delle immagini Landsat 5 con sensore TM.

3. PROCEDURE ESPLORATIVE APPLICATE ALLE IMMAGINI SATELLITARI.

3.1 Un primo approccio: l'interpretazione visiva.

L'identificazione e la distinzione degli oggetti in un'immagine grezza, senza ricorrere a procedure di classificazione automatica, viene denominata *interpretazione visiva*. Nel caso di dati telerilevati, tale metodo permette diversi livelli di approfondimento nella conoscenza della copertura del suolo, in funzione sia della risoluzione spaziale che spettrale. Il ritratto degli oggetti da una prospettiva spesso non familiare, il frequente uso di lunghezze d'onda che vanno al di fuori dello spettro visibile, la descrizione della superficie a terra in scale e risoluzioni non usuali, costituiscono tre aspetti importanti dell'interpretazione visiva (CAMPBELL, 1996). L'obiettivo a terra deve essere ben distinguibile dagli altri oggetti che lo circondano.

Le immagini possono essere visualizzate sia in bianco e nero (monocromia) che combinando in una combinazione di colori i diversi canali o bande che rappresentano le diverse lunghezze d'onda.

Diverse sono le caratteristiche proprie di un obiettivo a terra, che lo rendono distinguibile dagli altri, anche se l'utilità e il modo in cui essere devono essere considerati dipende dal settore di applicazione.

3.1.1 Visualizzazione delle immagini satellitari.

Il colore di un oggetto nell'immagine satellitare è l'elemento fondamentale per la distinzione dei diversi elementi che la compongono. Al colore di ogni pixel²⁰ a schermo in un'immagine telerilevata corrisponde un numero, la cui gamma di

²⁰ Pixel: questo termine deriva dalla contrazione di *picture element*. L'immagine satellitare è una matrice di pixel. La *risoluzione spaziale* (o *geometrica*) fa riferimento alle dimensioni del singolo pixel che costituisce l'immagine.

valori varia in funzione della *risoluzione radiometrica*²¹. Questo valore può essere reso visivamente con un colore o una sfumatura di grigio. Ogni immagine acquisita da un sensore su una banda è un'immagine in scala di grigio. Questo consente la visione delle immagini telerilevate anche al di fuori dello spettro visibile.

Il colore dell'immagine dipende da diversi fattori e, generalmente, non è possibile correlarlo ad una singola caratteristica della copertura del suolo. Le immagini satellitari sono immagini multispettrali²² (ossia composte da alcune immagini relative alla stessa scena raccolte in diverse bande dello spettro elettromagnetico), dal visibile all'infrarosso termico.

Ciò comporta l'opportunità di sfruttare meglio la ricchezza di informazione contenuta nelle immagini, mediante l'uso del colore. Sulla base della teoria relativa ai modelli tricromatici, è possibile associare alle singole bande canali di colori primari (rosso verde e blu), visualizzando simultaneamente terne di immagini.

Per esempio, associando alle bande acquisite nel blu (nel caso del sensore TM del satellite Landsat5, la banda1 o TM1), nel verde (TM2) e nel rosso (TM3) ai corrispondenti canali (rispettivamente blu, verde e rosso) si ottiene, tramite un'operazione di sintesi additiva del colore, una composizione che prende il nome di immagine a colori naturali (*True Color*). La scena che si visualizza presenta una combinazione di colori simile a quella percepita dall'occhio umano (Fig. 3.1).

²¹ *Risoluzione radiometrica*. La risoluzione radiometrica è la minima differenza d'intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia raggiante. Nell'immagine digitale satellitare viene registrata sottoforma di numeri (Digital Numbers o DN) compresi generalmente fra 0 e 255, che esprimono la gamma delle radianze registrate dal sensore. Il numero 255 è legato al fatto che le misure sono memorizzate in byte, l'unità di base dei computer, e il byte è formato da 8 bit, cioè $2^8 = 256$ valori di cui il primo è 0, cioè radiazione misurata nulla, e l'ultimo 255, cioè radiazione misurata massima. Se per memorizzare le misure si usasse un solo bit, si potrebbero rappresentare solo due livelli di radianza (0 e 1), mentre con 8 bit si possono rappresentare 256 differenti livelli di intensità, aumentando in questo modo la risoluzione radiometrica.

²² La *risoluzione spettrale* fa riferimento al numero delle bande in cui viene acquisita l'immagine satellitare.

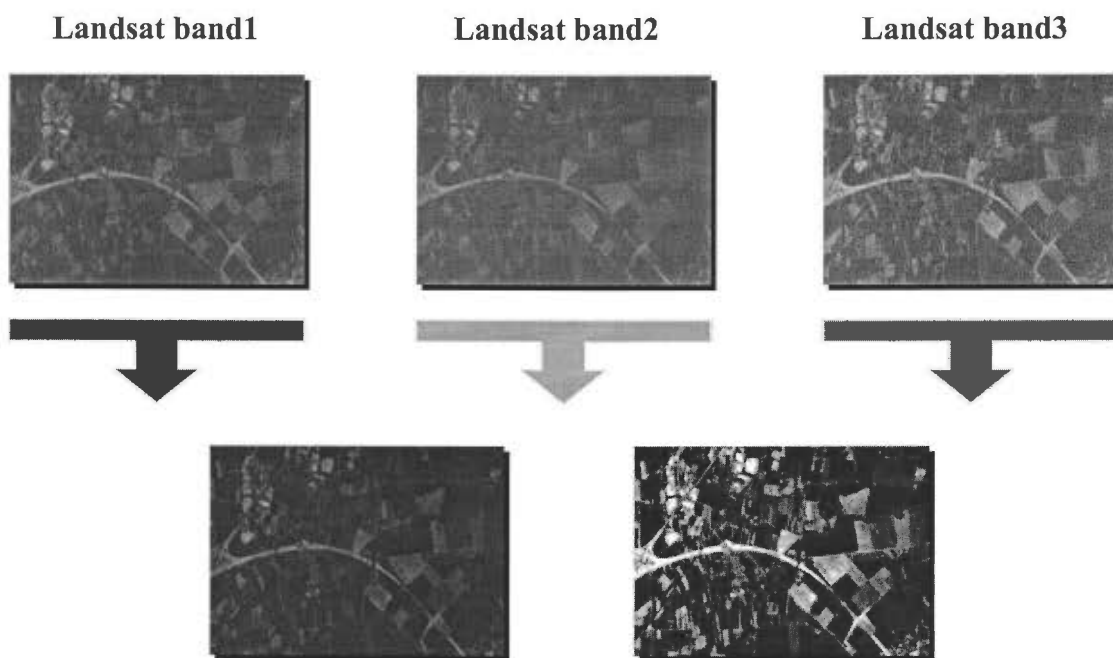


FIGURA 3.1: visualizzazione delle immagini a colori naturali (RGB 321).

Ogni altra composizione prende il nome di immagine a falsi colori (*False Color*), poichè non c'è alcuna relazione fra banda spettrale in cui è stata acquisita l'immagine e il colore con cui viene rappresentata. L'immagine appare con colori innaturali (Fig. 3.2).

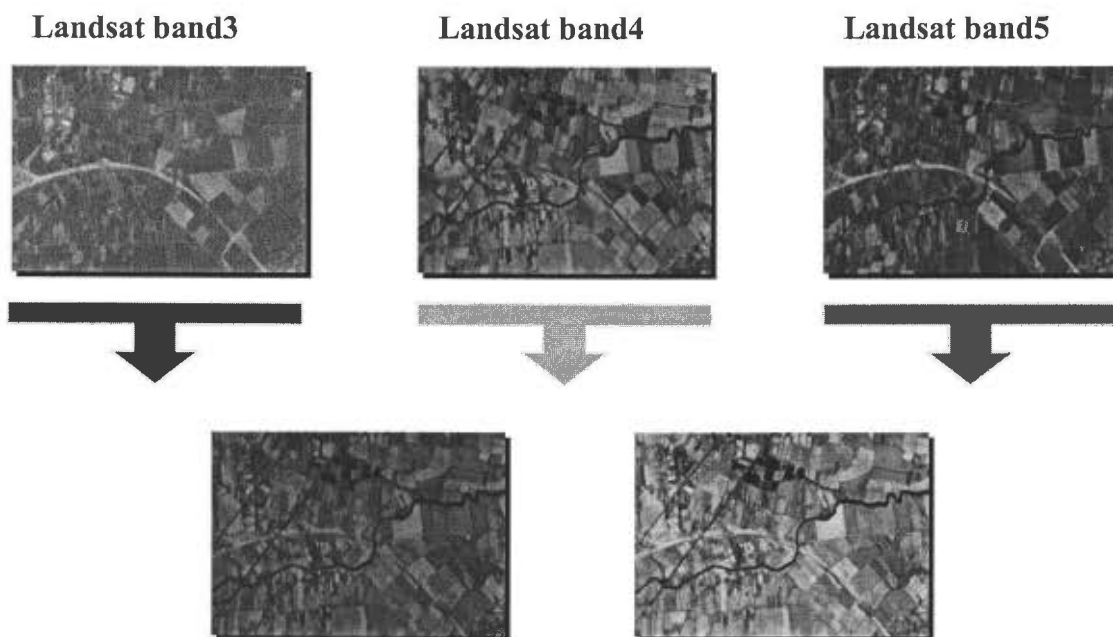


FIGURA 3.2: rappresentazione dell'immagine a falsi colori (RGB 543). L'idrografia è colorata di blu, i campi coltivati di verde e il suolo nudo, come gli elementi artificiali, di rosa.

Nel caso di un'immagine a colori naturali, la copertura del suolo si presenta nei colori nei quali siamo soliti vederla. La vegetazione sarà rappresentata secondo gradazioni di verde (chiaro quando si tratta di formazioni prative, più scure per formazioni boschive), l'idrografia secondo gradazioni di blu e così via relativamente ad altri tipi di copertura del suolo. Normalmente questo tipo di associazione di bande non permette, ad esempio, di distinguere in modo netto formazioni forestali a latifoglie da quelle a conifere, formazioni prative da terre arabili, aree edificate per usi industriali dal terreno nudo, etc.

Nel caso delle immagini a falsi colori, alcune combinazioni sono usualmente utilizzate per la netta identificazione delle componenti vegetali e, di contrasto, di quelle edificate ed antropiche in genere. Ad esempio, si parla di "immagine all'infrarosso falso colore IRFC" (IRFC: *InfraRed False Colour*) quando la banda spettrale dell'infrarosso vicino viene rappresentata in rosso, la banda spettrale rossa viene rappresentata in verde e la banda spettrale verde viene rappresentata in blu (ad esempio, nel caso di Landsat5, RGB: TM4, TM3, TM2). Con tale codifica infatti la vegetazione appare di un forte colore rosso o magenta, in netto contrasto con le strutture artificiali che invece appaiono di un colore bluastro o comunque con tinte molto diverse dal rosso (Fig. 3.3).

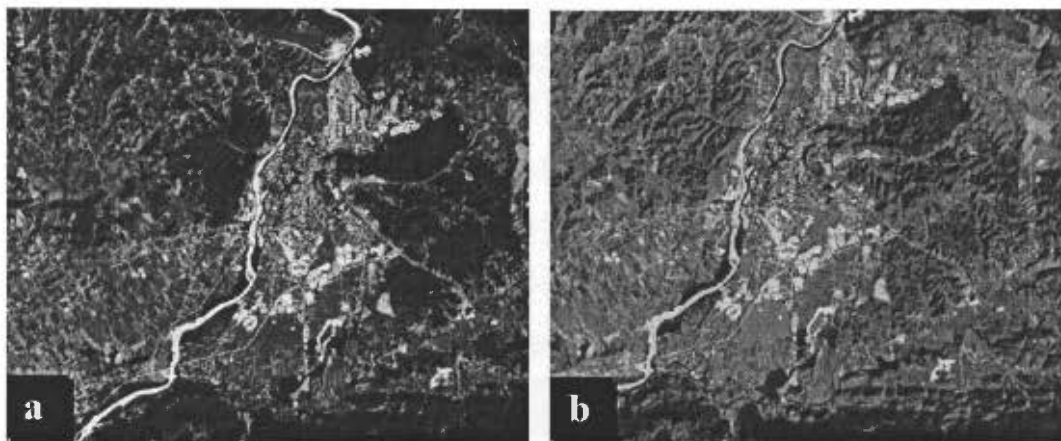


FIGURA 3.3: le associazioni più comuni operate fra bande spettrali diverse nelle composizioni di immagini a colori con il sistema RGB: a. Composite 321; b. Composite 432 (Landsat5 TM, Ottobre 1991)

3.1.2 Istogramma delle frequenze assolute.

Nell'analisi del colore assume particolare rilievo l'interpretazione dell'istogramma delle frequenze assolute. Infatti, da un punto di vista statistico un'immagine satellitare può essere descritta dal suo istogramma. Si tratta di un grafico che presenta, relativamente a ciascuna banda, sull'asse delle ascisse il range dei valori DN assunti dai pixel e sull'asse delle ordinate la loro frequenza assoluta. Nell'esempio riportato in (Fig.3.4), i pixel assumono valori che vanno da un minimo di 2 fino ad un massimo di 186. Il valore medio assunto è 104,476. La frequenza assoluta del valore 94 è 5724. La frequenza assoluta massima raggiunta è 9396.

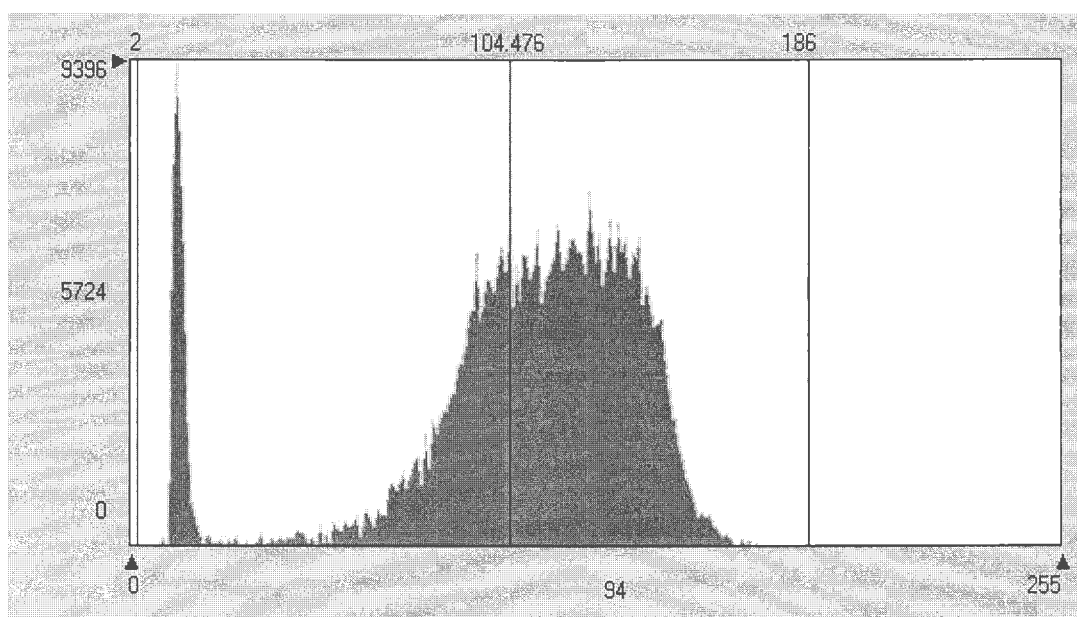


FIGURA 3.4: istogramma delle frequenze assolute (in ordinata) dei valori digitali (in ascissa) assunti dai pixel nell'immagine satellitare.

Tramite l'analisi dell'istogramma per ciascuna banda si possono conoscere i valori di tendenza centrali (media, mediana e moda), i valori di dispersione (deviazione standard e varianza), nonché la distribuzione dei pixel all'interno del range. Questi indicatori statistici si rivelano particolarmente utili nell'analisi dei valori dei pixel assunti dai diversi tipi di copertura del suolo, sia per individuare coperture omogenee, sia per confronti con immagini satellitari differenti ai fini di

un'analisi diacronica dei cambiamenti. Inoltre, sulla base dell'istogramma è possibile realizzare classificazioni secondo diverse metodologie, utili per generare classi tematiche da dati telerilevati o da loro elaborazioni.

3.1.3 Profili spettrali.

Un altro metodo per indagare i valori numerici assunti dai pixel nelle diverse bande è quello di analizzare puntualmente il profilo spettrale, ossia l'andamento dei valori di riflettanza nelle singole bande.

Come esempio di questo tipo di analisi (Fig.3.5) sono stati riportati quattro diversi profili spettrali condotti su un'immagine Landsat5 TM. In questo caso si può notare come le bande dell'infrarosso vicino e dell'infrarosso medio (rispettivamente la banda 4 e 5) siano quelle maggiormente sensibili alle variazioni di classi di copertura. Infatti, esse rivelano valori medio-bassi nel caso del terreno nudo e del bosco di conifere, mentre i valori diventano maggiori nel caso del bosco di latifoglie e delle superfici a prato.

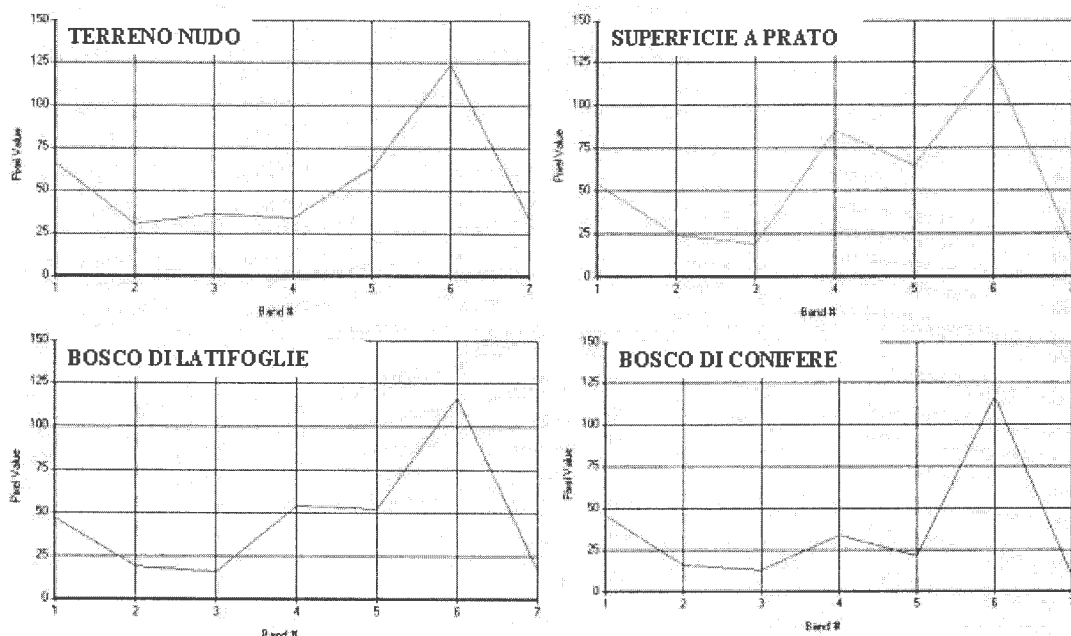


FIGURA 3.5: profili spettrali condotti su un'immagine Landsat5 TM (7 bande) per quattro classi di copertura del suolo: terreno nudo, superficie a prato, bosco di latifoglie e bosco di conifere.

3.1.4 *Pattern.*

Si parla di *pattern* in relazione alla disposizione spaziale degli oggetti. La ripetizione di alcune forme generali o di alcune relazioni è caratteristica di diversi oggetti sia naturali che antropici e fornisce un *pattern* che aiuta a riconoscerli. Coltivazioni arboricole come frutteti o pioppeti, con alberi ben spazati e disposti nella stessa direzione, costituiscono un buon esempio di *pattern*. Le specie di alberi possono essere parzialmente identificate sulla base sia della conoscenza bibliografica del territorio (individuando ad esempio che formazioni forestali possono essere presenti in zona) sia sulla base della loro risposta spettrale.

3.1.5 *Tessitura.*

L'analisi di *tessitura* si riferisce alla disposizione e alla frequenza delle variazioni di tonalità in particolari aree dell'immagine. Una *tessitura* su un terreno accidentato consiste di alcune tonalità a chiazze dove i livelli di grigio cambiano repentinamente in una piccola area, mentre la *tessitura* su un terreno piano avrà una variazione di tonalità molto bassa. Quest'ultimo tipo è molto spesso il risultato di superfici uniformi, come campi, asfalto o prati. Un target con superficie dissestata e struttura irregolare, come una copertura forestale, avrà una *tessitura* discontinua. La *tessitura* ci permette, quindi, di distinguere in classi le tonalità di colore dei pixel, a seconda del tipo di distribuzione (MATHER, 1999).

3.1.6 *Dimensioni e forma.*

Le dimensioni di un oggetto devono essere considerate nel contesto dell'immagine. Ovviamente se non si vuole incorrere in errori, bisogna considerare le dimensioni degli oggetti che stanno attorno per comprendere la scala a cui si sta osservando l'immagine.

La forma di un singolo oggetto può rivelarsi un'importante strumento per l'interpretazione visiva dell'immagine. Infatti, forme lineari rappresentano

tipicamente target urbani o agricoli (Fig.3.6), mentre forme più irregolari sono caratteristiche di ambiti naturali (il confine di una foresta), ad eccezione di quando sono state create dell'uomo.



FIGURA 3.6: esempio di forme lineari: superfici agrarie nella bassa pianura friulana ripresa dal satellite Landsat5 TM nell'Ottobre del 1991 (RGB 432).

3.1.7 Scala spaziale.

La scala rappresenta un limite pratico perché alcuni oggetti sono troppo piccoli per essere distinti. L'interpretabilità visuale diventa progressivamente minore quando la scala diminuisce. Con immagini a scale molto grandi molte specie possono essere riconosciute quasi interamente per le loro caratteristiche morfologiche. Scendendo a scale più ridotte non è possibile discriminare tutti questi elementi. Quando si usano dati satellitari a media risoluzione (ad esempio Landsat5 TM, Landsat7 ETM+ o Aster), il colore e la tessitura divengono i parametri visuali più importanti per l'identificazione visuale delle formazioni vegetali.

3.2 Pre-elaborazione delle immagini telerilevate.

Con pre-elaborazione delle immagini satellitari si intendono tutte quelle procedure utili a sanare difetti o deficienze dei dati telerilevati dai sensori e trasmessi alle stazioni a terra. Le immagini satellitari possono essere infatti anche

acquisite allo stato grezzo (*raw data*), affette da una serie di distorsioni strutturali²³, proprie del sistema “sensore-vettore-stazione a terra”. Generalmente si rivela necessario – ai fini delle successive fasi di interpretazione ed analisi delle immagini – un trattamento preliminare del dato telerilevato. Le immagini telerilevate vengono utilizzate per effettuare analisi spaziali in ambiente GIS unitamente ad altri dati le cui fonti possono essere eterogenee – sia per l’aspetto temporale che per quello inerente il formato e l’origine del dato. Soprattutto in presenza di fonti cartografiche non omogenee (es: cartografia topografica, ortofotocarte, etc.), di immagini satellitari registrate da sensori differenti ovvero dallo stesso sensore ma in periodi temporali differenti, saranno necessarie le opportune correzioni. Le più diffuse²⁴ sono la *correzione geometrica* e la *correzione atmosferica*²⁵.

Tali pre-elaborazioni non sono tuttavia prive di controindicazioni, in quanto possono trasformare, anche sostanzialmente, il valore del pixel. Questo avviene sulla base di una stima elaborata dal modello stesso di correzione, ma tale stima non è sempre ugualmente precisa per tutte le bande spettrali dell’immagine – ci si riferisce alla correzione atmosferica – oppure può diluire la variabilità numerica di pixel contigui –ci si riferisce alla correzione geometrica (FAVRETTO, 2006).

3.2.1 *Correzione geometrica.*

Le correzioni geometriche sono necessarie quando si vogliono effettuare analisi spaziali tipiche in ambiente GIS: sovrapposizione di strati (*overlay*) vettoriali e *raster*²⁶, mosaicatura (unione) di immagini, analisi di controllo delle differenze (*change detection*) fra immagini acquisite in periodi temporali successivi. Tali correzioni servono per eliminare eventuali deformazioni introdotte dal sistema satellitare (GOMARASCA, 1997).

²³ Non sono da considerarsi incluse in questo tipo di distorsione quelle dovute alla presenza di rilievi orografici presenti al suolo.

²⁴ Oltre alle c.d. *correzioni di sistema*, ovverosia le correzioni delle distorsioni geometriche sistematiche - derivanti dalle caratteristiche proprie dei sensori – ed applicate ai dati grezzi tramite modelli applicati alle stazioni di ricevimento a terra.

²⁵ Queste correzioni sono state effettuate in questa sede (vedi sotto); di frequente utilizzo è anche la *correzione radiometrica*. Si rimanda alla bibliografia per un approfondimento in tal senso.

²⁶ Molto diffuse anche le operazioni di *overlay* tra più *layer raster* derivanti da fonti non omogenee ai fini di analisi diacroniche della copertura del suolo.

La procedura di correzione geometrica attribuisce sostanzialmente ad ogni pixel dell'immagine grezza un sistema di coordinate, sia esso geografico o piano: ogni pixel viene dunque *georiferito*.

Le distorsioni geometriche presenti nelle immagini grezze sono attribuibili a variazioni di altitudine, assetto e velocità del vettore che, modificando l'IFOV²⁷, modificano conseguentemente la *risoluzione spaziale*²⁸ dell'immagine in corso di acquisizione. La curvatura del globo terracqueo e la sua rotazione verso est sono inoltre causa di deformazioni geometriche. Queste distorsioni rientrano nelle già citate (vedi sopra) distorsioni sistematiche; quando invece ci si trova in presenza di distorsioni casuali o residue risultano applicabili due procedimenti: il *metodo polinomiale* per la georeferenziazione e il *metodo di ortorettificazione*.

3.2.1.1 Metodo polinomiale.

Tale metodo si rileva utilizzabile per applicazioni di carattere tematico (produzione di cartografia tematica), in cui vi è sempre la necessità di attribuire un sistema di coordinate alle immagini telerilevate. Se le correzioni di sistema sono state sufficienti e le acquisizioni compiute nadiralmente tale metodologia può dare risultati apprezzabili e si caratterizza per la sue molteplici applicazioni²⁹.

La prima fase è quella di riconoscere, nell'immagine satellitare da georiferire, una serie uniformemente ben distribuita dal punto di vista spaziale di punti con coordinate note (GCP: *Ground Control Point*). Tali punti vengono localizzati da una doppia serie di coordinate: nell'immagine da georiferire sono i numeri delle righe e delle colonne della matrice costituita dall'immagine stessa; per gli stessi punti sono però note le coordinate, geografiche o metriche piane, ricavate

²⁷ *Instantaneous Field Of View*: l'area di territorio visibile in un dato momento dipendente dal cono di visibilità del sensore. Il campo visuale del sensore dipende dall'altitudine del sensore sul terreno e determina la *risoluzione spaziale* del pixel a suolo. Variando l'altitudine varia quindi anche la risoluzione spaziale del sensore, discostandosi così da quella ufficiale dichiarata (FAVRETTO, 2006).

²⁸ La misura della più piccola separazione o distanza fra due oggetti alla quale gli stessi appaiono distinti e separati (SABINS, 1997).

²⁹ Tale metodologia può inoltre essere applicata anche per la georeferenziazione di cartografia *raster* o vettoriale.

generalmente da una fonte già georiferita, sia essa una carta³⁰ *raster* o vettoriale, un'ortofotocarta, un'altra immagine satellitare, etc. I punti con doppia serie di coordinate vengono utilizzati per stimare, mediante una regressione dei minimi quadrati, due equazioni polinomiali di primo grado o superiore³¹, uno per l'ascissa e uno per l'ordinata. Con le equazioni così stimate è possibile trasformare l'immagine distorta geometricamente in un'immagine corretta.

Al fine di operare un controllo della regressione eseguita sui GCP differenti software che operano in ambiente GIS calcolano il c.d. errore quadratico medio (*RMS Error: Root Mean Square Error*), espresso in termini spaziali (in numero di pixel e parallelamente, data la conoscenza della risoluzione spaziale, in metri).

Da un punto di vista grafico ogni GCP che non giace sulla curva espressa dal polinomio genera un errore RMS, rendendo così possibile la scelta dei soli GCP che meglio stimano la funzione interpolante, ovverosia quelli con un RMS minore.

Tramite la coppia di equazioni interpolanti si rettifica dunque l'immagine originaria non corretta geometricamente, spostando la posizione di ciascun pixel da numeri di righe e colonne nella matrice di partenza a coordinate geografiche o metriche piane nell'immagine corretta. Occorre però successivamente determinare i nuovi DN dei pixel da attribuire ai pixel stessi nelle nuove posizioni dopo la rettifica geometrica: viene applicata alla singola cella dell'immagine corretta la *trasformazione inversa*³² rispetto a quella che ha permesso di trovare la posizione corretta della cella. Adottando però la trasformazione inversa, a partire dalle coordinate del pixel di output espresse in termini riga-colonna, si ottengono coppie di numeri reali, non individuando però

³⁰ La carta può anche presentarsi nel tradizionale formato cartaceo: sarà necessario quindi designare i GCP con l'ausilio del coordinatometro e compilare una tabella di corrispondenza da utilizzare come dato input.

³¹ Il grado del polinomio dipende dal numero minimo dei GCP riconosciuti, secondo la formula: $(t+1)(t+2)/2$, dove t rappresenta l'ordine della trasformata.

³² E' possibile anche applicare una *trasformazione diretta*: partendo dal pixel dell'immagine da correggere si applica la funzione di trasformazione e si ottiene così la posizione relativa nell'immagine corretta, ovverosia le coordinate del pixel al quale attribuire i valori di radianza del pixel di partenza. Se il metodo tramite trasformazione inversa, pur operando mediante interpolazione dei dati iniziali, garantisce l'attribuzione di un valore di radianza a ciascuno dei pixel dell'immagine corretta (partendo dalla posizione del pixel di output si risale alla posizione relativa nell'immagine di input e lì si individua il valore di radianza da attribuire al pixel dell'immagine corretta), il metodo tramite trasformazione diretta può generare, da un lato, porzioni di immagine nelle quali non vi è attribuzione di alcun valore di radianza ai pixel ("buchi") e, dall'altro, una porzione di immagine che interessa un singolo pixel in cui vengono a corrispondere diversi pixel dell'immagine di partenza.

la posizione di un ben definito elemento nella matrice. Sono necessarie quindi successivamente delle procedure di interpolazione per individuare i DN alle varie bande spettrali del sensore corrispondenti alla posizione precisa fornita dalla trasformazione inversa (FAVRETTO, 2006). Sono le procedure c.d. di *ricampionamento (resampling)* che utilizzano generalmente tre algoritmi principali: *nearest neighbour* [prossimo più vicino], *bilinear interpolation* [bilineare] e *cubic convolution* [bicubico o convoluzione cubica].

a. *Nearest neighbour.*

Tramite tale algoritmo il valore di radianza DN che viene attribuito al pixel dell'immagine corretta è il valore corrispondente al pixel che ha coordinate riga-colonna (numeri interi) più prossime spazialmente alle coordinate ottenute dalla trasformazione inversa. L'utilizzo di questo algoritmo non altera il valore di radianza del pixel nell'immagine ricampionata; per contro questo tipo di interpolazione può generare effetti di scalinatura o discontinuità nella rappresentazione di elementi lineari.

b. *Bilinear interpolation.*

Nel caso di ricampionamento *bilineare* il nuovo valore di radianza DN viene definito mediante un'interpolazione che coinvolge i quattro pixel più prossimi alle coordinate ottenute dalla trasformazione inversa. Utilizzando questo algoritmo i valori di radianza DN originali vengono modificati e l'immagine corretta presenterà contrasti meno marcati e, di conseguenza, un passaggio più graduale tra gli elementi che presentavano differenti radianze. Il problema degli effetti di scalinatura o discontinuità nella rappresentazione di elementi lineari viene attenuato rispetto al metodo di campionamento precedente, a scapito però di una perdita del dato iniziale in termini radiometrici.

c. *Cubic convolution.*

Il ricampionamento *bicubico* è concettualmente simile a quello bilineare³³: le dimensioni della finestra sulla base della quale si interpola il valore di ciascun pixel (le cui coordinate sono state ottenute dalla trasformazione inversa) è però

³³ Tale algoritmo risulta essere, in termini computazionali, il più oneroso dei tre descritti in questa sede.

un quadrato di lato quattro pixel invece che due; vengono dunque coinvolti per l'interpolazione i sedici pixel più prossimi. Quest'ultimo algoritmo di ricampionamento risulta quello in grado di fornire la maggior accuratezza geometrica; per contro il contenuto radiometrico dell'immagine ne è fortemente alterato. Pertanto il ricampionamento bicubico risulta inappropriato per le trasformazioni di immagini sulle quali si voglia successivamente operare analisi radiometriche, quali classificazioni automatiche³⁴.

3.2.1.2 Metodo di ortorettificazione.

Questo secondo metodo di correzione geometrica risulta appropriato quando l'immagine satellitare si riferisce a terreni caratterizzati da orografia e altimetria irregolare, come ad esempio in regioni montane o caratterizzate comunque da un'orografia irregolare.

Per utilizzare tale metodo sono necessarie informazioni aggiuntive rispetto all'immagine di partenza: la terza coordinata dei pixel, relativa alle informazioni sull'altimetria fornite da un DEM (*Digital Elevation Model*), e una serie di informazioni dettagliate relative alla ripresa del sensore.

Il procedimento è simile a quello di realizzazione delle ortofotocarte; la principale differenza è attribuibile al fatto che, nel caso delle ortofotocarte, l'istante di acquisizione è uno solo, mentre, nel caso di immagini satellitari, ad ogni riga dell'immagine corrisponde un dato istante temporale. Nel primo caso si avrà una sola proiezione centrale dell'immagine; nel secondo tante proiezioni centrali quante sono le righe dell'immagine. Attraverso la conoscenza della velocità di spostamento del satellite e del tempo di scansione di ciascuna riga, è possibile stimare ogni proiezione centrale riferendola a quella precedente (FAVRETTO, 2006).

Per quanto concerne la velocità di spostamento del vettore, è possibile disporre di informazioni molto accurate: tali informazioni inoltre vengono integrate dal dato

³⁴ Quando la distorsione geometrica è molto pronunciata, il metodo polinomiale può portare a risultati insoddisfacenti. In alternativa, se si possono riconoscere molti GCP nell'immagine da correggere, si può utilizzare un modello geometrico per la georeferenziazione differente: il *rubber sheeting*. Tale modello, sulla base dei GCP, forma una rete di triangoli irregolari (TIN: *Triangular Irregular Network*); la porzione di immagine identificata da ogni triangolo viene poi georiferita dalla funzione polinomiale di primo grado determinata sulla base dei tre vertici del triangolo (FAVRETTO, 2006).

circa l'indeterminazione della velocità³⁵. La conoscenza accurata della velocità di spostamento, combinata con il fatto che l'*intervallo di campionamento di riga* – il tempo di acquisizione di ciascuna riga – è una costante ben definita del sistema, consente di individuare in maniera molto accurata la posizione relativa delle singole linee di scansione che compongono l'intera immagine.

Per quanto concerne invece gli angoli di assetto del sensore, affinché possa essere orientato correttamente verso la zona da rilevare, sul vettore è presente un apposito sistema di controllo che effettua continue correzioni; questo al fine di mantenere il vettore nell'assetto ideale predefinito, controbilanciando i momenti di disturbo dovuti al combinarsi dell'azione del campo magnetico e del campo gravitazionale terrestre, della presenza dell'atmosfera e della radiazione solare.

Nota infine anche l'altezza della presa, tutti i dati ausiliari permettono di posizionare ortogonalmente sulla porzione di terreno teoricamente rilevata dal sensore, ogni riga ripresa, pixel per pixel. Applicando un ristretto numero di GCP e le informazioni sull'altimetria fornite dal DEM, è possibile quindi posizionare correttamente tutti i pixel ed eliminare l'effetto della quota dovuta alle caratteristiche orografiche ed altimetriche del terreno (LECHI, 2002). Nota infatti la geometria di presa e le caratteristiche orografiche del territorio si può calcolare, per ogni singola riga, di quanto vada modificata la posizione dei pixel interessati, per trasformare la proiezione centrale in proiezione ortogonale.

3.2.2 *Correzione atmosferica.*

Per effetti radiometrici si intendono tutte quelle categorie di effetti che influenzano la radianza – e conseguentemente il DN – di ciascun pixel di un'immagine telerilevata. Tali effetti sono propri sia del sensore, la calibrazione, sia della scena telerilevata, l'effetto atmosferico, i fattori georadiometrici e le proprietà di riflettanza del suolo.

La correzione radiometrica – di cui la correzione atmosferica è parte integrante – si rivela necessaria per compensare gli effetti relativi alle condizioni di illuminazione, alla geometria della presa, alle variazioni topografiche e ai fenomeni atmosferici.

³⁵ Tale indeterminazione viene misurata in mm/sec², laddove la velocità è misurata in m/sec.

In particolare quando l'energia elettromagnetica che illumina la superficie terrestre attraversa l'atmosfera è soggetta al fenomeno della diffusione (*scattering*). Tale fenomeno determina un disturbo del segnale, che viene quindi registrato alterato dal sensore, non riportando correttamente la radianza emessa da un determinato tipo di suolo od oggetto illuminato dall'energia elettromagnetica. Sintetizzando, le fasi di alterazione del segnale, posso essere riassunte come segue.

L'energia elettromagnetica di origine solare impatta l'atmosfera, venendo qui in parte diffusa verso il sensore prima di attraversare l'atmosfera³⁶ (*path radiance*), in parte assorbita dall'atmosfera ed in parte attraversando l'atmosfera e colpendo il suolo. A questo punto la radianza riflessa dal suolo torna verso il sensore; durante questo secondo passaggio attraverso l'atmosfera vi è un nuovo assorbimento e una nuova diffusione. Ultima fase è costituita infine dalla radianza residua che raggiunge il sensore. L'alterazione dei valori di radianza è quindi determinato da un incremento portato dalla *path radiance* e da una attenuazione portata da assorbimento e diffusione. Ad influenzare ulteriormente il disturbo concorrono la geometria dell'illuminazione (in stretto rapporto con la stagione meteorologica), la pendenza del terreno e la disposizione di elementi topografici che generano zone d'ombra.

In particolare la diffusione atmosferica, dovuta alle molecole di gas, decresce rapidamente con la lunghezza d'onda (proporzionalmente all'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda λ : c.d. *diffusione di Rayleigh e Mie*³⁷), laddove il decremento è meno marcato per gli aerosol. L'assorbimento da parte di alcune

³⁶ L'interazione fra radiazione solare diretta ed inversa con gas, aerosol atmosferico (materia allo stato di vapore e solido sospesa in aria, KAUFMAN, 1989) e nuvole costituenti l'atmosfera, genera diffusione, assorbimento e deviazione dell'energia elettromagnetica. Convenzionalmente l'atmosfera (78% di Azoto, 20% di Ossigeno, 1% di Argon, 1% di Anidride Carbonica, Idrogeno, Ozono, Vapore acqueo ed altri gas) si suddivide in: troposfera (da 0 a 10-12 Km s.l.m., sede di perturbazioni); stratosfera (da 12 a 20 Km s.l.m., a temperatura di circa -60°C, senza perturbazioni); ionosfera (da 20 a 80 Km s.l.m., importante per la propagazione delle onde elettromagnetiche).

³⁷ Tutti i corpi in natura diffondono la radiazione che li investe. Nell'ipotesi di una particella sferica molto piccola rispetto alla λ della radiazione incidente, l'intensità della radiazione diffusa è inversamente proporzionale alla quarta potenza della λ ; la quantità di energia diffusa al momento dell'urto è identica in due direzioni opposte: massima a 0° e 180° (*forward scattering* e *back scattering*) e nulla a 90° e 270° (*teoria di Rayleigh*). Nell'ipotesi invece di una particella sferica dello stesso (o maggiore) ordine di grandezza della λ , lo *scattering* è indipendente dalla lunghezza d'onda; al diminuire delle dimensioni della particella, la diffusione è inversamente proporzionale ad una potenza di λ variabile da 0 (dimensioni molto maggiori) a 4 (*teoria di Mie*).

molecole (ozono e vapore acqueo) è invece consistente a certe lunghezze d'onda, legato alle quantità variabili di gas contenuto nell'atmosfera.

I parametri più importanti, nel visibile e nell'infrarosso vicino (da 0,45 μm a 1,10 μm), sono dunque i seguenti: *concentrazione di aerosol*, valutata in misure di visibilità V (Km); *assorbimento dell'ozono*, particolarmente rilevante a 0,6 μm circa e, invece, trascurabile tra 0,45 μm e 0,75 μm ; *assorbimento del vapore acqueo*, il quale assume valore massimo a 0,93 μm ed è comunque notevole tra 0,72 μm e 0,81 μm .

La correzione atmosferica genera inevitabilmente (apportando sostanzialmente una correzione alla radianza di ciascun pixel) un'alterazione dell'immagine, che può anche risultare errata se errati sono i fattori di correzione alle diverse lunghezze d'onda registrate dal sensore (FAVRETTO, 2006).

La correzione atmosferica è consigliata (MATHER, 1999, FAVRETTO, 2006) nel caso si vogliano effettuare analisi di controllo delle differenze (*change detection*) di uno stesso territorio in un'ottica diacronica. Le condizioni atmosferiche sono profondamente variabili temporalmente: per eseguire con precisione questo tipo di analisi la correzione atmosferica si rivela dunque opportuna, laddove un'analisi della copertura del suolo basata sull'utilizzo di dati telerilevati provenienti da una singola immagine, non richiedono tale correzione, se si assume che tutti i pixel dell'immagine sono egualmente affetti dai fattori atmosferici.

Gli algoritmi per la correzione atmosferica si suddividono in due categorie: quelli che si limitano al trattamento dei valori di radianza di ciascun pixel dell'immagine, che vengono corretti senza disporre di informazioni aggiuntive, e quelli che partono dalla stima delle caratteristiche ottiche dell'atmosfera in un dato momento e da questa procedono alla correzione (FAVRETTO, 2006). In questo secondo caso sono necessari molti parametri, sia ricavabili dai metadata del dato telerilevato (condizioni geometriche fra piano di ripresa del sensore ed illuminazione solare), sia, appunto, dalle condizioni atmosferiche e dalla tipologia del terreno.

Tra gli altri, il c.d. *6S - Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (VERMOTE ET AL., 1997, cit. in FAVRETTO, 2006), corregge l'immagine dalla diffusione di Rayleigh e Mie, sulla base di una simulazione delle condizioni

atmosferiche al momento della presa. Vengono stimati a tal fine l'assorbimento e la diffusione, ma anche gli effetti delle loro interazioni. I parametri necessari sono: le geometrie relative agli angoli formati dal sole e dal vettore (l'angolo fra zenith del satellite e zenith del sole: *solar zenith angle*); le componenti gassose dell'atmosfera, la composizione e la concentrazione di aerosol, le condizioni di visibilità e di spessore ottico dell'atmosfera (*optical thickness*³⁸); l'intervallo spettrale; caratteristiche relative al suolo (altimetria, valori di riflessione di determinati oggetti c.d. *riflettori standard*³⁹).

³⁸ Caratteristica che determina, per ciascuna lunghezza d'onda, l'attenuazione della radiazione ad opera delle diffusioni di Rayleigh e Mie e dell'assorbimento dei gas (LECHI, 2002)

³⁹ Bersagli con caratteristiche particolari adoperati per dedurre le proprietà ottiche dell'atmosfera o i componenti dell'effetto atmosferico.

4. CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI PER L'ANALISI DEL *LAND COVER*.

La classificazione delle immagini satellitari rientra nel più vasto campo dell'elaborazione digitale delle immagini (*digital image processing*), ossia l'insieme delle procedure eseguite su di un'immagine per trasformarla allo scopo di estrarne le informazioni riguardanti gli oggetti in essa rappresentati. La messa a punto di procedure automatiche di interpretazione (come quelle di classificazione, vedi sotto) si rivela così necessaria per ottenere informazioni a un tempo tempestive ed esaustive sui fenomeni oggetto d'analisi.

Un'immagine digitale (come già accennato, vedi sopra: nota 21) si definisce come un'insieme di elementi discreti organizzati per righe e colonne: una matrice. Ad ognuno di tali elementi, detti *pixel*, è associato un numero digitale (DN: *digital number*, intero, positivo e discreto) che rappresenta la radianza media misurata su una cella elementare di risoluzione (l'elemento inscindibile utilizzato per rappresentare la realtà al suolo). Se per misurare la radianza, ad esempio, si usasse un solo bit, si potrebbero rappresentare solo due livelli di radianza (0-1), mentre con 8 bit è possibile rappresentare 256 livelli di radianza. Per ogni pixel di un'immagine satellitare saranno presenti dunque tanti DN quante sono le bande spettrali del sensore.

Scopo fondamentale dell'analisi e del processamento delle immagini satellitari è la produzione di cartografia tematica delle superfici investigate. Per realizzare tale cartografia tematica è necessario classificare il territorio in classi discrete corrispondenti a tipizzazioni omogenee del dato reale al suolo, ossia della copertura del suolo.

Un primo approccio è comunque costituito dall'interpretazione visiva delle immagini (vedi sopra: par. 3.1); in seconda istanza, per utilizzare le informazioni contenute in ciascuna banda spettrale, si ricorre a procedure di riconoscimento delle configurazioni spettrali tramite appositi algoritmi che classificano nell'immagine satellitare le classi di superfici esistenti al suolo.

L'obiettivo principale delle procedure di classificazione è di suddividere tutti i pixel di un'immagine in classi o temi di copertura del suolo (LILLESAND E KIEFER, 1999).

Come già accennato, ogni pixel delle immagini telerilevate è caratterizzato infatti da una firma spettrale determinata dalla riflettanza relativa alle diverse lunghezze d'onda. La classificazione effettuata su set di dati multispettrali permette di assegnare ciascun pixel di un'immagine ad una particolare classe o tema sulla base di un'analisi statistica della probabilità che un pixel appartenga ad una classe. Se tale probabilità supera un valore deciso dall'analista, il pixel viene assegnato alla classe di riferimento, in caso contrario viene considerato non assegnato (risultando così "non-classificato").

Classificare un'immagine satellitare significa applicare ad essa una procedura automatica che suddivide in categorie omogenee i pixel dell'immagine, in modo da definire la copertura del suolo o la distribuzione spaziale di un singolo fenomeno rilevato dal sensore. Il metodo di classificazione prescelto dovrebbe dipendere dal modo di considerare il pixel che compone l'immagine (FAVRETTO, 2006). Quando il pixel è un elemento isolato ed omogeneo (non divisibile) la classificazione⁴⁰ è realizzata esclusivamente sulla base delle caratteristiche spettrali del pixel (c.d. *classificazione per pixel*).

Le tecniche tradizionali di classificazione pixel si suddividono in due categorie: *unsupervised* (o senza controlli, non prevedendo l'intervento dell'analista) e *supervised* (o con controlli a terra, prevedendo l'intervento dell'analista).

4.1 Classificazione *unsupervised*.

Questa tecnica di classificazione può risultare appropriata come analisi esplorativa, in quanto permette di valutare quante classi possono essere evidenziate e quale separabilità spettrale sussista fra le stesse. Essa è

⁴⁰ Ulteriori tipizzazioni del pixel che influenzano la classificazione sono (FAVRETTO, 2006):

1. pixel isolato e non omogeneo (c.d. *pixel misto*): il pixel è composto da elementi di classi diversi che sono stati mediati per fornire i valori di radianza (DN) alle varie bande;
2. pixel omogeneo nel suo contesto di relazione posizionale con gli altri pixel; oltre alle caratteristiche spettrali dei pixel si analizzerà, ai fini della classificazione, anche la geometria delle forme discendenti da pixel contigui, ma omogenei dal punto di vista spettrale (c.d. *classificazione orientata all'oggetto*).

particolarmente utile ogni qualvolta non si abbiano soddisfacenti informazioni inerenti la copertura del suolo dell'immagine da classificare.

Tale metodologia di classificazione prescinde dalla conoscenza e designazione di aree campione (*training area*) al suolo.

Lo spazio dei dati è analizzato in modo da essere raggruppato in un certo numero di famiglie (*cluster*) esclusivamente in funzione dei valori di radianza dei vari pixel. L'assegnazione ad un determinato *cluster* varierà a seconda dell'algoritmo utilizzato. Ogni *cluster* sarà quindi costituito da pixel spettralmente simili e pertanto, probabilmente, appartenenti ad un'unica classe (Fig.4.1).

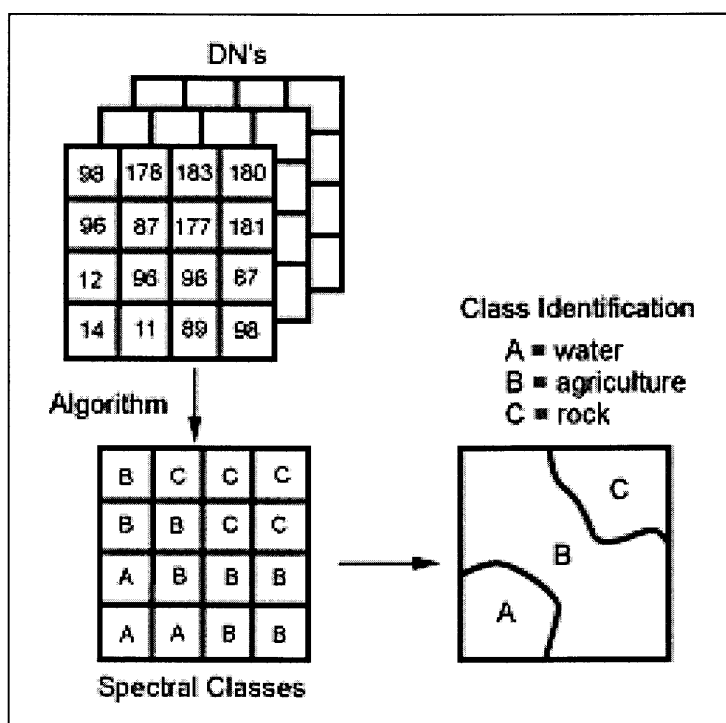


FIGURA 4.1: classificazione *unsupervised* (fonte: CCRS, 1998).

L'identità di queste classi spettrali non è però inizialmente conosciuta: solo in un secondo tempo viene definita la loro utilità informativa. E' infatti successivo compito dell'analista designare una relazione tra classi spettrali e classi di copertura del suolo⁴¹. Vi sono numerosi algoritmi di *clustering*. Tra i più diffusi classificatori il c.d. *K-means* e l'algoritmo c.d. ISODATA.

⁴¹ I risultati della classificazione *unsupervised* vengono controllati sul campo tramite campagna di rilievo GPS o confrontati con cartografia topografica, aereofotogrammetria, dati statistico-bibliografici.

4.1.1 Classificatore *K-means* o delle medie mobili.

Uno dei più comunemente usati è l'algoritmo c.d. *K-means* (o delle *medie mobili*). Con questo algoritmo l'operatore definisce il numero di *cluster* in cui devono essere raggruppati i pixel. L'algoritmo posiziona poi arbitrariamente il centro di ogni *cluster* nello spazio multidimensionale definito dalle bande su cui viene condotta la classificazione. Ogni pixel viene assegnato al *cluster* il cui vettore medio è più vicino. Dopo che tutti i pixel sono stati classificati in questo modo, i vettori medi ricalcolati per ogni *cluster* sono utilizzati per classificare i dati. La procedura continua finché non si verifica nessun cambiamento significativo nella posizione dei vettori medi di ogni classi tra due iterazioni successive dell'algoritmo. A questo punto l'operatore determina l'identità di ogni classe spettrale (LILLESAND E KIEFER, 1999).

L'algoritmo *K-means* implementa la metodologia non supervisionata di classificazione. Tale algoritmo classificatore suddivide i pixel di un'immagine telerilevata in gruppi spettralmente omogenei; l'analista determina esclusivamente il numero dei *cluster* che il classificatore *K-means* produrrà.

4.1.2 Classificatore ISODATA.

Un'altro classificatore di *clustering* è ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*, TOU AND GONZALEZ, 1974). Tale classificatore utilizza la distanza spettrale tra i pixel, iterandone la classificazione, ridefinendo i criteri per ciascuna classe e quindi classificandoli nuovamente. La distanza spettrale minima è quindi utilizzata per assegnare ciascun pixel ad un cluster.

Il classificatore funziona per implementazioni successive. Alla prima implementazione dell'algoritmo, la media degli *n-cluster*⁴² viene determinata arbitrariamente; dopo ogni iterazione dell'algoritmo una nuova media è calcolata, in base alla nuova posizione spettrale del pixel nel *cluster* (e non più in base all'iniziale calcolo arbitrario). Le nuove medie sono quindi utilizzate per definire i *cluster* nella successiva iterazione⁴³. I pixel vengono analizzati a partire

⁴² L'analista stabilisce a priori il numero massimo di cluster, stabilendo così parallelamente il numero massimo di classi.

⁴³ L'analista stabilisce inoltre il numero massimo di iterazioni.

dall'angolo superiore sinistro dell'immagine, procedendo da sinistra a destra; viene calcolata la distanza spettrale tra il pixel da assegnare e ciascun valore medio dei *cluster* e di conseguenza il pixel viene assegnato a quel *cluster* la cui media è più vicina al valore del pixel⁴⁴.

4.2 Classificazione *supervised*.

Ogni qualvolta si abbiano soddisfacenti informazioni inerenti la copertura del suolo dell'immagine da classificare è possibile utilizzare la metodologia di classificazione *supervised*. In una prima fase l'analista identifica spazialmente sull'immagine telerilevata aree c.d. *training* costituite da pixel che rappresentano la stessa copertura del suolo: tali aree *training*⁴⁵ (il più possibile omogenee e rappresentative di tutte le classi di copertura.) verranno impiegate come modello spettrale per classi corrispondenti a coperture del suolo omogenee. Successivamente – nella fase di classificazione in senso stretto – sulla base delle caratteristiche spettrali dei pixel indicati dalle aree *training*, vengono applicati degli algoritmi che classificano quelle porzioni di immagine non rientranti nelle aree *training* (Fig.4.2).

A differenza della classificazione *unsupervised*, in questa procedura si definiscono a priori le categorie informative – o classi – e si esamina successivamente la loro “separabilità” spettrale. Terminata la classificazione le classi vengono rappresentate in maniera discreta in cartografia tematica sotto forma di tematismi.

⁴⁴ Il classificatore ISODATA risulta molto simile a quello noto come *Minimum distance to mean* (vedi sotto: par. 4.2.2).

⁴⁵ Alcuni pixel possono non venire attribuiti ad alcuna delle classi scelte nella fase di implementazione dell'algoritmo classificatore. Ciò può dipendere da: scarsità di aree *training* (statistica insufficiente dei valori); mancato campionamento di tutte le classi di copertura del suolo dell'immagine telerilevata; problema dei c.d. pixel misti (pixel che appartengono simultaneamente a più classi di copertura del suolo rappresentando al loro interno differenti risposte spettrali).

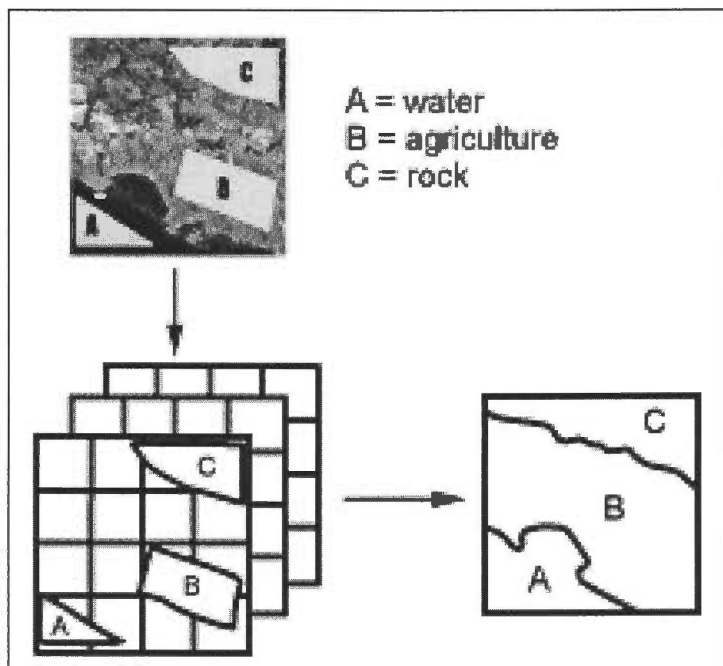


FIGURA 4.2: classificazione *supervised* (fonte: CCRS, 1998).

Gli algoritmi classificatori maggiormente utilizzati e diffusi si basano sulla statistica convenzionale: *Maximum Likelihood* [massima verosimiglianza] e *Minimum distance to mean* [minima distanza alla media].

4.2.1 Classificatore *Maximum Likelihood*.

Tale classificatore assegna ciascun pixel alla classe con maggiore probabilità condizionale (GOMARASCA, 2004).

Il pixel P è attribuito alla classe C se la probabilità di appartenenza condizionale a quella classe è superiore alle probabilità condizionali di tutte le altre classi. La probabilità condizionale per ogni classe viene calcolata tramite la media e la varianza campionaria di ciascuna classe, a condizione di avere per ogni classe una distribuzione normale⁴⁶ dei valori di riflessione per ciascuna banda. Se i valori di riflessione per determinati pixel sono molto diversi dai valori di riferimento imposti a ciascuna classe in fase di designazione delle aree *training* e

⁴⁶ Un altro classificatore il cui utilizzo è posto a condizione della presenza per ogni classe di una distribuzione normale dei valori di riflessione per ciascuna banda è il c.d. *Mahalanobis distance*. Si rimanda alla bibliografia per una trattazione esaustiva di questo algoritmo.

superano un eventuale valore di soglia deciso in fase di allestimento della procedura, tali pixel risulteranno non-classificati⁴⁷ (FAVRETTO, 2006).

Il classificatore di massima verosimiglianza si basa dunque sul presupposto che per ogni categoria i pixel siano distribuiti in modo normale. Di conseguenza ogni pixel può essere descritto dal vettore medio e dalla matrice di covarianza. Tutti i pixel della scena satellitare vengono paragonati statisticamente per determinare la loro classe di appartenenza, a seconda dei livelli di probabilità predeterminati. Il risultato consiste in alcune ben determinate “superfici”, chiamate anche funzioni di densità di probabilità, per cui ad ogni classe spettrale corrisponde una determinata funzione. In altri termini, il classificatore di massima verosimiglianza genera *ellissoidali contorni di equiprobabilità* nello *scatterogramma*⁴⁸ (Fig.4.3a e Fig.4.3b).

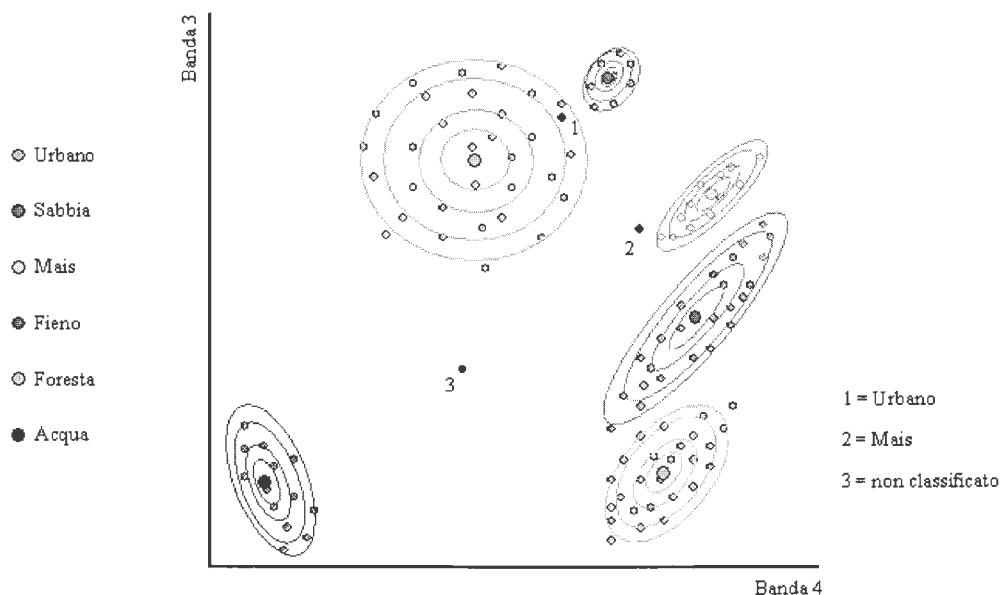


FIGURA 4.3a: classificatore *Maximum Likelihood*: visione bidimensionale (fonte: LILLESAND E KIEFER, 1999).

⁴⁷ Il *Maximum likelihood* viene per questo motivo considerato un algoritmo da “classificazione rigida” (*hard classification*).

⁴⁸ Scatterogramma (*Scatterplot*): per dati multispettrali (n-bande) è un diagramma a n-dimensioni in cui si pongono in relazione i valori assunti dai pixel nelle n-bande che si vanno a confrontare. Ad esempio (fig.4.3a e 4.3b) lo scatterogramma prende in esame la banda3 e la banda4. Lo scatterogramma è dunque la rappresentazione grafica dello *spazio spettrale*.

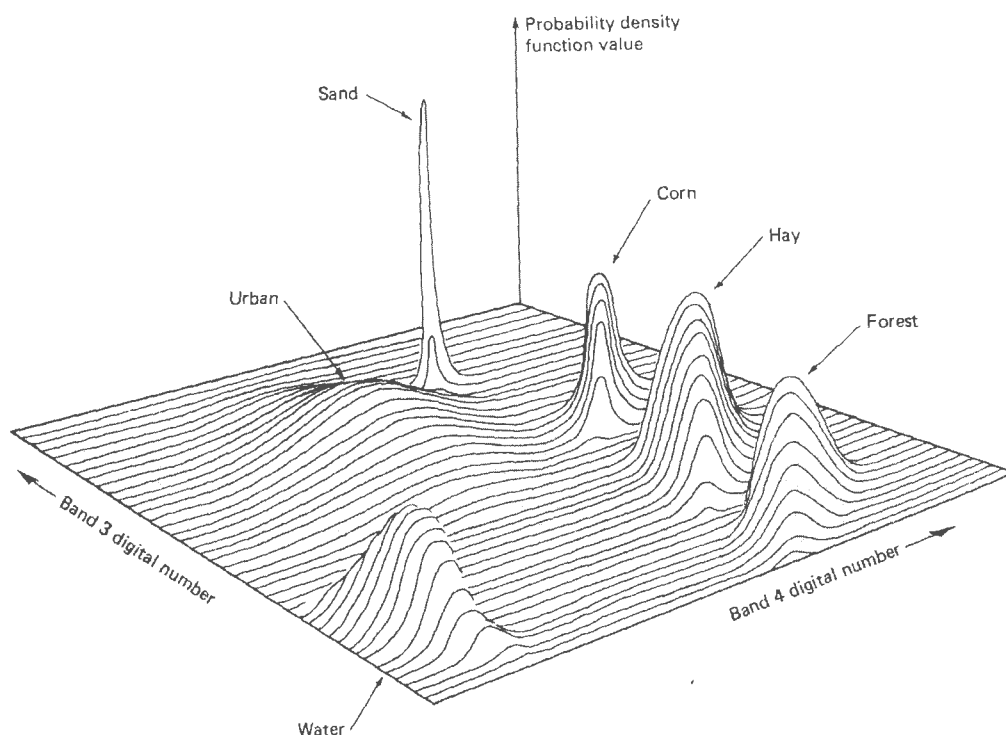


FIGURA 4.3b: classificatore *Maximum Likelihood*: visione tridimensionale (fonte: LILLESAND E KIEFER, 1999).

4.2.2 Classificatore *Minimum distance to mean*.

Questo secondo tipo di classificatore calcola i valori medi di ciascuna classe sulla base delle aree training definite dall'analista nello spazio n-dimensionale definito dalle n-bande del sensore⁴⁹. Il risultato è un vettore media delle classi con tanti valori quante sono le classi di copertura del suolo. Viene quindi calcolata la distanza euclidea di ciascun pixel dai vari centroidi delle classi definite dalle aree training ed infine i pixel vengono attribuiti alla classe il cui centroide è posto alla distanza minima. A differenza del classificatore *Maximum likelihood*, questo secondo tipo algoritmo⁵⁰ classifica tutti i pixel dell'immagine e si rivela utile quando le classi sono lontane le une dalle altre nello spazio spettrale e quando la varianza all'interno delle classi non è elevata.

⁴⁹ Un'immagine satellitare multispettrale è composta da tanti layer quante sono le bande spettrali che la compongono. Si definisce *spazio spettrale (feature space)* lo spazio cartesiano costituito dalle n-bande del sensore; ogni pixel viene considerato come un vettore n-dimensionale in tale spazio.

⁵⁰ Un altro classificatore il cui utilizzo è consigliato in assenza, per ogni banda, di una distribuzione normale dei valori di riflessione per ciascuna banda è il *Parallelepiped*. Si rimanda alla bibliografia per una trattazione esaustiva di questo algoritmo.

4.3 Accuracy assessment di una classificazione.

Ogni classificazione, qualsiasi tecnica sia stata utilizzata (*unsupervised* o *supervised*) e tramite l'utilizzo di qualsiasi algoritmo classificatore, necessita di un controllo di qualità finale da eseguirsi *ex-post*; senza tale c.d. *accuracy assessment*, una determinata classificazione non può dirsi completa. Tale controllo produce generalmente un valore di riferimento (che può anche presentarsi in termini percentuali) che ne esprime l'accuratezza, insieme ad un rapporto finale di sintesi del lavoro svolto. In tale contesto, l'accuratezza misura il livello di conformità fra le classi di copertura del suolo assegnate a ciascun *pixel* in base al processo di classificazione e la corrispondente classe che il medesimo *pixel* assume nella realtà del territorio. Diventa quindi necessario poter disporre di un ulteriore *set* di dati certi sul territorio (appunto quei valori che i *pixel* assumono nella realtà) analizzato rispetto a quello eventualmente utilizzato per identificare le cosiddette *aree training* (FAVRETTO, 2006). Va aggiunto che in nessun caso si deve controllare la bontà della classificazione eseguita con le *aree training* al posto del secondo set di dati certi. Il motivo va ricondotto all'ovvia falsa assenza di errori che tale operazione rilevarebbe (LILLESAND E KIEFER, 1999).

Un metodo ampiamente usato per valutare la classificazione prevede la costruzione della *matrice di confusione* (o degli errori, la c.d. *error matrix*). Tale matrice, quadrata per costruzione, riporta su righe e colonne le classi di copertura del suolo identificate nella classificazione (Tab. 4.1).

Dati di riferimento (<i>reference data</i>)						
Dati classificati (<i>classification data</i>)		Classe 1	Classe 2		Classe N	Tot. riga
	Classe 1	a_{11}	a_{12}		a_{1n}	$\sum_{k=1}^N a_{1k}$
	Classe 2	a_{21}				$\sum_{k=1}^N a_{2k}$
	Classe n	a_{n1}	a_{n2}		a_{nn}	$\sum_{k=1}^N a_{nk}$
	Tot. colonna	$\sum_{k=1}^N a_{k1}$	$\sum_{k=1}^N a_{k2}$		$\sum_{k=1}^N a_{kn}$	

TABELLA 4.1: matrice di confusione o degli errori (*error matrix*), utilizzata per costruire gli indicatori per la misura dell'accuratezza della classificazione (*accuracy assessment*).

Va rilevato che in senso orizzontale ci sono i dati di riferimento (*reference data*), mentre in quello verticale ci sono i dati classificati (*classification data*). I numeri delle celle rappresentano la numerosità del campione dei dati sicuri disaggregata nelle varie combinazioni di incontro riga-colonna. L'elemento della *i*-esima colonna e *i*-esima riga della matrice riporta il numero di volte che un *pixel* della *i*-esima classe nei *reference data* (realtà effettiva del territorio) è stato classificato con la *i*-esima classe nei *classification data* (classificazione realizzata dall'analista). La diagonale della stessa matrice rappresenta quindi i *pixel* classificati correttamente (appartengono alla stessa classe sia nei *reference data* che nei *classification data*).

Di seguito vengono presentati alcuni indicatori per la valutazione della classificazione sulla base della *error matrix*.

1. L'accuratezza complessiva della classificazione (*overall accuracy* - OA) sulla base del campione rappresentato nella matrice degli errori è data dal numero dei *pixel* classificati correttamente (la sommatoria delle numerosità sulla diagonale) rapportato al numero totale del campione stesso (ovvero il numero dei *reference pixel* o dati sicuri).

Formalmente, dalla matrice degli errori (Tab. 4.1) si calcola:

$$OA = \frac{\sum_{k=1}^N a_{kk}}{n}$$

ove: n: numerosità dei dati sicuri (*reference data*).

Come si può realizzare dalla sua costruzione, OA è una misura grezza della bontà della classificazione, che non specifica la distribuzione dell'errore nelle varie classi di copertura del suolo.

2. Per valutare l'accuratezza della classificazione nelle varie classi è possibile calcolare il rapporto fra ciascun elemento della diagonale principale e la sommatoria delle numerosità della sua colonna (*class accuracy* - CA).

Formalmente, dalla matrice degli errori (Tab. 4.1) si calcola:

$$CA = \frac{a_{ii}}{\sum_{i=1}^N a_{ki}}$$

3. La sommatoria delle numerosità dei *pixel* effettuata per riga rapportata a ciascun numero di *pixel* di quella riga sulla diagonale esprime invece la probabilità che un *pixel* attribuito alla classe i-esima sia classificato correttamente (*probabilità della classe* - PC)⁵¹.

Formalmente, dalla matrice degli errori (Tab. 4.1) si calcola:

$$PC = \frac{a_{ii}}{\sum_{i=1}^N a_{ik}}$$

4. Un altro indicatore molto usato prende il nome di *coefficiente kappa* (*kappa statistics*). Esso si calcola con la seguente formula (sempre facendo riferimento alla matrice di Tab. 4.1):

⁵¹ Generalmente in bibliografia la *class accuracy* viene anche denominata *Producer's accuracy*, mentre la *probabilità della classe* *User's accuracy* (CAMPBELL, 1996).

$$K = \frac{N \sum_{k=1}^N a_{kk} - \sum_{i=1}^N a_i + a_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^N a_i + a_{+i}}$$

ove: N numerosità complessiva della matrice degli errori;

a_{kk} sono gli elementi della diagonale;

a_{+i} è la somma degli elementi della riga i;

a_{+i} è la somma degli elementi della colonna i.

Il valore del coefficiente K può oscillare tra 0 e 1. Valori bassi indicano una rispondenza nulla fra i dati sicuri e quelli classificati. Valori alti il contrario. Generalmente un valore pari a 0.75 o superiore indica un risultato da buono a eccellente mentre uno pari o minore a 0.4 un risultato scarso (FAVRETTO, 2006).

Il coefficiente K viene spesso usato per confrontare classificazioni eseguite con algoritmi diversi. Per un confronto sensato va tuttavia consigliato di mantenere le stesse categorie nelle classificazioni che si confrontano.

E' ulteriormente possibile definire le numerosità al di fuori della diagonale: *errori di omissione e commissione* (GOMARASCA, 2004, CAMPBELL, 1996). I primi sono il risultato di una *non assegnazione* dei *pixel* alla classe corretta da parte dell'algoritmo classificatore (le colonne della matrice meno l'elemento sulla diagonale); i secondi sono invece il risultato di una assegnazione dei *pixel* alla classe sbagliata (sono le righe della matrice meno l'elemento sulla diagonale).

4.4 Analisi di controllo delle differenze (*Change Detection*).

L'utilizzo di immagini telerilevate a medio-alta risoluzione spaziale e della loro successiva classificazione si rivela particolarmente utile per l'analisi diacronica del territorio e, più in particolare, nell'analisi delle dinamiche di sviluppo e di trasformazione - sia di origine antropica che di origine naturale - del territorio stesso. L'utilizzo di dati telerilevati permette inoltre un'aggiornamento continuo delle fonti cartografiche e statistico-bibliografiche ufficiali (BAIOCCHI, LELO, 2003).

L'utilizzo dell'analisi diacronica di controllo delle differenze assume un'importanza rilevante sia ai fini della valutazione quali-quantitativa della situazione di un dato territorio, sia come strumento di monitoraggio temporale e di pianificazione temporale.

In paesaggio è infatti costituito da un mosaico di differenti tipi di copertura del suolo, costituito da un insieme finito di *patch* [tessere] collegate tra loro, la cui disposizione spaziale risponde a motivi di natura ecologica, contestualizzabili all'interno di una struttura (*pattern*) spaziale (SMIRAGLIA ET AL., 2002). Un'analisi multitemporale contribuisce dunque ad una visione olistica del territorio, fornendo strumenti ed elementi utili per una corretta lettura delle origini del paesaggio attuale e delle sue vicissitudini. Lo studio dei rapporti che l'uomo ha instaurato nel tempo con le risorse produttive naturali presenti in un dato territorio, permette di individuare quei fattori che mantengono un'influenza significativa e che costituiscono gli elementi determinanti di un paesaggio. Tutto questo permette di comprendere le dinamiche in atto in un determinato territorio, consentendo così interpretazioni utili alla pianificazione territoriale.

Il cambiamento delle attività antropiche genera dunque trasformazioni temporali nell'assetto di un territorio. L'*analisi di controllo delle differenze*⁵² (*change detection*) è quindi, sinteticamente, il processo attraverso il quale vengono comparate informazioni di periodi diversi per determinare la localizzazione e la natura dei cambiamenti nel tempo (CARRANZA ET AL., 2002).

4.4.1 Tecniche di *change detection*.

Le differenti tecniche di *change detection* rientrano nel più vasto campo delle *trasformazioni multispettrali* di immagini satellitari (vedi sopra: nota 18), nello specifico in quelle inerenti due o più immagini della stessa area acquisite in periodi temporali differenti. In generale le trasformazioni di immagini producono una nuova immagine da due o più fonti che pone in evidenza particolari aspetti o proprietà, altrimenti non enfaticabile dalle due – o più – fonti considerate separatamente.

⁵² Con tale denominazione in FAVRETTO (2006), altrimenti denominata *analisi multitemporale*.

Le diverse tecniche di *change detection* possono raggrupparsi in due macro-categorie (SINGH, 1989): *pre-classification comparison* [analisi pre-classificazione] e *post-classification comparison* [analisi post-classificazione].

4.4.1.1 *Pre-classification comparison.*

Tali procedure sono costituite da analisi simultanee di dati telerilevati multitemporali non classificati (*image-to-image*). L'analista deve conoscere a priori il criterio con cui interpretare e successivamente elaborare i differenti dati sorgente.

Una tecnica di *change detection* appartenente alla categoria della *pre-classification comparison* è la c.d. *image subtraction*⁵³ [sottrazione d'immagine], basata su operazioni aritmetiche di dati telerilevati. Due immagini precedentemente coregistrate⁵⁴ vengono utilizzate sottraendo i valori di riflettanza dei pixel di una di esse ai valori di riflettanza dei pixel della seconda, ed aggiungendo un valore costante di riflettanza; il risultato sarà dato da un'immagine-differenza. In tale immagine i pixel – dunque le aree da questi costituiti – dove non ci sarà stata differenza dei valori di riflettanza (conseguentemente nessun cambiamento di copertura del suolo) avranno un valore pari al valore della costante di riflettanza. Le aree invece dove si saranno verificati dei cambiamenti di copertura avranno invece dei valori maggiori o minori del valore della costante di riflettanza. La formula è la seguente (JENSEN, 1996):

$$D_{ijk} = BV_{ijk}(1) - BV_{ijk}(2) + c$$

ove: D_{ijk} = cambiamento (*difference*) riflettanza pixel;

⁵³ Tale tecnica è solo una di quelle – come la *image regression* e *image ratioing* – che rientrano nell'insieme delle c.d. *image algebra*. Si rimanda alla bibliografia per un approfondimento in tal senso (DEER, 1995 e JENSEN 1996).

⁵⁴ Per analizzare immagini multitemporali pixel per pixel, le matrici dei pixel di ogni immagine devono essere coincidenti. Il procedimento che rende possibile tale coincidenza è noto come *coregistrazione*. Per tale procedura l'assegnazione di un sistema di coordinate non è sempre condizione necessaria: la coregistrazione necessita di ortorettificazione (o georeferenziazione) esclusivamente se una delle due immagini è stata precedentemente ortorettificata (o georiferita) (ERDAS, 1999).

$BV_{ijk}(1)$ = riflettanza (*brightness value*) al tempo 1

$BV_{ijk}(2)$ = riflettanza al tempo 2

c = costante

i = numero di linea

j = numero di colonna

k = numero di banda

Lo svantaggio di tale approccio (nonché possibile fonte di errori) risiede nella difficoltà di stabilire a priori un valore costante (c) di riflettanza che funga da soglia del cambiamento, per porre in evidenza il cambiamento stesso.

4.4.1.2 Post-classification comparison.

Tali procedure sono invece costituite da analisi comparative di classificazioni prodotte indipendentemente e ricavate da differenti dati telerilevati multitemporali (*map-to-map*, in quanto oggetto di questo tipo di analisi sono dati discreti). In questo caso però, uno degli svantaggi di tale approccio (e possibile fonte di errori), risiede nel fatto che i cambiamenti possono risultare da differenti, non-omogenei od incorretti risultati di classificazione: la bontà di tale metodologia è dunque fortemente dipendente da una classificazione accurata. Per contro tale approccio, utilizzando dati discreti, è utilizzabile indifferentemente con immagini rilevate da qualsiasi sensore.

L'immagine risultante sarà un'immagine dove i nuovi valori – i valori del cambiamento – saranno restituiti se il cambiamento sarà presente, mentre un valore nullo sarà restituito per quei pixel rimasti immutati.

4.4.2 Caratteristiche delle immagini satellitari utilizzate per la change detection.

Allorché si necessita di effettuare un'analisi di controllo delle differenze è necessario selezionare le immagini satellitari in funzione degli scopi di tale analisi ed operare su di esse la pre-elaborazione dei dati (vedi sopra: cap. 3). Le immagini telerilevate utilizzate per le analisi multitemporali devono essere pre-elaborate in maniera tale da raggiungere un'omogeneizzazione spaziale, spettrale

e radiometrica. Così facendo le uniche differenze rilevate saranno esclusivamente quelle reali della copertura del suolo.

Generalmente maggiore è la risoluzione spaziale di un'immagine satellitare e più accurata sarà la *change detection*, in quanto sarà maggiormente accurata la localizzazione geografica e la quantificazione del cambiamento. Una maggiore risoluzione spaziale inoltre porta ad una maggiore accuratezza nell'identificazione delle *training area* e quindi della classificazione conseguente. Le immagini oggetto di comparazione multitemporale devono avere la stessa risoluzione radiometrica. In caso contrario è necessario effettuare un c.d. *histogram match* o convertire i DN in valori assoluti di radianza⁵⁵.

Come nel caso della risoluzione spaziale, anche quella spettrale si rivela necessaria per un valido riconoscimento sull'immagine satellitare delle *training area*, per una successiva classificazione accurata e, dunque, per una valida *change detection*.

Le differenze della copertura vegetativa del suolo infine, possono essere conseguenza sia di un effettivo cambiamento quali-quantitativo, ma anche risultanti da variazioni stagionali. Per evitare gli effetti di quest'ultima natura è necessario selezionare immagini acquisite in anni differenti e conseguenti, ma riferite allo stesso periodo di crescita della vegetazione. Analoga considerazione vale per le differenze di copertura delle aree agricole, soggette ad interventi antropici.

⁵⁵ Si rimanda alla bibliografia per un approfondimento in tal senso (FAVRETTO, 2006).

II PARTE

**IL CASO APPLICATIVO: L'AREA
TRANSFRONTALIERA
DI GORIZIA – NOVA GORICA**

5. AREA DI STUDIO.

5.1 La regione transfrontaliera di Gorizia–Nova Gorica–Šempeter-Vrtojba.

L'area oggetto di studio è costituita dal Comune di Gorizia e parte dei Comuni di San Floriano del Collio e Savogna d'Isonzo – amministrativamente appartenenti alla Provincia di Gorizia – per quanto concerne la parte italiana; per la parte slovena è invece costituita da parte delle Municipalità (*občina*) di Nova Gorica, Šempeter-Vrtojba, Miren-Kostanjevica e Brda - amministrativamente appartenenti alla regione della *Goriška* (Fig. 5.1).

E' stata individuata tale porzione di regione transfrontaliera in quanto ricadevano sul suo territorio l'area urbana di Gorizia–Nova Gorica–Šempeter-Vrtojba e il loro immediato retroterra, costituito da una porzione della Pianura isontina, dall'estrema porzione settentrionale del Carso isontino – delimitato dal corso del Vipacco e dalla sua valle – e, a nord dell'area urbana, della fascia subalpina del Monte Sabotino, del Collio goriziano e della *Goriška Brda*⁵⁶ [Collio goriziano sloveno].

La *Goriška* – a differenza della Provincia di Gorizia – non costituisce un ente locale territoriale, bensì una regione statistica, ossia una regionalizzazione adottata dalla *Statistični Urad Republike Slovenije* [Ufficio Statistico della Repubblica di Slovenia] ai fini della raccolta dei dati. Da un punto di vista istituzionale infatti, nella RS i livelli amministrativi sono esclusivamente due: lo Stato e le Municipalità⁵⁷, senza livelli intermedi.

La regione statistica *Goriška* costituisce dunque un valido oggetto spaziale di paragone con la Provincia di Gorizia.

E' stata inoltre individuata tale area transfrontaliera in quanto è qui che – rispetto alla Provincia di Gorizia e alla *Goriška* considerate complessivamente – si concentra principalmente la popolazione: circa 85.000 ab. per l'area urbana di

⁵⁶ *Brda*, in sloveno, traduce letteralmente il termine “Collio”.

⁵⁷ Le *občina* slovene sono spazialmente decisamente più grandi dei Comuni italiani. Nella RS è aperto un dibattito per la creazione delle regioni amministrative, ma non è ancora stato raggiunto un accordo sulla loro definizione.

Gorizia–Nova Gorica–Šempeter-Vrtojba; da parte slovena però la densità abitativa è di molto inferiore, essendo il territorio per la gran parte a vocazione naturale: 118 ab./Km² (per l'intera Municipalità di Nova Gorica) contro gli 867 ab./Km² di Gorizia (PROVINCIA DI GORIZIA, 2005).



- Comuni (IT); Občina (SLO)
- Naselje [località infracomunali] (SLO)

FIGURA 5.1: area transfrontaliera oggetto di studio.

5.1.1 L'ambiente geografico generale.

Il quadro dell'ambiente naturale dell'area oggetto di studio non è univoco – dati i criteri di individuazione esposti sopra; è possibile riscontrare i caratteri di differenti regioni naturali, generalmente non peculiari esclusivamente dell'area allo studio. D'altra parte, neanche tutto il FVG può essere inteso come regione naturale, nel senso di territorio dotato di caratteri fisici omogenei; al contrario, questi presenta una vastissima differenziazione di regioni naturali e paesaggi (dalla laguna alle Alpi⁵⁸, Fig. 5.2) non altrimenti riscontrabile né in altre regioni amministrative italiane né in Slovenia.

Intendendo il paesaggio come insieme organico e dinamico di elementi fisici e naturali, è possibile individuare le seguenti *tipologie paesaggistiche* che interessano l'area di studio (VALUSSI, 1971): *paesaggi padani e paesaggi subalpini e prealpini*. Nella prima tipologia rientra la zona della *pianura isontina*, parte dell'Alta pianura friulana; nella seconda il *Collio* (propaggine delle Prealpi Giulie Meridionali, le quali degradano lentamente verso la pianura) e il *Carso isontino* (Fig. 5.3).

⁵⁸ Questi tutti i paesaggi del FVG: lagunare (Lignano, Grado e Marano); Bassa pianura friulana (occidentale, orientale e monfalconese); Alta pianura friulana (magredi della pianura occidentale, pianura orientale e isontina), altipiani carsici giuliani (triestini, isontini e muggesi), paesaggi subalpini (colline subalpine e Collio), prealpini (prealpi carniche e giulie) e alpini (Alpi carniche e giulie) (VALUSSI, 1971).

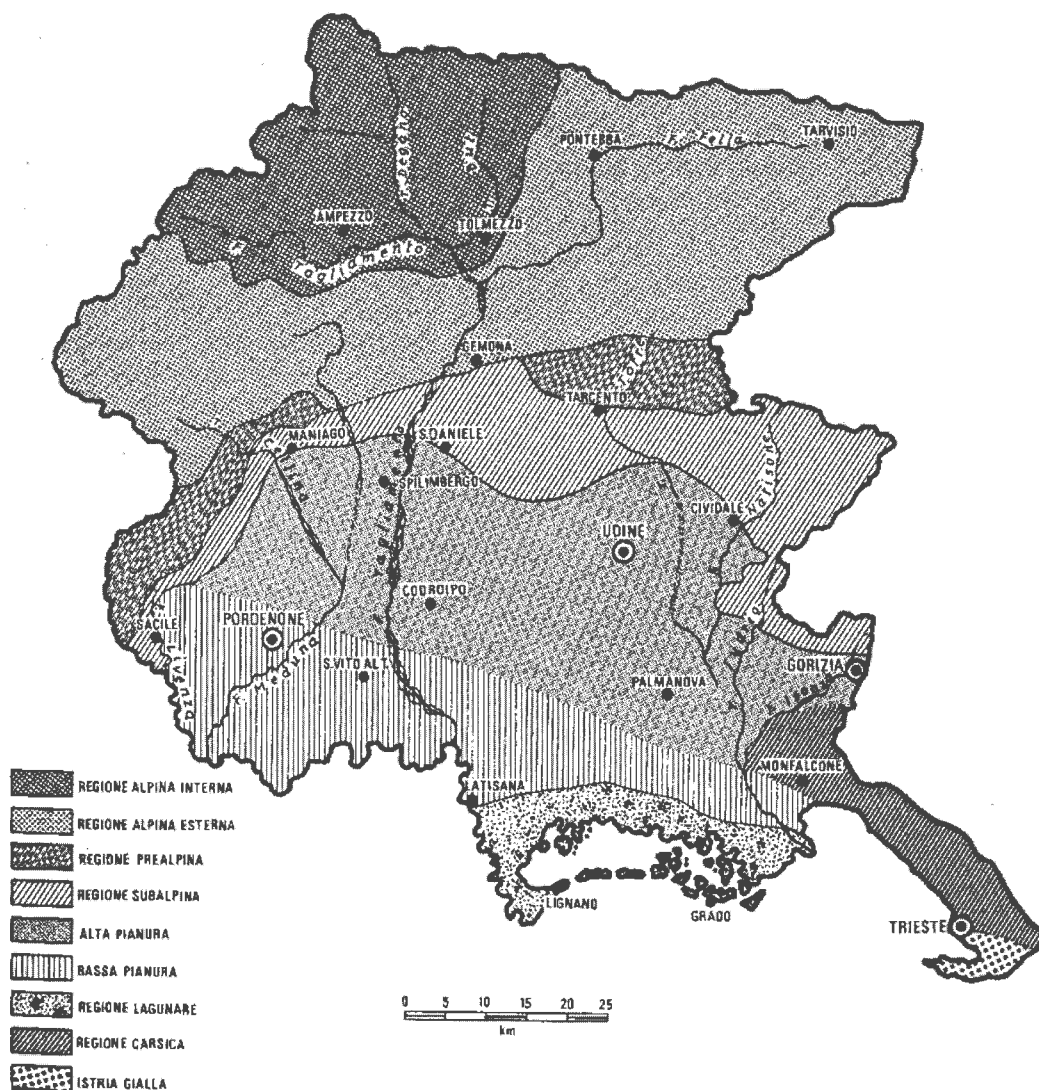


FIGURA 5.2: le zone naturali del Friuli-Venezia Giulia (fonte: VALUSSI, 1971).

L'Isontino è caratterizzato da una notevole varietà di substrati ed unità geologiche (Fig. 5.4) differentemente permeabili ed erodibili, che determinano una notevole varietà morfologica del territorio: rilievi collinari costituito da formazioni argillo-arenacee del terziario, dette *Flysch*⁵⁹, che caratterizzano il Collio; il dosso calcareo-cretacico del Monte Sabotino; rilievi prevalentemente calcareo-cretacici del Carso Goriziano (si differenzia dal Carso Triestino per la limitata estensione spaziale); la pianura pedemorenica (Alta pianura) che si estende dai rilievi verso sud, fino alla linea delle risorgive, costituita da depositi

⁵⁹ Il *Flysch* è una roccia sedimentaria di origine detritica caratterizzata dall'alternanza di arenarie, sabbie e marne. Il suolo si contraddistingue quindi per essere facilmente disaggregabile e a basso grado di permeabilità.

fluvio-glaciali ed alluvionali riferiti al periodo Würmiano e rappresentati soprattutto da ciottoli e ghiaie (MARTINIS, 1971).

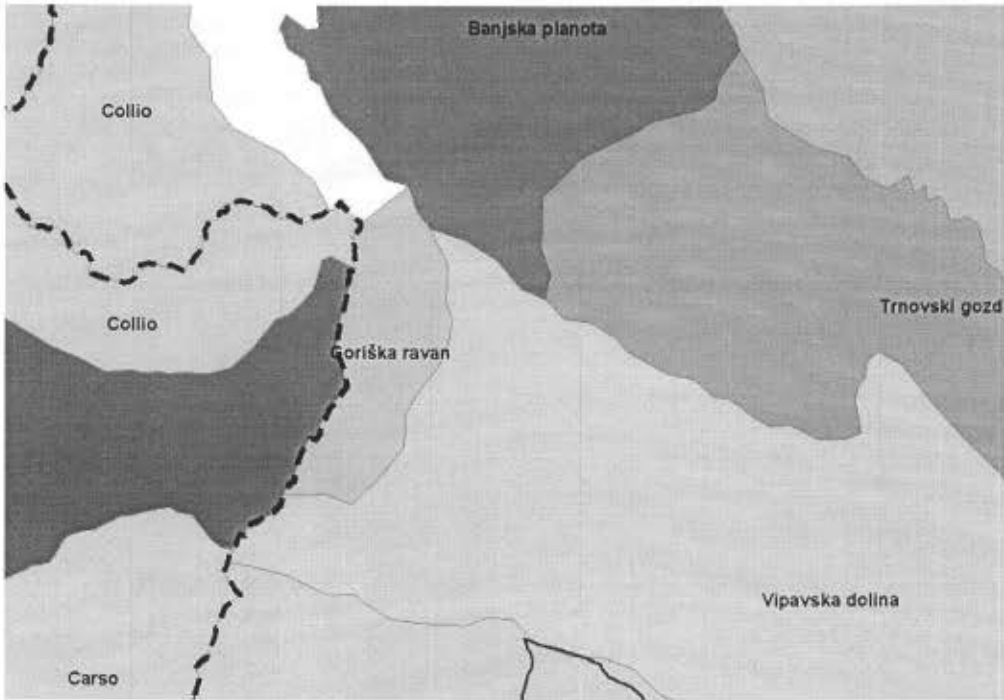


FIGURA 5.3: tipologie paesaggistiche; si noti la Valle del Vipacco (*Vipavska dolina*) e la pianura isontina di parte slovena (*Goriška ravan*) (fonte: PROVINCIA DI GORIZIA, 2005).

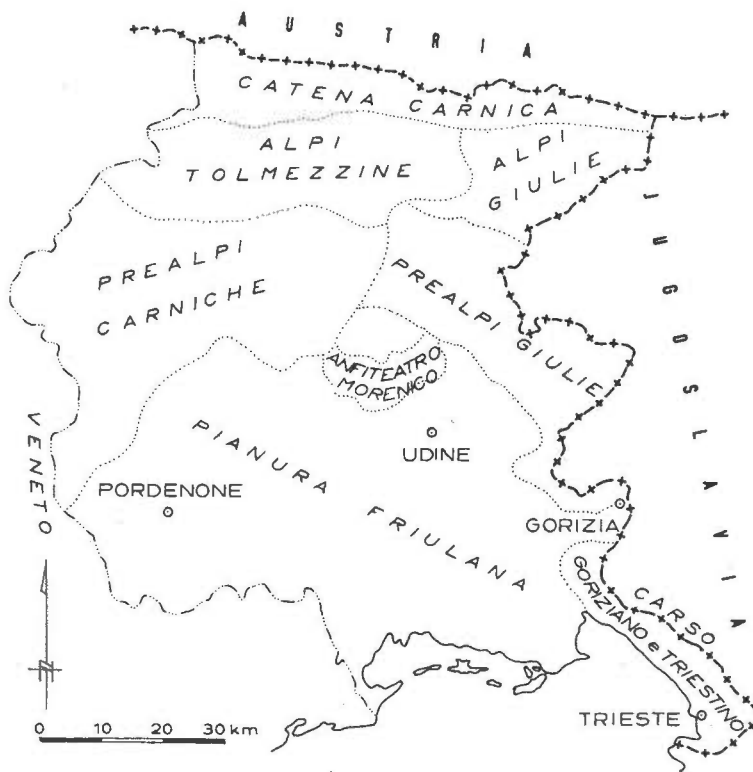


FIGURA 5.4: unità geologiche del Friuli-Venezia Giulia (fonte: MARTINIS, 1971).

Come per il resto della regione, anche nell'Isontino si distingue un'Alta pianura, caratterizzata da alluvioni grossolane conglomeratiche più o meno cementate, in cui i fiumi hanno portato molte variabili secondo l'andamento delle precipitazioni, ed una Bassa Pianura, separata dalla precedente secondo la linea delle risorgive e caratterizzata da alluvioni molto più fini, in cui il reticolo idrografico di bonifica ed i corsi d'acqua (ancora in condizioni più o meno naturali), mantengono portate notevoli anche durante i periodi meno piovosi dell'anno. Nell'Alta pianura sono presenti colture non molto esigenti dal punto di vista della disponibilità idrica, vista la grossolana tessitura del suolo e quindi l'elevata permeabilità.

Tra gli elementi che maggiormente caratterizzano il territorio in questione, avendone geologicamente modellato la morfologia, si devono aggiungere il fiume Isonzo ed i suoi affluenti, come il Vipacco.

Climaticamente l'Isontino è zona di tendenze contrastanti perché sottoposto ad influenze mediterranee, atlantiche ed est-europee, che qui giungono ad interagire e di volta in volta a prevalere le une sulle altre.

Va in particolare segnalata la variazione progressiva di piovosità che si riscontra, nel raggio di pochi chilometri, tra le zone pianiziali costiere (dell'intera provincia di Gorizia), dove è leggermente inferiore ai 1000 mm annui e quelle più settentrionali delle zone più interne dei modesti rilievi collinari del Collio, dove è circa di 1600 mm-annui (Fig. 5.5). Questa differenza è per altro accompagnata da una irrilevante variazione delle temperature medie annue, che dagli oltre 14 C° delle aree costiere, scendono ai 12 C° delle zone più interne dell'entroterra (Fig. 5.6).

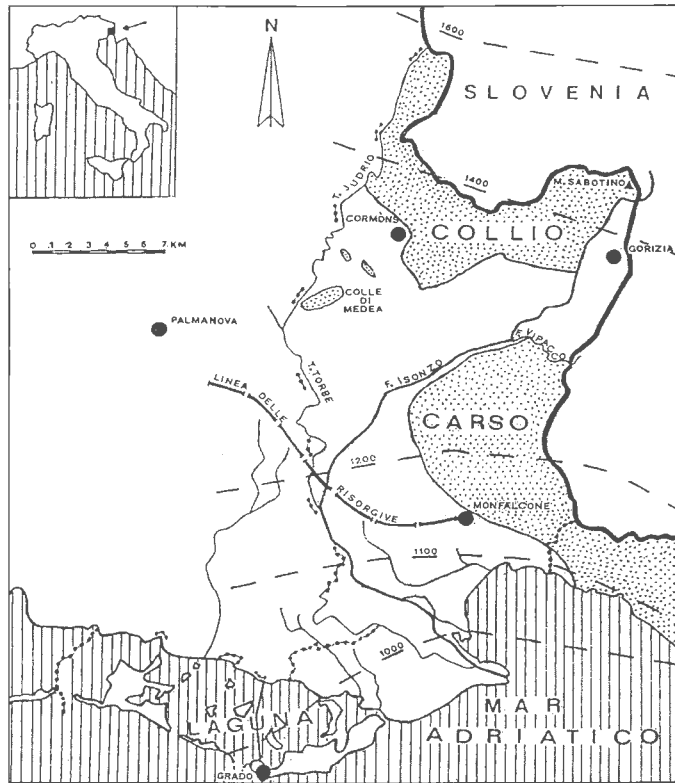


FIGURA 5.5: tavola delle isoiete annuali espresse in mm di pioggia (fonte: PROVINCIA DI GORIZIA, 2002).

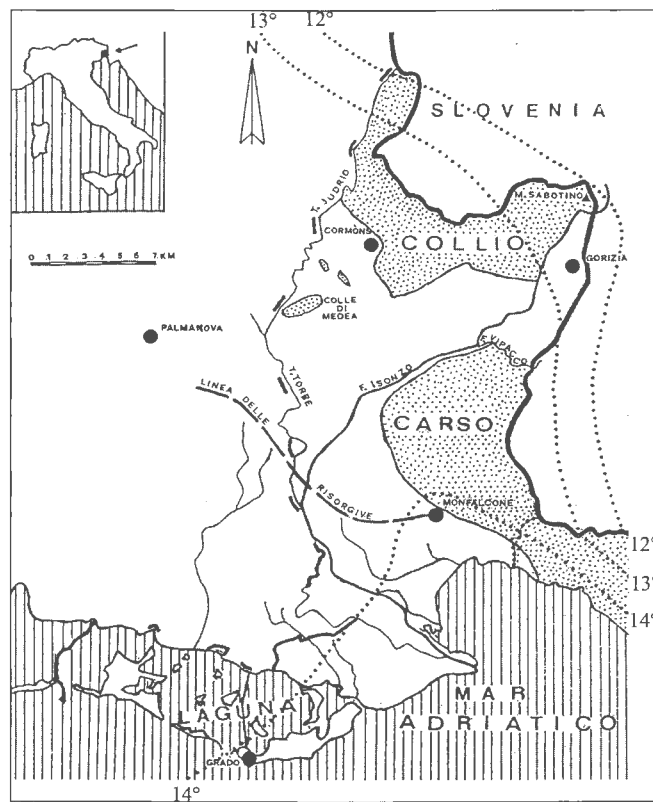


FIGURA 5.6: tavola delle isoterme annuali espresse in C° (fonte: PROVINCIA DI GORIZIA, 2002).

L'iterazione della variabilità climatica con la complessità geologica e geomorfologia, fa sì che un territorio non molto vasto come quello della Provincia di Gorizia ospiti numerosi ambienti, anche molto diversi fra loro, che nel complesso esprimono una grande ricchezza biotica; questo è valido anche per l'area transfrontaliera oggetto d'analisi.

In particolare la ricchezza naturalistica del territorio è anche conseguenza dell'ubicazione territoriale dell'isontino. Esso occupa una posizione di grande importanza bio-geografica, in quanto zona di contatto tra diversi *distretti climatici*⁶⁰: ricadono nella regione transfrontaliera (Fig. 5.7) quello carsico, quello pianiziale e quello avanalpico collinare (DEL FAVERO, 1998).

Il *distretto carsico* (o *illirico-dinarico*), caratterizzato dal substrato calcareo, ospita prevalentemente l'ostrio-querceta a scotano, intervallata da piantagioni di pino nero e pseudomacchia con carpinella.

Il *distretto pianiziale* è caratterizzato invece da vegetazione forestale in parte assai limitata, sostituita dagli insediamenti urbani e dalle colture agrarie. Nell'Alta Pianura vi è una sporadica presenza di formazioni forestali, per lo più fiancheggianti la rete idrografica, costituite da consorzi degradati rivieraschi o da lembi di quercu-carpineti. Il *distretto avanalpico collinare* ospita una vegetazione assai variegata anche se fortemente disturbata dall'attività antropica. È questa la zona per eccellenza dei rovereti collinari, dei carpineti e dei quercu-carpineti collinari, la cui estensione complessiva risulta ridotta rispetto a quella potenziale, in conseguenza dell'espandersi delle colture agrarie e degli insediamenti abitativi.

Tutto questo fa sì che, nonostante la plurisecolare presenza in loco di attività umane organizzate le quali hanno fortemente condizionato ed alterato il paesaggio vegetale naturale originale, l'Isontino sia ancora ricco ed importante sotto il profilo naturalistico e della diversità ambientale, data la sua molteplicità di ambienti naturali.

⁶⁰ Il clima del Friuli-Venezia Giulia si suddivide in sette distretti climatici cui corrispondono assetti vegetazionali differenti: endalpico, mesalpico, esalpico, avanalpico, pianiziale, carsico e mediterraneo-costiero (DEL FAVERO, 1998).

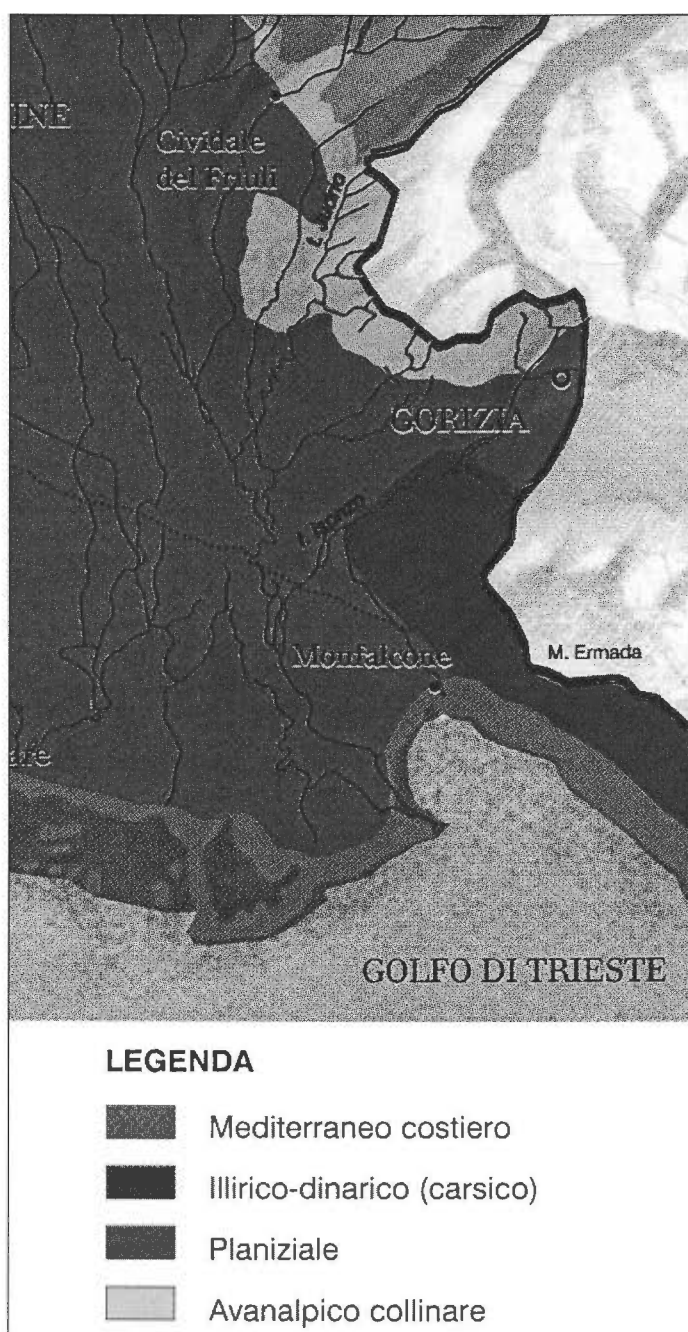


FIGURA 5.7: distretti climatici della Provincia di Gorizia (fonte: DEL FAVERO, 1998).

5.1.2 Il confine politico italo-sloveno.

Il confine politico italo-sloveno presente nella regione transfrontaliera oggetto di studio è rappresentato da quello già italo-jugoslavo ratificato dal Trattato di Pace di Parigi del 1947 e confermato – con alcune modifiche – dal Trattato di Osimo del 1975. Non è questa la sede per un’analisi dettagliata delle vicende storiche che hanno portato alla definizione dell’attuale tracciato confinario nord-orientale

italiano; si rimanda alla cospicua bibliografia in materia (tra gli altri, BATTISTI, 1979, VALUSSI, 1971 e 1972, UDINA, 1979) per una trattazione esaustiva in merito all'argomento. Occorre però in questa sede approntare una descrizione sintetica del tracciato confinario e delle sue vicende nell'area goriziana.

La questione giuliana fu analizzata da apposite commissioni delle quattro grandi potenze, le quali formularono altrettante distinte proposte di tracciato per la Conferenza di Pace (Fig. 5.8). Tra la più sfavorevole all'Italia (quella sovietica) e la più favorevole (quella statunitense, riproposizione del tracciato della Linea Wilson) venne adottata la soluzione di compromesso della delegazione francese, fondata sul criterio di lasciare dall'una e dall'altra parte del confine paritari elementi alloglotti, seguendo – ove possibile – linee naturali ed economiche (VALUSSI, 1972). Al contrario che per il Territorio Libero di Trieste⁶¹, per il confine fra il Tarvisiano e il Monfalconese – quindi anche per la porzione ricadente nell'area di studio – fu data esecuzione il 15 Settembre 1947 con il Trattato di Pace di Parigi.

⁶¹ Per un'analisi dettagliata della costituzione e delle vicende del T.L.T. si rimanda a BATTISTI (1979).

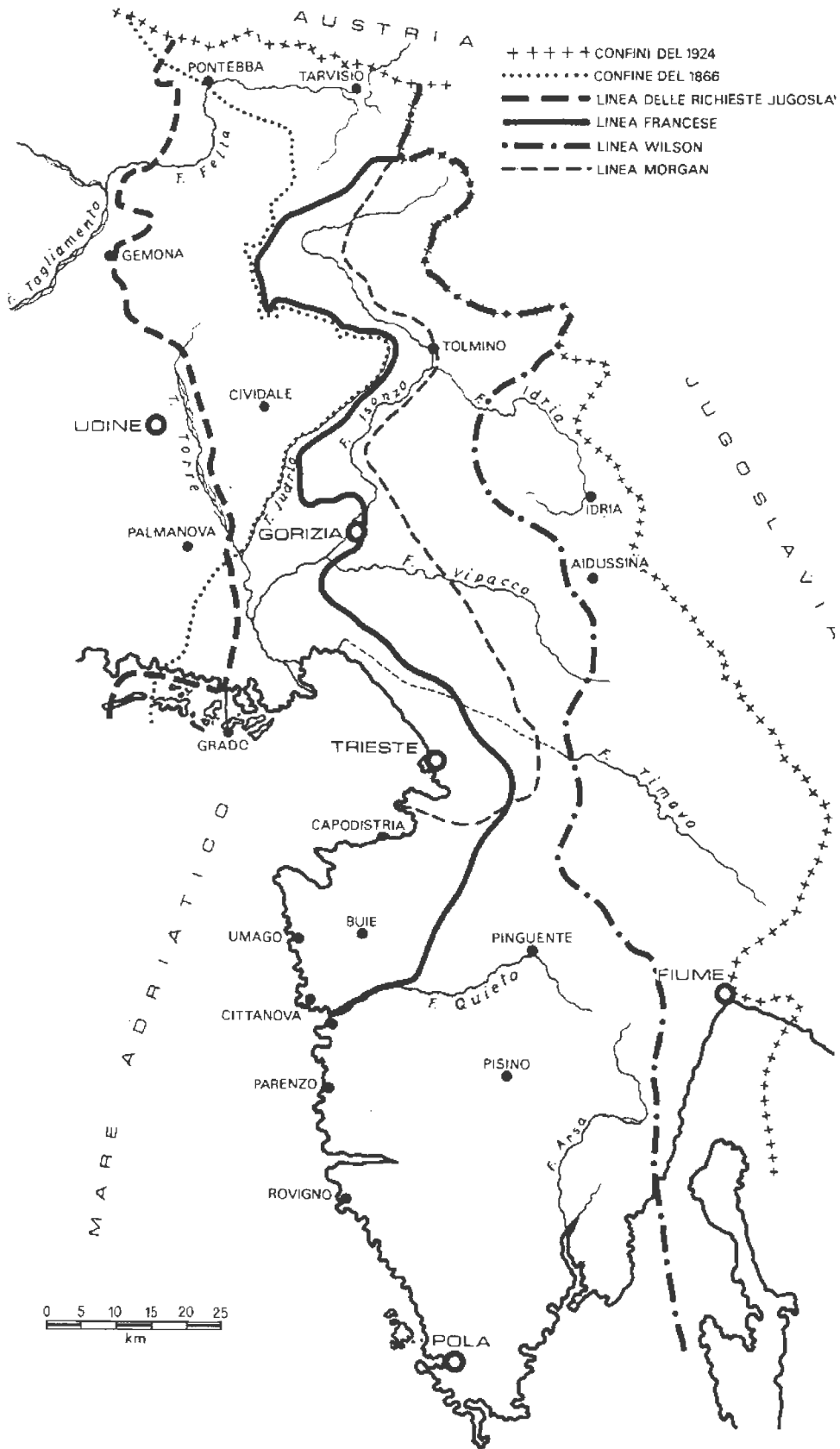


FIGURA 5.8: linee proposte per il nuovo confine italo-jugoslavo dopo la seconda guerra mondiale (fonte: VALUSSI, 1971).

Il tracciato di confine in corrispondenza dell'area di studio (Fig. 5.9) cessa la coincidenza con il tracciato storico austro-veneto del 1521 e austro-italiano del 1866, che invece caratterizza larga parte del confine nord-orientale italiano.

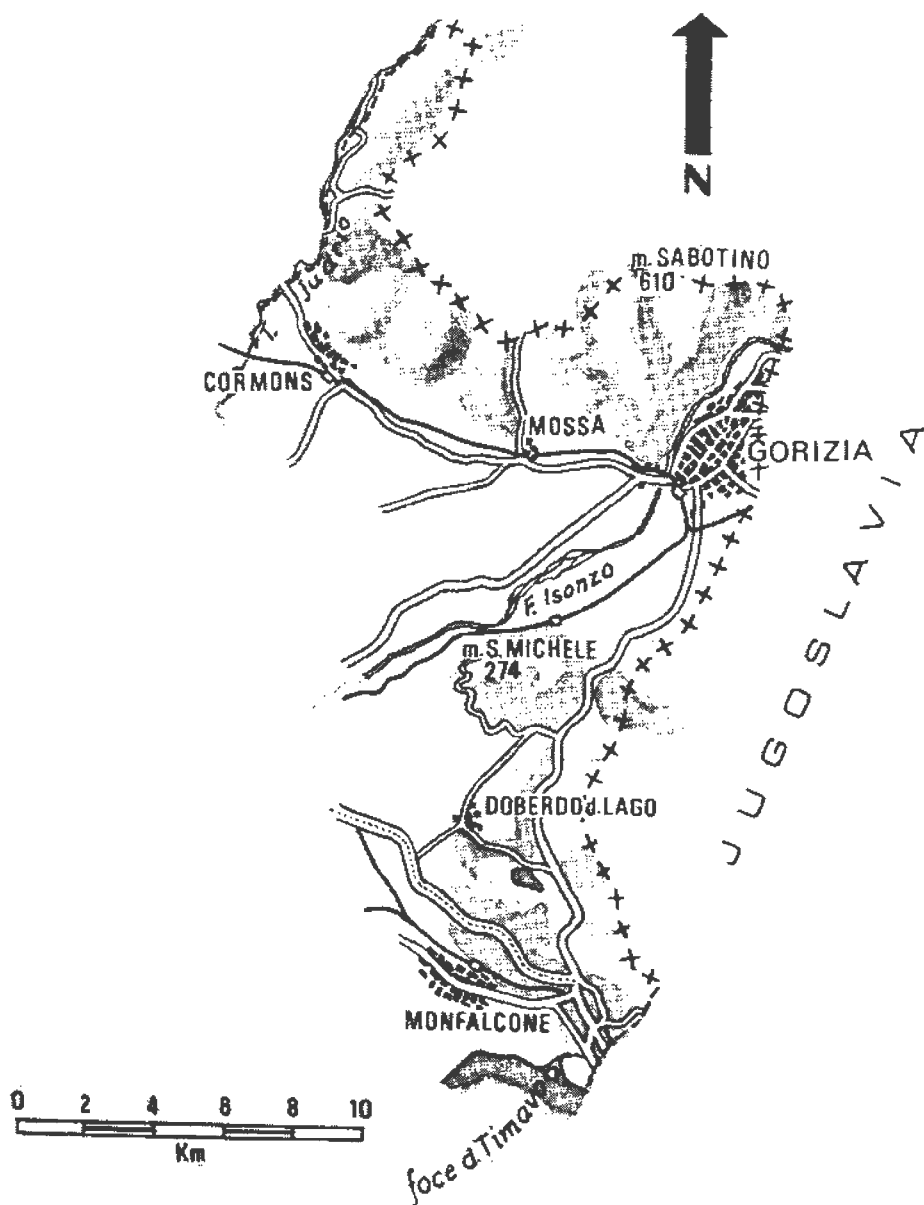


FIGURA 5.9: il confine italo-jugoslavo: settore goriziano (fonte: VALUSSI, 1971).

Il confine che attraversa la regione collinare del baso Collio si ispira prevalentemente a criteri etnici; dopo aver attraversato il torrente Versa a nord di San Floriano del Collio raggiunge la vetta del M.te Sabotino (m. 610). Dal M.te Sabotino la linea scende verso sud tagliando l'Isonzo a valle di Solkan-Salcano, che rimane alla RS. Poi corre immediatamente ad ovest della ferrovia transalpina, escludendo anche la stazione di Gorizia Montesanto (che assicurava

alla Jugoslavia il completo possesso di tale ferrovia), scendendo fino presso l'ex sobborgo goriziano di San Pietro in Campisanti – oggi località Šempeter pri Gorici, nella RS – per seguire quindi il recinto dell'ospedale psichiatrico.

Il confine dunque lambisce la città di Gorizia, privandola non solo del suo retroterra naturale costituito dalle valli dell'Isonzo e del Vipacco, ma anche di alcune frazioni suburbane. Da parte slovena, la fondazione della nuova realtà urbana di Nova Gorica, nell'immediato dopoguerra, crea una condizione inedita nei rapporti tra Gorizia e il territorio circostante. L'intenso e rapido sviluppo delle aree urbanizzate al di là del confine ha di fatto contrapposto alla città storica un nuovo agglomerato urbano, un modello di città differente, di impostazione socialista, nonostante un confine che verrà successivamente definito "il più aperto d'Europa" (BATTISTI, 1979).

A sud dell'area urbana il confine taglia a est il raccordo ferroviario tra la transalpina e la *meridionale* (linea Sagrado-Cormòns) e costeggia il cimitero della città, che rimane all'Italia. Successivamente attraversa la sezione di sbocco della valle del Vipacco ad ovest della località slovena di Vrtojba e della Municipalità di Miren-Kastanjevica (già Merna-Castagnevizza) accostandosi alla S.S. n.55 del Vallone. Conseguentemente al fatto che tale importante via di comunicazione costituisce il collegamento più rapido tra Gorizia e Trieste, essa è stata attribuita completamente all'Italia, per cui il tracciato confinario la segue lungo tutto il suo percorso a meno di 1 Km. di distanza.

5.2 Fonte dei dati.

Allo scopo di individuare l'area oggetto di studio, di eseguire la pre-elaborazione dei dati (Cap. 6), di classificare le differenti tipologie di copertura del suolo e di verificare l'accuratezza della classificazione (Cap. 7), nonché di approntare risultati e conclusioni (Cap. 8 e 9), sono stati utilizzati i dati di seguito elencati:

- Immagine satellitare Landsat 5, sensore TM (*Thematic Mapper*), acquisita nel mese di Agosto 1992;
- Immagine satellitare Landsat 5, sensore TM (*Thematic Mapper*), acquisita nel mese di Agosto 2003;

-
- *Državna Topografska Karta RS* [Carta topografica di Stato della Repubblica di Slovenia] - scala 1: 50.000 - *fogli n° 11-3400, 27-1200, 28-1200*, Geodetska Uprava Republike Slovenije - GURS [Istituto geodetico della Repubblica di Slovenia], Ljubljana, 1996;
 - *Državna Topografska Karta SFRJ* [Carta topografica di Stato della Repubblica socialista federativa di Jugoslavia] - scala 1: 50.000 - *foglio n° 316-1 - TRST*, Vojnogeografski Institut [Istituto Geografico Militare], Beograd, 1971;
 - *Državna Topografska Karta RS* [Carta topografica della Repubblica di Slovenia] - scala 1: 25.000 - *fogli n° 127 - MIREN, 128 - NOVA GORICA*, Geodetska Uprava Republike Slovenije - GURS [Istituto geodetico della Repubblica di Slovenia], Ljubljana, 1996;
 - *Temeljni topografski načrt SR Slovenija* [Pianta topografica di base della Repubblica socialista di Slovenia]- scala 1: 5.000 - *fogli n° 13-33-43-14-24-34-44 - NOVA GORICA*, Geodetski Zavod SRS [Istituto geodetico della Repubblica socialista di Slovenia], Ljubljana, 1987;
 - Carta d'Italia - scala 1: 50.000 - *foglio n° 088-GORIZIA*, Istituto Geografico Militare - IGM, Firenze, Edizione 2, 1982;
 - Carta d'Italia - scala 1: 25.000 - *foglio n° 40^A IV N.E. - GORIZIA*, Istituto Geografico Militare - IGM, Firenze, Edizione 8, 1990;
 - Carta d'Italia - scala 1: 25.000 - *foglio n° 40^A IV N.E. - GORIZIA*, Istituto Geografico Militare - IGM, Firenze, Edizione 7, 1962;
 - Carta d'Italia - scala 1: 25.000 - *foglio n° 40^A IV S.E. - RUPA*, Istituto Geografico Militare - IGM, Firenze, Edizione 7, 1963;
 - Carta Regionale Numerica (CRN) - scala 1: 25.000 - della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, *tavola 088 NE*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1988;
 - *Corine Land Cover 2000 (CLC2000) 100 m.* - versione 8/2005, European Environment Agency – EEA, 2005;
 - *Corine Land Cover 1990 (CLC1990) 100 m.* - versione 8/2005, European Environment Agency – EEA, 2005;
 - Ortofotocarta (volo 2003) - con risoluzione geometrica pari a 1 m. - di Gorizia, Nova Gorica, Šempeter-Vrtojba e Solkan;

- DEM (*Digital Elevation Model*), prodotto L4A01 del sensore ASTER - satellite Terra, Earth Remote Sensing Data Analysis Center – ERSDAC, 2005;
- 84 punti di controllo a terra da campagna di rilievo tramite GPS palmare, effettuata nel mese di Agosto 2005.

5.2.1 Cartografia CORINE Land Cover.

La cartografia della copertura del suolo rappresenta uno strumento tecnico di base particolarmente valido sia nelle analisi ambientali che nella pianificazione territoriale. Il programma CORINE Land Cover (*COOrdination of INformation on the Environment*) ha come obiettivo quello di rilevare e monitorare la copertura del suolo ad una scala spaziale compatibile con le necessità dell'Unione Europea e con le principali caratteristiche del suo territorio, con particolare attenzione alle esigenze di tutela degli ambienti naturali. Il programma propone la creazione di una base di dati omogenea, classificata secondo una legenda gerarchica e definita da nomenclatori unitari. La legenda del CORINE Land Cover (CLC) si articola su tre livelli di base; ciascuna categoria del III livello gerarchico⁶² è definita da un codice a cascata di tre cifre, una per ogni livello cui appartiene. La prima cifra si riferisce dunque al I livello, comprensivo di 5 voci generali che comprendono le principali macro categorie di copertura del suolo; la seconda cifra si riferisce al II livello, che comprende totalmente 15 voci che definiscono le sottodivisioni più importanti all'interno di ognuna delle precedenti categorie. Queste ultime sottodivisioni risultano adatte ad una rappresentazione a scala 1:500.000/1:1.000.000. La terza cifra infine, è relativa al III livello, composto da 44 dettagliate voci, adatte ad una rappresentazione in scala 1:100.000⁶³. Tale

⁶² Un IV livello gerarchico è disponibile; il numero di classi di copertura del suolo di questo livello (come quello del III livello) è variabile a seconda dello Stato cui si riferisce.

⁶³ La risoluzione spaziale del *pixel* va ricondotta alla scala spaziale. La risoluzione del *pixel* (m.) corrispondente alle varie scale può essere ricavata dall'errore di graficismo sul terreno (FAVRETTO, 2006), ottenuta dall'equazione: $\epsilon_g = \epsilon_{gc} n$ ove ϵ_g : errore di graficismo sul terreno (m.)

ϵ_{gc} : errore di graficismo sulla carta (convenzionalmente si assume essere 0.2 mm)

n: fattore di scala della carta

Le corrispondenze nella seguente tabella sono state calcolate mediante l'equazione di cui sopra, tenendo come incognita il fattore di scala della carta.

rappresentazione fino al III livello viene fornita in formato digitale *raster*⁶⁴ con una risoluzione spaziale del pixel al suolo pari a 100 m. Aumentando la risoluzione cartografica, il criterio gerarchico consente di descrivere progressivamente le categorie sfruttando il diverso grado di informazione fornito dalle diverse fonti.

Il primo programma CORINE prende il nome di CLC1990. Esso fornisce una cartografazione del *land cover* e dei suoi cambiamenti – attraverso un periodico aggiornamento – nel periodo 1986-1995. L'unità minima cartografata è di 25 ha; le fonti dei livelli tematici di copertura del suolo sono immagini telerilevate Landsat 4/5 TM georiferite. Il programma successivo CLC2000 (tuttora in corso d'opera) fornisce una cartografazione del *land cover* e dei suoi cambiamenti – attraverso un periodico aggiornamento – nel periodo 1990-2000. Le fonti dei livelli tematici di copertura del suolo sono immagini telerilevate Landsat 7 ETM+ ortorettificate⁶⁵. Il CLC2000 fornisce naturalmente – oltre alla copertura del suolo – la cartografazione delle differenze di copertura del suolo rispetto al precedente CLC1990: una *change detection* (vedi sopra: par. 4.5) implementata nel sub-programma CLC *Change*. I cambiamenti sono cartografati se le differenze tra gli oggetti sono di almeno 5 ha.

Vengono di seguito riportati i livelli gerarchici e i conseguenti nomenclatori che definiscono la classificazione tassonomica del programma CLC (Tab. 5.1).

Risoluzione del <i>pixel</i> (metri)	Scala della carta
1.100	1:5.500.000
30	1:150.000
15	1:75.000
10	1:50.000
2.8	1:14.000

⁶⁴ La cartografia CLC è disponibile anche in formato vettoriale (ESRI *Shapefile*), suddivisa per Stato di appartenenza.

⁶⁵ L'accuratezza della classificazione è aumentata data grazie all'utilizzo della nuova banda spettrale pancromatica del sensore ETM+, che fornisce una risoluzione spaziale di 15 m.

Code	Label Level1	Label Level2	Label Level3
111	Artificial surfaces	Urban fabric	Continuous urban fabric
112	Artificial surfaces	Urban fabric	Discontinuous urban fabric
121	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Industrial or commercial units
122	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Road and rail networks and associated land
123	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Port areas
124	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Airports
131	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Mineral extraction sites
132	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Dump sites
133	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Construction sites
141	Artificial surfaces	Artificial, non-agricultural vegetated areas	Green urban areas
142	Artificial surfaces	Artificial, non-agricultural vegetated areas	Sport and leisure facilities
211	Agricultural areas	Arable land	Non-irrigated arable land
212	Agricultural areas	Arable land	Permanently irrigated land
213	Agricultural areas	Arable land	Rice fields
221	Agricultural areas	Permanent crops	Vineyards
222	Agricultural areas	Permanent crops	Fruit trees and berry plantations
223	Agricultural areas	Permanent crops	Olive groves
231	Agricultural areas	Pastures	Pastures
241	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Annual crops associated with permanent crops
242	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Complex cultivation patterns
243	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Land occupied by agriculture, with areas of nat. veg
244	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Agro-forestry areas
311	Forest & semi nat. areas	Forests	Broad-leaved forest
312	Forest & semi nat. areas	Forests	Coniferous forest
313	Forest & semi nat. areas	Forests	Mixed forest
321	Forest & semi nat. areas	Scrub and/or herbaceous veg. associations	Natural grasslands
322	Forest & semi nat. areas	Scrub and/or herbaceous veg. associations	Moors and heathland
323	Forest & semi nat. areas	Scrub and/or herbaceous veg. associations	Sclerophyllous vegetation
324	Forest & semi nat. areas	Scrub and/or herbaceous veg. associations	Transitional woodland-shrub
331	Forest & semi nat. areas	Open spaces with little or no vegetation	Beaches, dunes, sands
332	Forest & semi nat. areas	Open spaces with little or no vegetation	Bare rocks
333	Forest & semi nat. areas	Open spaces with little or no vegetation	Sparsely vegetated areas
334	Forest & semi nat. areas	Open spaces with little or no vegetation	Burnt areas
335	Forest & semi nat. areas	Open spaces with little or no vegetation	Glaciers and perpetual snow
411	Wetlands	Inland wetlands	Inland marshes
412	Wetlands	Inland wetlands	Peat bogs
421	Wetlands	Maritime wetlands	Salt marshes
422	Wetlands	Maritime wetlands	Salines
423	Wetlands	Maritime wetlands	Intertidal flats
511	Water bodies	Inland waters	Water courses
512	Water bodies	Inland waters	Water bodies
521	Water bodies	Marine waters	Coastal lagoons
522	Water bodies	Marine waters	Estuaries
523	Water bodies	Marine waters	Sea and ocean

TABELLA 4.1: livelli gerarchici e nomenclatori della cartografia CLC *Land Cover*.

6. PRE-ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI: GEOREFERENZIAZIONE, ORTORETTIFICAZIONE E CORREZIONE ATMOSFERICA.

Le procedure utili a sanare difetti o deficienze dei dati telerilevati dai sensori vengono identificate come eventuali pre-elaborazioni (*pre-processing*) delle immagini stesse, ai fini delle successive elaborazioni (*processing*) propriamente dette. Le immagini satellitari utilizzate nel presente studio erano disponibili esclusivamente allo stato delle *correzioni di sistema* (livello *0R-Raw*, vedi sopra: par. 2.2), utili a sanare distorsioni strutturali o sistemiche, derivanti dalle caratteristiche proprie dei sensori. Si è rivelato dunque necessario – ai fini della successiva classificazione (vedi sotto: cap. 7) e della conseguente analisi del controllo delle differenze (vedi sotto: cap.8) – un trattamento preliminare del dato telerilevato, utile a sanare le distorsioni residue, ad omogeneizzare le due immagini telerilevate, acquisite dallo stesso sensore ma in periodi temporali differenti e successivi (1992 e 2003) e ad assegnare ad esse il medesimo sistema di coordinate metriche piane.

Le procedure di *pre-processing* applicate sono state la *correzione geometrica* e la *correzione atmosferica*. Si rimanda ai par. 3.2.1 e 3.2.2 per una trattazione esaustiva in merito alle specifiche tecniche di tali tipologie di correzioni.

6.1 Trattamenti preliminari: *subset* spaziale e georeferenziazione polinomiale.

A monte della correzione geometrica e di quella atmosferica, si è resa necessaria per entrambe le immagini Landsat 5 TM una trattazione preliminare nota come *ritaglio (subset)* spaziale, al fine di rendere le due immagini compatibili con l'estensione spaziale dell'area individuata come oggetto di studio e con le dimensioni della carta topografica IGM utilizzata per la georeferenziazione. Tale ritaglio si è rilevato indispensabile, rappresentando le immagini allo stato grezzo un'area di circa 185 Km. per lato.

La cartografia topografica IGM relativa all'area oggetto di studio (vedi sopra: par. 5.2) risultava disponibile nel tradizionale formato cartaceo e nel CRS (*Coordinate Reference System*) noto come *Sistema geodetico Nazionale (Gauss-Boaga, Fuso Est*⁶⁶); tale sistema rientra nei c.d. *sistemi di coordinate metriche piane*⁶⁷. Sono stati riconosciuti, direttamente sulla carta tramite l'utilizzo del coordinatometro, una serie di punti di coordinate metriche piane; successivamente tale carta è stata digitalizzata tramite scansione (mediante l'utilizzo di uno *scanner*⁶⁸), ottenendola così in formato digitale *raster*.

Si è proceduto quindi alla georeferenziazione tramite metodo polinomiale (vedi sopra: par. 3.2.1.1) della carta *raster* nel CRS originario (Gauss-Boaga, Fuso Est). La georeferenziazione, nello specifico, è stata effettuata stimando un sistema di equazioni polinomiali del I ordine, utilizzando come punti di controllo (GCP: *Ground control point*), quelli corrispondenti alla serie di punti riconosciuti sulla carta in formato cartaceo. Il ricampionamento è stato eseguito tramite l'algoritmo *Nearest neighbour*.

Dopo la procedura numerica, la carta IGM risulta così essere disponibile in formato digitale *raster*, georiferita nel sistema Gauss-Boaga.

⁶⁶ L'area di studio è ricompresa nel territorio del Fuso Est, le cui specifiche sono:

datum: Roma (Monte Mario) 1940;

ellissoide: Internazionale di Hayford 1924 orientato a Roma-Monte Mario;

proiezione: Gauss-Boaga (conforme cilindrica inversa)

 Latitudine di origine: 0° 0' 00''

 Meridiano centrale: 15° 0' 00'' da Greenwich

 Falsa origine: 2.520.000 m

False northing: 0 m

 Fattore di contrazione: 0.9996

Si rimanda alla bibliografia (MIGLIACCIO, 2001), per ciò che concerne le specifiche tecniche dei due fusi (Est ed Ovest).

⁶⁷ Per una trattazione più completa in merito ai sistemi di coordinate ed alle trasformazioni tra gli stessi ai fini di analisi spaziali in ambiente GIS, si rimanda alla cospicua bibliografia in materia (tra gli altri, FAVRETTO E MASTRONUNZIO, 2006, in corso di stampa).

⁶⁸ La digitalizzazione tramite scansione comporta delle trasformazioni dell'immagine stessa, quali errori di allineamento e/o posizione e trasformazioni derivanti dalla risoluzione propria dell'immagine. Errori di allineamento e posizione sono generalmente evitabili, in quanto lo scanner è isotropo (cioè ha i pixel di forma quadrata) e non introduce perciò angoli di disallineamento. Eventuali errori di allineamento (dovuti alla posizione della carta sullo scanner) possono essere minimizzati tramite applicativi grafici *consumer*. Per ciò che concerne la risoluzione propria dell'immagine, tale trasformazione viene a dipendere dalla risoluzione propria dello *scanner*, misurata in *dpi - dots per inch* [pixel per pollice]. Un numero basso di dpi comporta una bassa risoluzione geometrica dell'immagine scansionata rispetto all'originale cartacea; un'immagine acquisita ad un numero elevato di *dpi* presenta al contrario un'ottima risoluzione geometrica ma anche un elevato peso in termini di byte. Nel presente studio la scansione è stata effettuata a 600 dpi.

Conseguentemente l'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto del 2003 e precedentemente ritagliata è stata anch'essa georiferita tramite metodo polinomiale nel sistema Gauss-Boaga. La georeferenziazione, nello specifico, è stata effettuata stimando un sistema di equazioni polinomiali del I ordine, utilizzando come GCP una serie di punti riconosciuti univocamente sulla carta IGM precedentemente georiferita. Il ricampionamento è stato eseguito anche in questo caso tramite l'algoritmo *Nearest neighbour*.

L'immagine Landsat 5 TM del 2003 risultava quindi georiferita nel Sistema Geodetico Nazionale ed utilizzabile dunque come *reference map* per la successiva ortorettificazione della stessa e dell'immagine del 1992. Non è stato quindi necessario georiferirle entrambe con il metodo polinomiale: sull'immagine del 1992 verrà applicata direttamente l'ortorettificazione e successivamente – utilizzando quest'ultima come *reference map* – anche sull'immagine Landsat 5 TM del 2003.

6.2 Ortorettificazione.

Per utilizzare il metodo di ortorettificazione sono necessarie informazioni aggiuntive rispetto all'immagine di partenza: la terza coordinata (z) dei pixel, relativa alle informazioni sull'altimetria fornite da un DEM (*Digital Elevation Model*), e una serie di informazioni dettagliate relative alla ripresa del sensore. Si rimanda al par. 3.2.1.2 per una trattazione esaustiva inerente le caratteristiche dell'ortorettificazione. Occorre in questa sede ricordare che tale metodo si rileva particolarmente utile non solo per aree orograficamente irregolari – come è peraltro l'area oggetto di studio – ma anche per la *coregistrazione* puntuale di ogni singolo pixel nel caso di analisi multitemporali (come è il caso del presente studio) o nella *mosaicatura* (unione) di immagini adiacenti (PANIZZA ET AL., 2004).

L'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto del 1992 è stata ortorettificata utilizzando come *reference map* l'immagine del 2003 già georiferita tramite metodo polinomiale, sulla quale sono stati riconosciuti univocamente una serie di GCP. Selezionando – tramite l'applicativo utilizzato (ERDAS Image 8.6) - il tipo di sensore (TM) e il tipo di scena acquisita (*full scene*) è stato possibile fornire la

serie di informazioni dettagliate relative alla ripresa del sensore, necessarie alla ortorettificazione, presenti nella libreria (*library*) dell'applicativo stesso.

Il DEM utilizzato per fornire la terza coordinata (*z*) ai pixel dell'immagine è stato quello ricavato - come prodotto già elaborato (vedi sopra: par. 5.2) - dal vettore Terra, sensore Aster (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer*)⁶⁹. La risoluzione spaziale di questo DEM è di 30 m. – compatibile dunque con le immagini Landsat 5 TM – e viene fornito nel sistema di coordinate geocentrico WGS84.

Attraverso un'operazione di *fusione* con un'immagine satellitare del sensore Aster – in quanto da tale sensore viene ricavato il DEM utilizzato – è stato possibile georiferire il DEM e quindi estrapolare lo stesso DEM così georiferito, disponibile ora nel Sistema Geodetico Nazionale⁷⁰.

Il DEM è stato georiferito utilizzando come *reference map* l'immagine satellitare Landsat 5 TM del 2003; tale immagine è stata successivamente utilizzata come *reference map* anche per eseguire l'ortorettificazione dell'immagine Landsat 5 TM del 1992.

Successivamente è stata implementata l'ortorettificazione dell'immagine Landsat 5 TM del 1992 con il DEM così pre-elaborato.

Analoga procedura di ortorettificazione è stata effettuata per l'immagine Landsat 5 TM relativa all'Agosto 2003, in precedenza solo georiferita con metodo polinomiale: sono state fornite le stesse informazioni relative al sensore, è stato utilizzato lo stesso DEM pre-elaborato e, come *reference map*, è stata utilizzata l'immagine del 1992 precedentemente ortorettificata. Per entrambe le immagini l'algoritmo di ricampionamento utilizzato è stato il *Nearest neighbour*.

⁶⁹ L'orbita del vettore Terra è quasi polare ad un'altezza di 705 km, eliosincrona ossia con un attraversamento sull'equatore alle 10:30 (ora locale). Passa sopra la stessa area ogni 16 giorni. Il sensore ASTER registra immagini medio-alta risoluzione (pixel da 15 a 90 metri) in 14 diverse bande dello spettro elettromagnetico, dal visibile all'infrarosso termico. L'immagine telerilevata ricopre un'area quadrata di 60 km di lato. Il sensore ASTER consiste di tre strumenti separati, ognuno operante in una differente regione spettrale. Questi sottosistemi sono i seguenti: VNIR (*Visible and Near Infrared*, ossia regioni del visibile e del vicino Infrarosso), SWIR (*Short Wave Infrared*, regione dell'infrarosso medio) e TIR (*Thermal Infrared*, regione dell'infrarosso termico). Si rimanda alla bibliografia per una trattazione esaustiva inerente il sensore Aster. Occorre qui ricordare che nella rosa di prodotti già elaborati derivanti dalle immagini del sensore Aster è presente anche il *Digital Elevation Model*.

⁷⁰ Si rimanda alla bibliografia per una trattazione esaustiva delle caratteristiche del Datum geocentrico WGS 84 (tra gli altri ILIFFE, 2000, MIGLIACCIO, 2001, MASTRONUNZIO E KLEVISSER, 2004), delle procedure di riproiezione automatica implementate dai più comuni applicativi GIS (BAIOCCHI ET AL., 2002) e delle trasformazioni tra Datum differenti (MANZONI E CEFALO, 2003).

Le immagini Landsat 5 TM del 1992 e del 2003 si presentavano dunque coregistrate, condizione necessaria ai fini della successiva analisi del controllo delle differenze (vedi sotto: cap. 8).

6.3 Correzione atmosferica.

La correzione atmosferica è consigliata (MATHER, 1999, FAVRETTO, 2006) nel caso si vogliano effettuare analisi di controllo delle differenze di uno stesso territorio in un'ottica diacronica.

L'algoritmo utilizzato nel presente studio è stato quello implementato dall'applicativo utilizzato e ricade nel gruppo di quegli algoritmi che partono dalla stima delle caratteristiche ottiche dell'atmosfera in un dato momento e da questa procedono alla correzione. Sono necessari dunque molti parametri, sia ricavabili dai metadati del dato telerilevato (condizioni geometriche fra piano di ripresa del sensore ed illuminazione solare), sia dalle condizioni atmosferiche e dalla tipologia del terreno.

L'algoritmo implementato dall'applicativo utilizzato (ATCOR 2 in ambiente ERDAS Image 8.6), come l'algoritmo 6S (vedi sopra: par. 3.2.2), necessita di parametri quali: il *solar zenith angle*; le componenti gassose dell'atmosfera, la composizione e la concentrazione di aerosol, le condizioni di visibilità (V) e di spessore ottico dell'atmosfera (*optical thickness*); l'intervallo spettrale; caratteristiche relative al suolo (altimetria, valori di riflessione di determinati oggetti c.d. *riflettori standard*).

Tale algoritmo (al contrario del 6S di cui sopra) calcola la radianza corretta per determinati parametri – una volta che questi sono stati specificati – e può essere inoltre applicato direttamente all'immagine: l'applicativo utilizzato applica dunque la correzione atmosferica direttamente all'immagine, operando una trasformazione inversa dei risultati (presenti nella libreria dell'applicativo) derivanti dall'implementazione dell'algoritmo 6S.

Le componenti gassose dell'atmosfera, la composizione e la concentrazione di aerosol e le condizioni di *optical thickness* sono stati identificati dall'applicativo all'interno della propria *library* dopo aver fornito le caratteristiche del sensore e i dati temporali della ripresa. I valori di riflessione di determinati *riflettori standard* erano anch'essi presenti nella *library* dell'applicativo; per la correzione

atmosfera sono stati selezionati e verificati i seguenti riflettori: acqua, prato, terreno nudo e pineta.

La visibilità è stata impostata per entrambe le immagini pari a 24 Km. (fornita dall'Istituto Sperimentale Talassografico dell'Istituto Nautico di Trieste) e l'altimetria – assunto come valore quello medio ricavato dal DEM – pari a 450 m. Il *solar zenith angle* – calcolato sempre tramite l'applicativo – corrispondeva a 35° per l'immagine Landsat 5 TM del 1992 e a 34.9° per quella del 2003.

Al fine di effettuare confronti normalizzati di superfici, le immagini satellitari - una volta ortorettificata e corretta atmosfericamente - sono state ritagliate: questo processo, noto come *mascheramento* e applicato ad immagini *raster*, permette di generare una nuova immagine derivata dalla selezione dell'area oggetto di studio. Le due immagini si presentavano così perfettamente coincidenti, ritagliate secondo identici valori di coordinate metriche piane.

7. ELABORAZIONE DEI DATI TELERILEVATI: CLASSIFICAZIONE AUTOMATICA DELLE IMMAGINI SATELLITARI ED *ACCURACY ASSESSMENT*.

Le immagini satellitari precedentemente pre-elaborate (vedi sopra: cap. 6) sono state sottoposte all'elaborazione propriamente detta: scopo fondamentale del processamento (*digital image processing*) delle immagini satellitari è la produzione di cartografia tematica delle superfici investigate.

Per realizzare tale cartografia tematica è necessario classificare il territorio in classi discrete corrispondenti a tipizzazioni omogenee del dato reale al suolo, ossia della copertura del suolo. Si ricorre, a tale scopo, a procedure di riconoscimento delle configurazioni spettrali tramite appositi algoritmi che *classificano* nell'immagine satellitare le classi di superfici esistenti al suolo.

Come già accennato, ogni pixel delle immagini telerilevate è caratterizzato infatti da una firma spettrale determinata dalla riflettanza relativa alle diverse lunghezze d'onda. La classificazione effettuata sul set di dati multispettrali permette di assegnare ciascun pixel di un'immagine ad una particolare classe o tema sulla base di un'analisi statistica della probabilità che un pixel appartenga ad una classe. Se tale probabilità supera una determinata soglia, il pixel viene assegnato alla classe di riferimento, in caso contrario esso viene considerato non assegnato, risultando così "non-classificato".

In prima istanza, nel presente studio, la classificazione per pixel con metodologia *unsupervised* (vedi sopra: par. 4.1) è stata applicata alle due immagini satellitari Landsat 5 TM, acquisite rispettivamente nell'Agosto del 1992 e nell'Agosto del 2003 (vedi sopra: par. 5.2); successivamente le stesse immagini sono state sottoposte a classificazione per pixel con metodologia *supervised* (vedi sopra: par. 4.2). Dopo tali procedure – e precedentemente all'analisi di controllo delle differenze (vedi sotto: cap. 8) – si è resa necessaria la validazione della classificazione effettuata tramite l'*accuracy assessment*.

7.1 Metodologia della classificazione per pixel *unsupervised*.

La tecnica *unsupervised* è stata utilizzata come analisi esplorativa, in quanto permette di valutare quante classi spettrali possono essere evidenziate e quale separabilità sussista fra le stesse da un punto di vista spettrale.

Prescindendo dalla conoscenza e designazione di *training area* al suolo, tale tecnica risulta meno onerosa in termini computazionali e dunque più rapida della *supervised*, utilizzata successivamente nel presente studio. La classificazione *unsupervised* può fornire inoltre utili informazioni sulle classi di copertura del suolo identificabili successivamente tramite la classificazione *supervised* (MATHER, 1999).

L'algoritmo classificatore utilizzato è stato il c.d. ISODATA (vedi sopra: par. 4.1.2). Utilizzando questo algoritmo sono necessarie le specificazioni di determinati parametri: il numero di *cluster* (dunque di classi tematiche di copertura del suolo⁷¹), il numero di iterazioni dell'algoritmo e la c.d. *convergence threshold*⁷².

Entrambe le immagini satellitari Landsat 5 TM sono state suddivise in 12 *cluster*, individuando dunque 12 classi spettrali, conseguentemente ad una prima interpretazione visiva delle immagini (vedi sopra: par. 3.1.); il numero massimo di iterazioni designato è stato 20 e la *convergence threshold* pari a 0.95 (95 %)⁷³. Il risultato di una classificazione *unsupervised* è costituito esclusivamente da *cluster* di pixel spettralmente simili – non già da classi discrete di copertura del suolo - e pertanto, probabilmente, appartenenti ad una classe omogenea. E' successivo compito dell'analista designare una relazione tra classi spettrali e classi di copertura del suolo.

A tale scopo, utilizzando dati pregressi e coevi alle immagini utilizzate (c.d. *reference data*), è stato possibile stabilire la suddetta relazione ed assegnare le 12

⁷¹ Solo definendo il numero dei *cluster* si potrà implementare la transizione dal dato continuo al dato discreto, caratteristico del concetto stesso di classificazione.

⁷² La percentuale di pixel la cui assegnazione ad un determinato *cluster* resta immutata al termine di ogni iterazione. Quando tale valore di soglia stabilito dall'analista viene raggiunto, l'algoritmo cessa di operare. E' però possibile che tale valore non venga mai raggiunto; per evitare un'implementazione infinita dell'algoritmo è perciò necessario definire il numero massimo di iterazioni.

⁷³ Si rimanda alla bibliografia (GAO YAN, 2003 e ERDAS, 1999) per un'approfondimento dei criteri utili a determinare questi ultimi due parametri.

classi di copertura del suolo, simili – ma non identiche – per entrambe le immagini Landsat relative all'area transfrontaliera di Gorizia-Nova Gorica.

Per il successivo *accuracy assessment* (vedi sopra: par. 4.3) è possibile utilizzare quali *reference data* la stessa fonte dei dati utilizzati per la classificazione; fondamentale è però che il *set di dati* utilizzato da ogni fonte per la classificazione e quello utilizzato per il controllo della stessa sia *differente* (LILLESAND E KIEFER, 1999, FAVRETTO, 2006). Tale approccio è necessario quando si debbano classificare immagini satellitari temporalmente lontane in senso relativo (come nel presente studio relativamente all'immagine Landsat 5 TM dell'Agosto del 1992, vedi sotto: par. 7.5, in particolare par. 7.5.1), essendo impossibile approntare una campagna di rilievo GPS sul campo, che spesso fornisce il dato più accurato di realtà al suolo.

Tali dati sono stati naturalmente – data la diversa acquisizione temporale delle due immagini (1992 e 2003) – differenti per le due immagini.

Per l'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto 1992 sono stati utilizzati, per designare le classi tematiche, i seguenti dati⁷⁴ relativi all'area oggetto di studio:

- *Državna Topografska Karta RS* [Carta topografica di Stato della Repubblica di Slovenia] - scala 1: 50.000 - *fogli n° 11-3400, 27-1200, 28-1200*, Geodetska Uprava Republike Slovenije - GURS [Istituto geodetico della Repubblica di Slovenia], Ljubljana, 1996;
- *Državna Topografska Karta SFRJ* [Carta topografica di Stato della Repubblica socialista federativa di Jugoslavia] - scala 1: 50.000 - *foglio n° 316-1 - TRST*, Vojnogeografski Institut [Istituto Geografico Militare], Beograd, 1971;
- Carta Regionale Numerica (CRN) - scala 1: 25.000 - della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, *tavola 088 NE*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1988;
- Carta d'Italia - scala 1: 50.000 - *foglio n° 088-GORIZIA*, Istituto Geografico Militare - IGM, Firenze, Edizione 2, 1982;

⁷⁴ Per le specifiche delle fonti si veda sopra, par. 5.2.

-
- *Corine Land Cover 1990 (CLC1990)* 100 m. - versione 8/2005, European Environment Agency – EEA, 2005.

Per l'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto 2003 invece, sono stati utilizzati per designare le classi tematiche i seguenti dati:

- *Corine Land Cover 2000 (CLC2000)* 100 m. - versione 8/2005, European Environment Agency – EEA, 2005;
- 36 punti di controllo a terra da campagna di rilievo tramite GPS palmare, effettuata nell'Agosto del 2005⁷⁵.

Le classi di copertura del suolo sono state quindi denominate utilizzando i nomenclatori del programma CLC; in particolare come classi di riferimento sono state utilizzate le seguenti (anche se, come si vedrà in seguito, non è sempre stato possibile identificarle tutte).

- Corsi d'acqua (cod. 511);
- Boschi di conifere (cod. 312);
- Boschi di latifoglie (cod. 311);
- Boschi misti (cod. 313);
- Prato (cod. 231);
- Terre arabili⁷⁶ (cod. 211 e 212);
- Zone agricole con porzioni significative di vegetazione naturale (cod. 243);
- Vegetazione sparsa (cod. 333);
- Sistemi colturali complessi con edifici (cod. 242);
- Edificato urbano discontinuo (cod. 112);

⁷⁵ Si noti la più cospicua mole di dati ancillari utilizzati per designare le classi tematiche relative all'immagine Landsat del 1992: ciò è dovuto - come già accennato - alla mancanza di un dato certo e inequivocabile al suolo (c.d. *ground data*) come quello derivante da GPS e, di conseguenza, alla necessità di utilizzare una maggior quantità di fonti, ma proporzionalmente eterogenee. In merito alla campagna GPS si veda anche sotto, nota 78.

⁷⁶ Si è preferito considerare alcune classi accorpandole al livello superiore della gerarchia CLC, allo scopo di fornire una lettura maggiormente olistica della copertura del suolo. Le classi in oggetto sono: "terre arabili irrigate permanentemente" e "terre arabili non irrigate", confluite in "terre arabili".

-
- Unità industriali, commerciali, di trasporto ed aree associate⁷⁷ (cod. 121 e 122);
 - Terreno nudo (cod. 332).

7.2 Risultati della classificazione *unsupervised* delle immagini Landsat 5 TM.

Di seguito sono presentati i risultati della classificazione *unsupervised* dell'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto 1992 e successivamente dell'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto 2003: nelle Figure 7.1 e 7.3 è rappresentata l'immagine classificata, nelle Figure 7.2 e 7.4 il rispettivo istogramma e nelle Tabelle 7.1 e 7.2 le rispettive aree relative alla copertura del suolo.

⁷⁷ Inoltre, come sopra, "unità industriali e commerciali" e "strade, ferrovie ed aree associate" confluiscono in "unità industriali, commerciali e di trasporti".

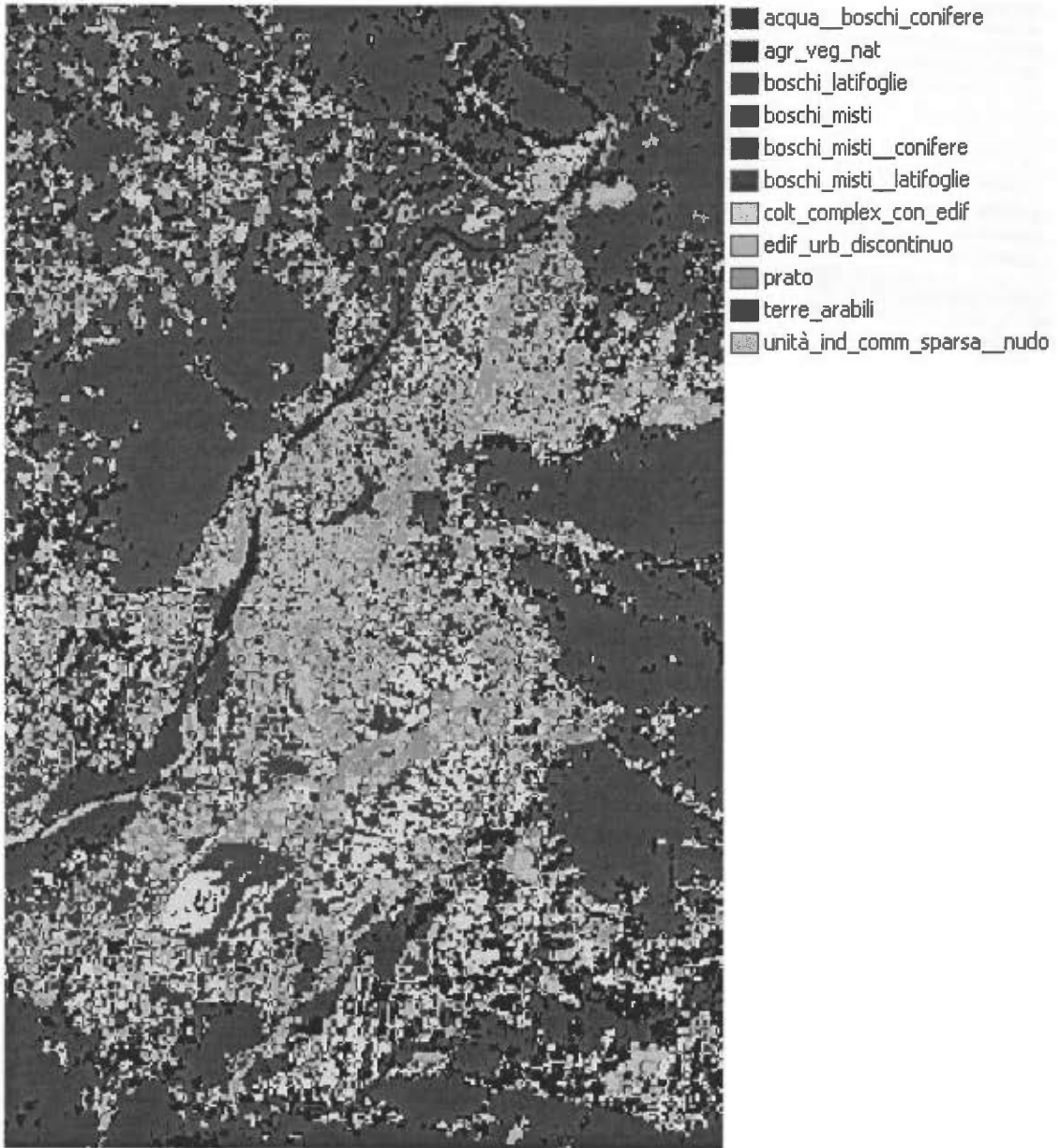


FIGURA 7.1: risultati della classificazione *unsupervised* (Landsat 5 TM – 1992).

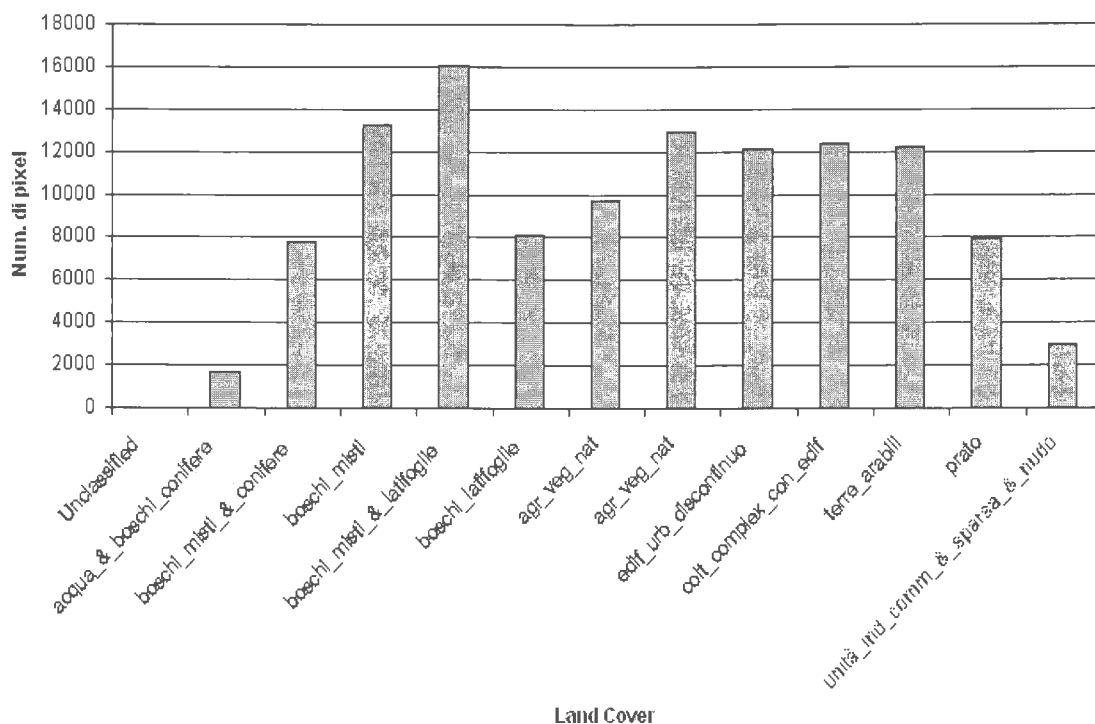


FIGURA 7.2: istogramma dell'immagine classificata con tecnica *unsupervised* (Landsat 5 TM – 1992).

Classi di <i>Land Cover</i>	Num. di pixel	Area (ha)
acqua_ & boschi_conifere	1677	150,93
boschi_misti_ & conifere	7783	700,47
boschi_misti	13282	1195,38
boschi_misti_ & latifoglie	16092	1448,28
boschi_latifoglie	8116	730,44
agr_veg_nat	9743	876,87
agr_veg_nat	12922	1162,98
edif_urb_discontinuo	12158	1094,22
colt_complex_con_edif	12342	1110,78
terre_arabili	12187	1096,83
prato	7979	718,11
unità_ind_comm_ & sparsa_ & nudo	2991	269,19

TABELLA 7.1: aree delle classi di copertura del suolo dell'immagine classificata con la tecnica *unsupervised* (Landsat 5 TM – 1992).

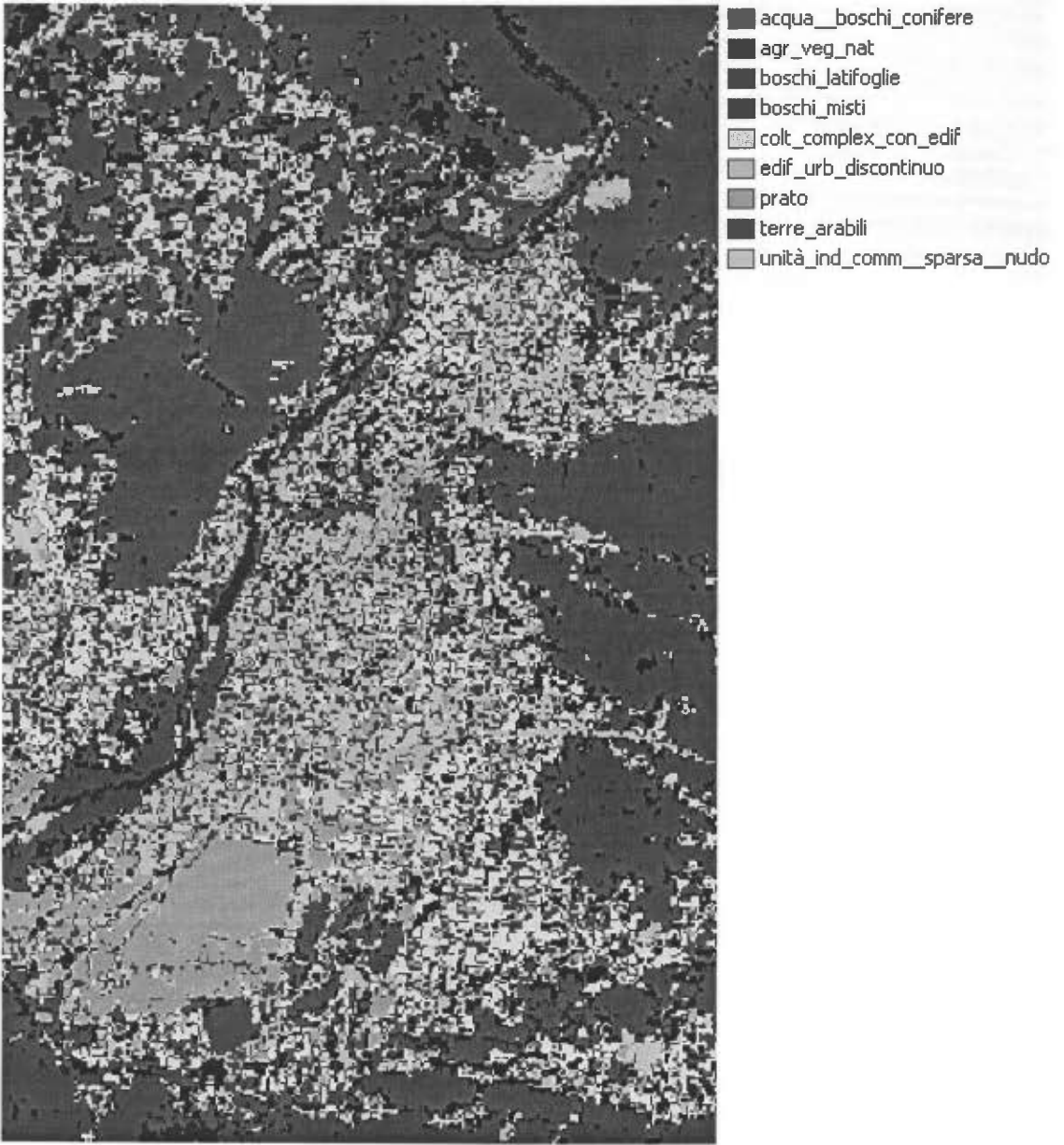


FIGURA 7.3: risultati della classificazione *unsupervised* (Landsat 5 TM – 2003).

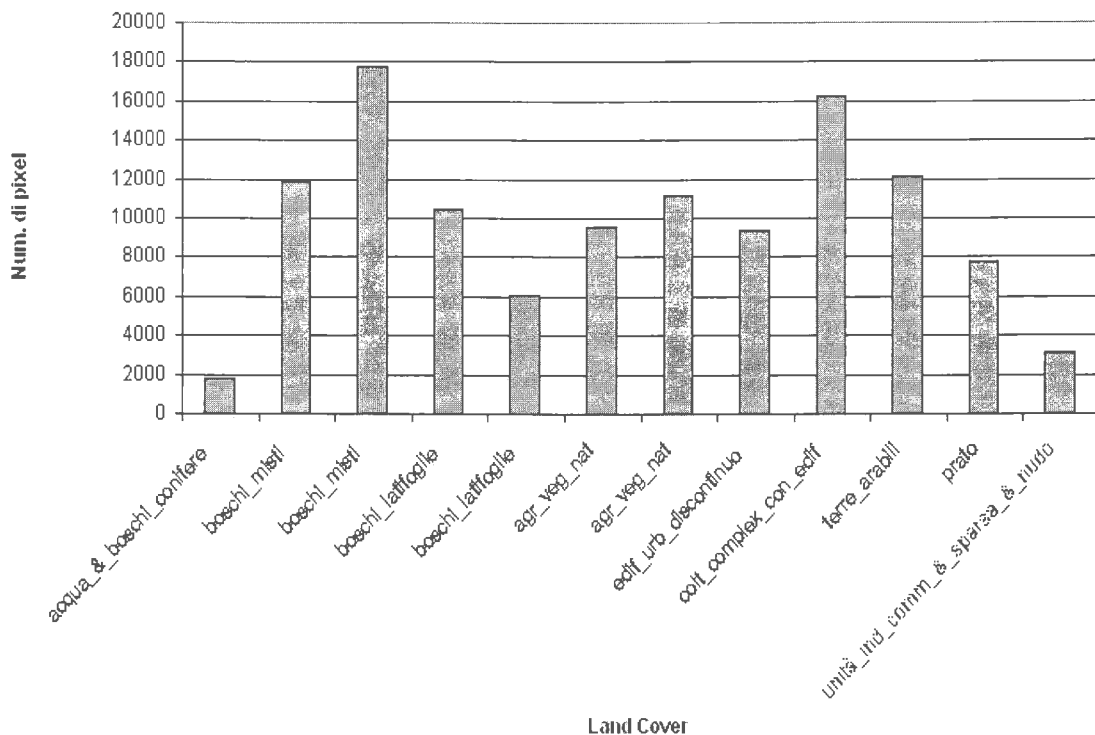


FIGURA 7.4: istogramma dell'immagine classificata con la tecnica *unsupervised* (Landsat 5 TM – 2003).

Classi di <i>Land Cover</i>	Num. di pixel	Area (ha)
acqua_ & boschi_conifere	1797	161,73
boschi_misti	11850	1066,5
boschi_misti	17786	1600,74
boschi_latifoglie	10473	942,57
boschi_latifoglie	6069	546,21
agr_veg_nat	9569	861,21
agr_veg_nat	11131	1001,79
edif_urb_discontinuo	9359	842,31
colt_complex_con_edif	16232	1460,88
terre_arabili	12115	1090,35
prato	7778	700,02
unità_ind_comm_ & sparsa_ & nudo	3113	280,17

TABELLA 7.2: aree delle classi di copertura del suolo dell'immagine classificata con la tecnica *unsupervised* (Landsat 5 TM – 2003).

In accordo con quanto detto sopra, alcune classi non sono state designate, in quanto a più classi di copertura del suolo corrispondevano un unico *cluster* spettrale ovvero, al contrario, a più *cluster* spettrali corrispondeva una sola classe

tematica. Nel primo caso ciò è dovuto al fatto che alcune tipologie di coperture del suolo non sono state separate spettralmente, in virtù della loro analoga risposta spettrale: è il caso delle classi “Corsi d’acqua” e “Boschi di conifere” (per entrambe le immagini TM 1992 e TM 2003); “Boschi misti”, “Boschi di conifere” e “Boschi di latifoglie”(TM 1992); “Unità industriali, commerciali e di trasporto”, “Vegetazione sparsa” e “Terreno nudo” (TM 1992 e TM 2003). Nel secondo caso invece, ne sono esempio le classi “Boschi misti”, “Boschi di latifoglie” e “Zone agricole con porzioni significative di vegetazione naturale” (TM 2003).

Successivamente, per ovviare alla mancata classificazione delle suddette tipologie di copertura del suolo, entrambe le immagini satellitari sono state suddivise in 20 *cluster*, individuando dunque 20 classi spettrali, ed il numero massimo di iterazioni impostato per l’implementazione dell’algoritmo è stato pari a 30. La problematica si è però presentata analoga, non permettendo una soddisfacente cartografazione della copertura del suolo dell’area transfrontaliera di Gorizia-Nova Gorica.

Si è preferito dunque non ricorrere all’*accuracy assessment* di una classificazione carente in taluni suoi aspetti e di non utilizzare, di conseguenza, le due classificazioni *unsupervised* ai fini della *change detection*; necessario è stato dunque il ricorso alla classificazione per pixel *supervised* (o con controlli a terra).

7.3 Metodologia della classificazione per pixel *supervised*.

A differenza della classificazione *unsupervised*, in questa procedura si definiscono a priori le classi tematiche di copertura del suolo e si esamina successivamente la loro separabilità spettrale. Terminata la classificazione le classi vengono rappresentate in maniera discreta in cartografia tematica sotto forma di tematismi.

Non potendo prescindere dalla conoscenza e designazione di *training area* al suolo, tale tecnica risulta maggiormente onerosa in termini computazionali e dunque meno rapida della *unsupervised* utilizzata precedentemente.

Le fasi essenziali implementate in questo tipo di classificazione sono due:

-
- identificazione spaziale sull'immagine telerilevata delle *training area* costituite da pixel spettralmente omogenei che rappresentano analogo copertura del suolo: tali aree verranno impiegate come modello spettrale per classi corrispondenti a coperture del suolo omogenee;
 - applicazione degli algoritmi che classificano quelle porzioni di immagine non rientranti nelle *aree training*.

Per entrambe le immagini satellitari Landsat 5 TM sono state individuate 12 classi tematiche di copertura del suolo, mediante la designazione di 3 *training area* per classe spettrale.

La metodologia adottata per l'identificazione delle aree *training* si è basata⁷⁸ su di una preliminare interpretazione visiva delle immagini (vedi sopra: par. 3.1.) e sull'utilizzo dei c.d. *reference data*, dati pregressi e coevi alle immagini utilizzate. Le classi di copertura del suolo sono state quindi successivamente denominate utilizzando i nomenclatori del programma CLC.

I dati di riferimento circa l'identificazione della *training area* ed i nomenclatori utilizzati sono identici a quelli utilizzati per la classificazione *unsupervised*, così come pure la fondamentale distinzione approntata tra set di dati utilizzati per la classificazione e set di dati utilizzati per l'*accuracy assessment* successivo. Si rimanda dunque al par. 7.1 per un elenco completo dei *reference data* e dei nomenclatori di copertura del suolo utilizzati.

L'algoritmo classificatore utilizzato è stato il *Minimum distance to mean*, data l'assenza, per ogni banda spettrale di entrambe le immagini Landsat 5 TM, di una distribuzione normale dei valori di riflettanza dei pixel⁷⁹; la distribuzione caratteristica è di tipo bimodale. A titolo esemplificativo di questa assenza di distribuzione normale, viene rappresentata qui di seguito la distribuzione dei valori di frequenza dei pixel per le prime 3 bande (TM1, TM2, TM3) dell'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto del 2003.

⁷⁸ Analogamente a quanto implementato sopra per stabilire la relazione *cluster*/classi tematiche per ciò che concerne la classificazione *unsupervised*.

⁷⁹ Si rimanda al par. 4.2.2 per le specifiche tecniche di questo algoritmo.

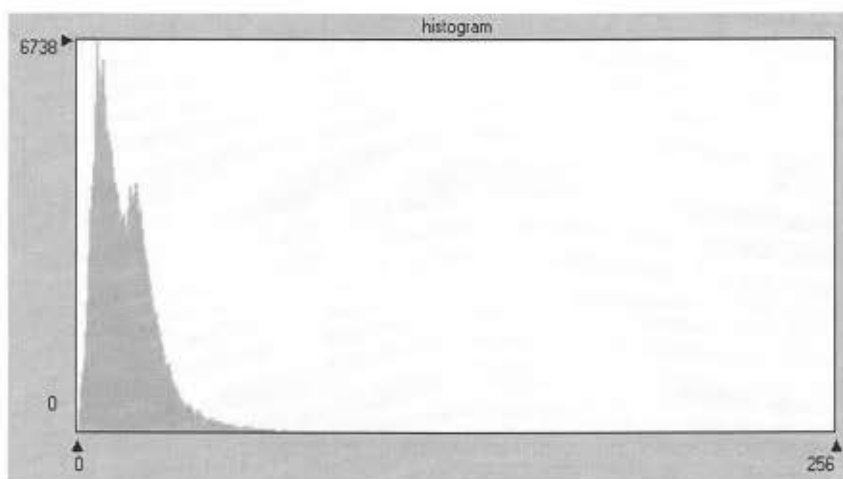


FIGURA 7.5: istogramma di frequenza della banda TM1 (2003).

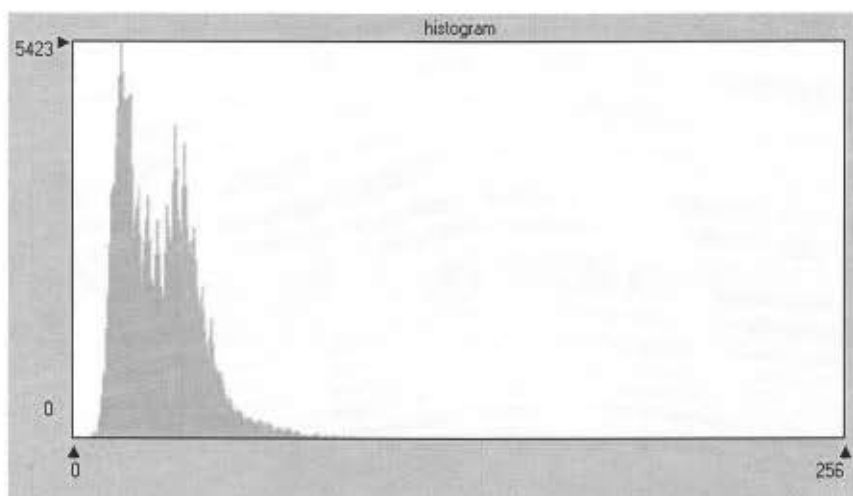


FIGURA 7.6: istogramma di frequenza della banda TM2 (2003).

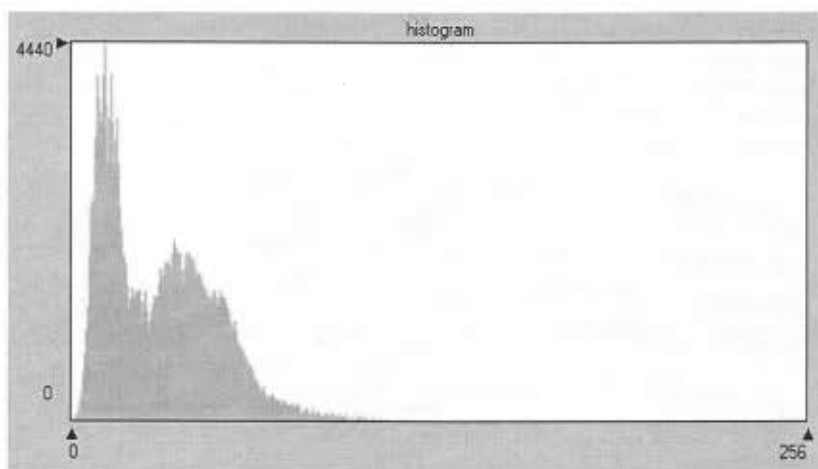


FIGURA 7.7: istogramma di frequenza della banda TM3 (2003).

7.4 Risultati della classificazione *supervised* delle immagini Landsat 5 TM.

Di seguito sono presentati i risultati della classificazione *supervised* dell'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto 1992 e successivamente dell'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto 2003: nelle Figure 7.8 e 7.10 è rappresentata l'immagine classificata, nelle Figure 7.9 e 7.11 il rispettivo istogramma e nelle Tabelle 7.3 e 7.4 le rispettive aree relative alla copertura del suolo.

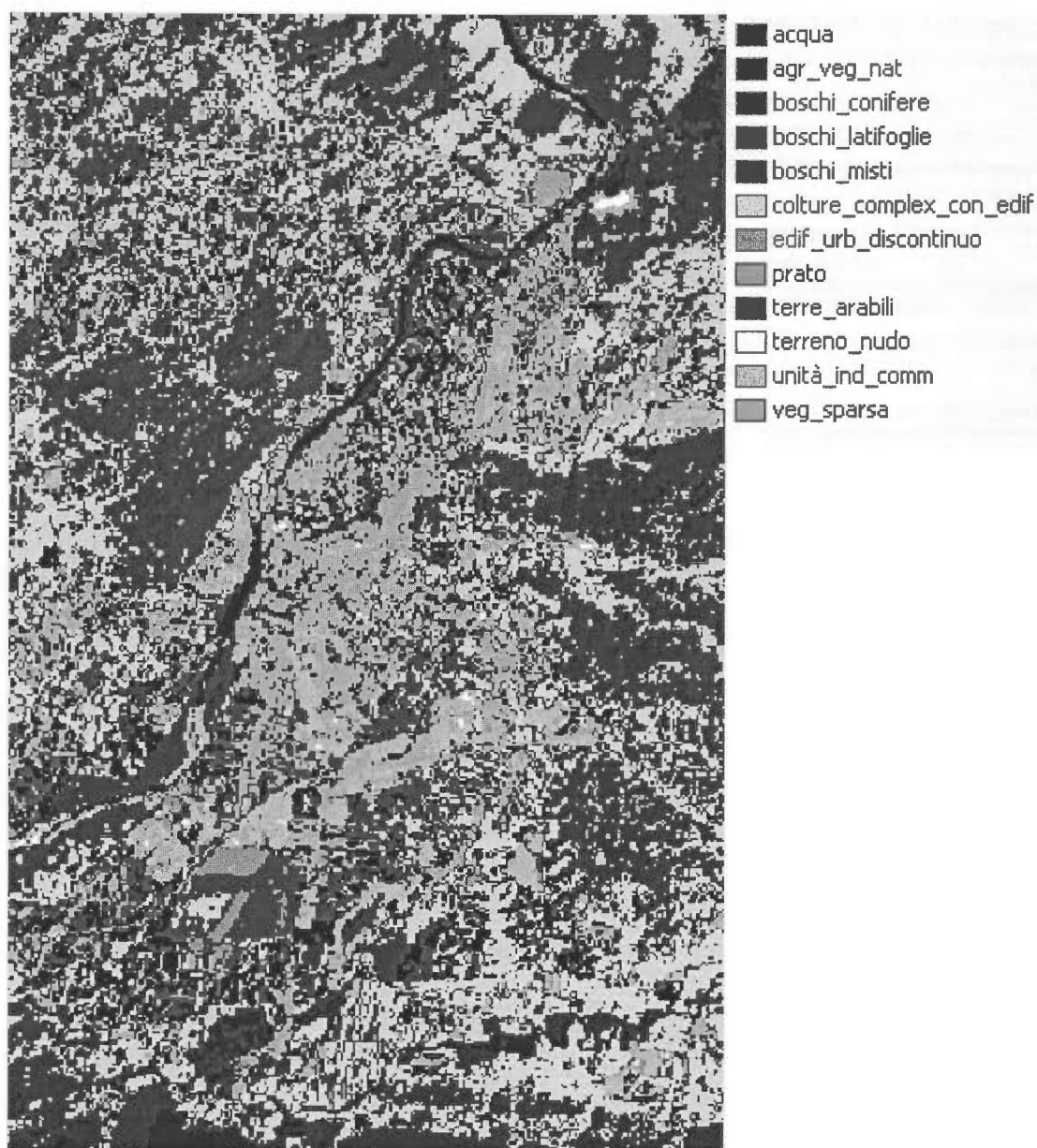


FIGURA 7.8: risultati della classificazione *supervised* (Landsat 5 TM – 1992).

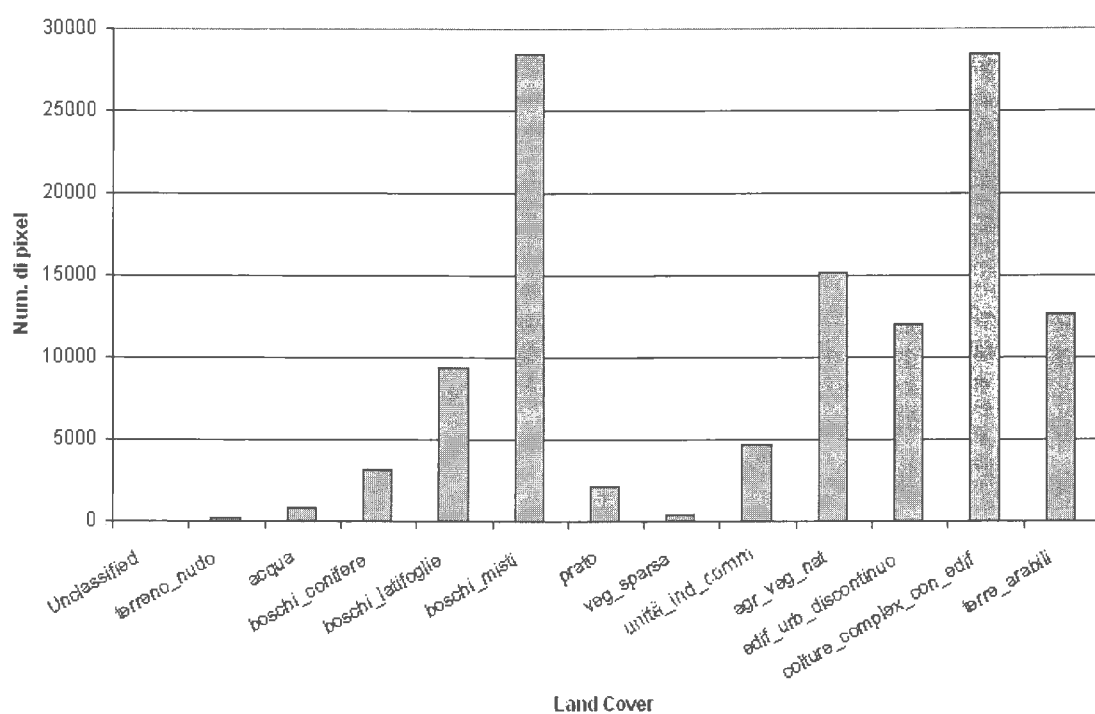


FIGURA 7.9: istogramma dell'immagine classificata con tecnica *supervised* (Landsat 5 TM – 1992).

Classi di <i>Land Cover</i>	Num. di pixel	Area (ha)
terreno_nudo	161	14,49
acqua	829	74,61
boschi_conifere	3120	280,8
boschi_latifoglie	9387	844,83
boschi_misti	28421	2557,89
prato	2098	188,82
veg_sparsa	451	40,59
unità_ind_comm	4663	419,67
agr_veg_nat	15164	1364,76
edif_urb_discontinuo	12061	1085,49
colt_complex_con_edif	28506	2565,54
terre_arabili	12685	1141,65

TABELLA 7.3: aree delle classi di copertura del suolo dell'immagine classificata con la tecnica *supervised* (Landsat 5 TM – 1992).

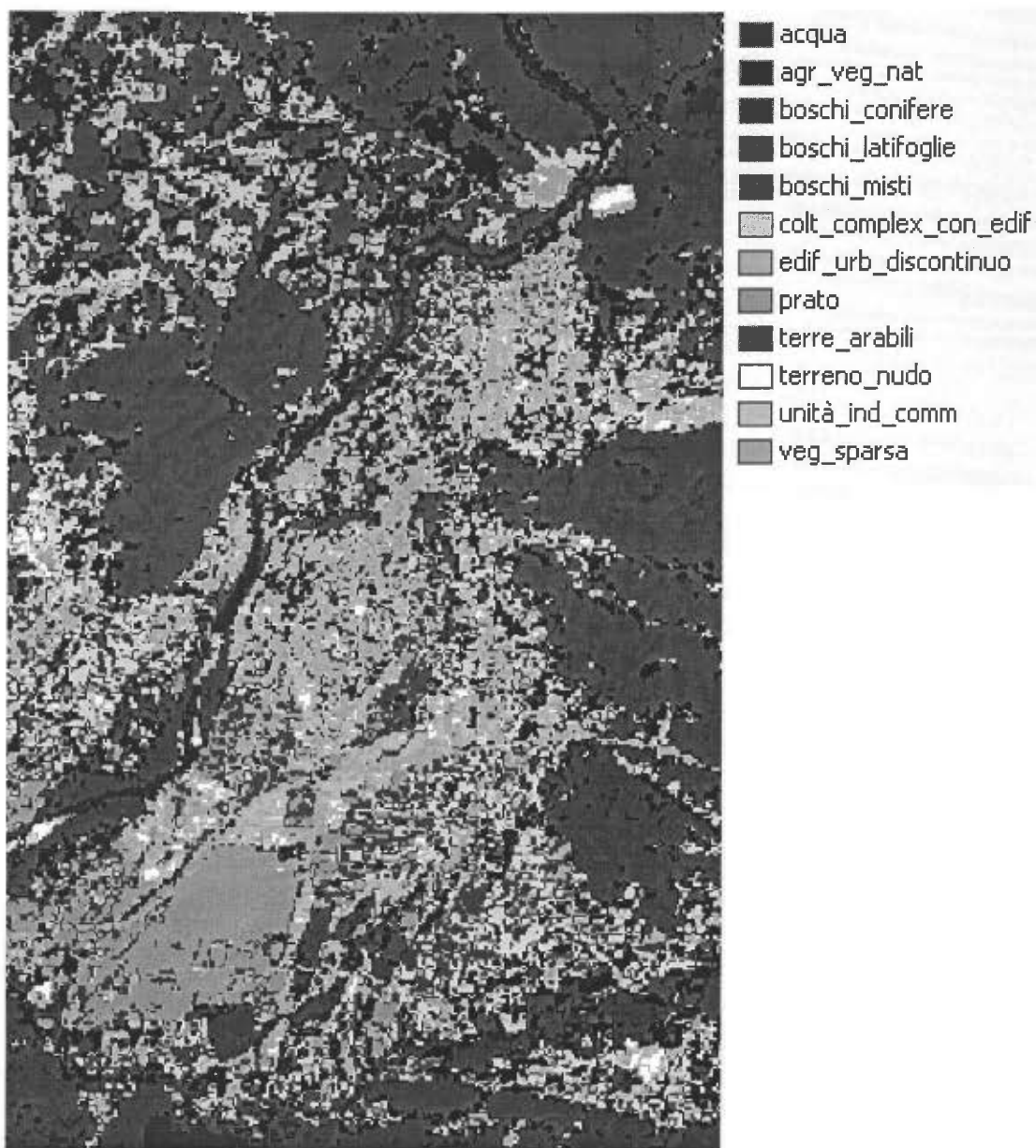


FIGURA 7.10: risultati della classificazione *supervised* (Landsat 5 TM – 2003).

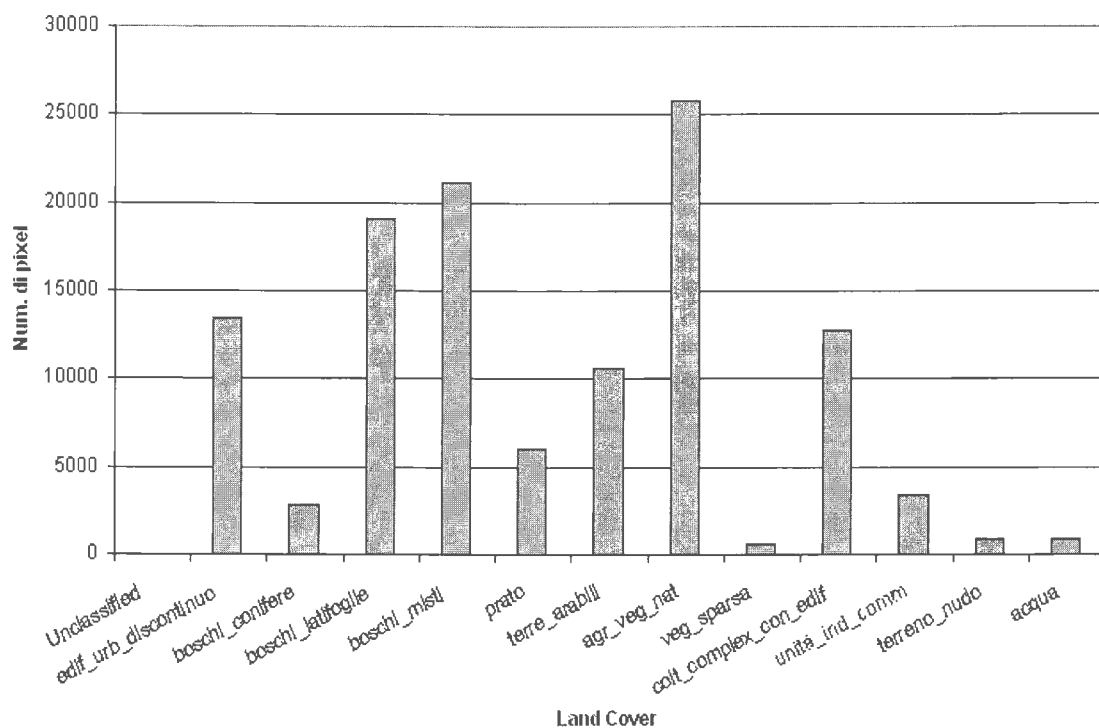


FIGURA 7.11: istogramma dell'immagine classificata con la tecnica *supervised* (Landsat 5 TM – 2003).

Classi di Land Cover	Num. di pixel	Area (ha)
edif_urb_discontinuo	13489	1214,01
boschi_conifere	2851	256,59
boschi_latifoglie	19104	1719,36
boschi_misti	21156	1904,04
prato	6000	540
terre_arabili	10662	959,58
agr_veg_nat	25834	2325,06
veg_sparsa	614	55,26
colt_complex_con_edif	12776	1149,84
unità_ind_comm	3397	305,73
terreno_nudo	828	74,52
acqua	835	75,15

TABELLA 7.4: aree delle classi di copertura del suolo dell'immagine classificata con la tecnica *supervised* (Landsat 5 TM – 2003).

Rilevante è il fatto che con questa seconda tecnica di classificazione tutte le classi tematiche individuate dall'analista, attraverso la designazione delle aree *training*, sono state prodotte, ovviando al problema della mancata identificazione

o dell'accorpamento di alcune di esse, caratteristico della tecnica *unsupervised* precedentemente implementata (vedi sopra: par. 7.2). Tale caratteristica ha permesso una soddisfacente cartografazione della copertura del suolo dell'area transfrontaliera di Gorizia-Nova Gorica.

Si è proceduto dunque all'*accuracy assessment*, in quanto, una classificazione non può dirsi completa fino a quando la sua accuratezza non è stata verificata (LILLESAND E KIEFER, 1999). Ai fini della *change detection* tale controllo di accuratezza si rivela dunque indispensabile.

7.5 Validazione della classificazione *supervised* delle immagini Landsat 5 TM.

Accuracy assessment è il termine generico che indica un confronto tra i risultati della classificazione e dati reali al suolo⁸⁰ (*reference data*), ove questi possono discendere da diverse fonti, naturalmente coeve all'immagine telerilevata oggetto di classificazione. Tali dati – e non già tali fonti dei dati – non devono comunque *mai* coincidere con i dati utilizzati per implementare la classificazione stessa.

Uno dei metodi maggiormente utilizzati per validare una classificazione attraverso il controllo della sua accuratezza è la c.d. *error matrix*⁸¹. Tramite tale matrice possono essere computate l'accuratezza complessiva della classificazione, la probabilità che un pixel attribuito ad una determinata classe sia stato correttamente classificato e l'accuratezza relativa alle singole classi. Il *coefficiente K* è invece un altro indice utilizzato per il controllo di accuratezza: anch'esso esprime la corrispondenza tra *reference data* e dati classificati (FAVRETTO, 2006). Si rimanda al par. 4.3 per una presentazione esaustiva dei concetti di *error matrix* e di *coefficiente K*.

Le modalità per la costituzione della *error matrix* sono due: tramite l'utilizzo di punti casuali (*random points*) come *reference data* oppure tramite l'utilizzo di *test area*. Tali aree, uniformi e rappresentative di una determinata classe di copertura del suolo, devono naturalmente differire dalle *training area* (vedi sopra: par. 4.2 e 7.3). Essendo però tali aree omogenee, l'accuratezza derivante

⁸⁰ Altrimenti denominati, in bibliografia, *dati sicuri* (FAVRETTO, 2006).

⁸¹ *Matrice di confusione o tavola di contingenza* (MAURO, 2005).

da un loro utilizzo potrebbe non fornire una valida indicazione dell'effettiva accuratezza della classificazione al livello del singolo pixel (GAO YAN, 2003).

7.5.1 Risultati dell'*accuracy assessment*.

Nel presente studio la matrice di confusione è stata costituita utilizzando la tecnica dei *random points*.

Per l'*accuracy assessment* dell'immagine Landsat 5 TM acquisita nell'Agosto del 1992 e classificata in modalità *supervised*, sono stati utilizzati quali dati di riferimento quelli derivanti dalle fonti dei dati di cui sopra al par. 7.1 e 7.3, naturalmente utilizzando un diverso set di dati per ogni fonte.

Per l'*accuracy assessment* dell'immagine classificata relativa all'Agosto del 2003, sono invece stati utilizzati quali dati di riferimento quelli derivanti da altre fonti: 48 punti di controllo a terra da campagna di rilievo tramite GPS palmare (effettuata nell'Agosto del 2005⁸²) e *random points* ricavati dalle ortofoto dell'area transfrontaliera di Gorizia-Nova Gorica, il cui anno del rilievo è il 2003 e la risoluzione del pixel al suolo pari a 1 m. (vedi sopra: par. 5.2). E' stato così possibile effettuare un campionamento di 10 punti per classe (come pure per la classificazione relativa all'immagine del 1992), 4 dei quali derivanti da GPS e 6 derivanti dalle ortofoto.

Nelle Tabelle 7.5 e 7.6 vengono presentate le *error matrix* e i risultati dell'*accuracy assessment* derivanti dalle matrici, rispettivamente per la classificazione dell'immagine del 1992 e per quella del 2003; nelle Tabelle 7.7 e 7.8 vengono presentati i valori del *K statistics* derivanti dalle matrici, rispettivamente per la classificazione dell'immagine del 1992 e per quella del 2003. Si rimanda al par. 4.3 per le specifiche inerenti *error matrix*, *producer's accuracy*, *user's accuracy*, *overall accuracy* e *K statistics*.

⁸² La campagna GPS è stata contestuale a quella effettuata per rilevare i dati al suolo utilizzati per la classificazione; sono stati rilevati 7 punti per classe (per un totale di 84 punti). Successivamente 3 di questi sono stati utilizzati per la classificazione (per un totale di 36 punti), mentre i rimanenti 4 sono stati utilizzati per l'*accuracy assessment* (per un totale di 48 punti).

		<i>Reference data</i>												
		TN	H ₂ O	BC	BL	BM	P	Vs	IC	AVN	EUD	CCE	TA	TOT
Dati classificati	TN	9	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	12
	H ₂ O	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	BC	0	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	BL	0	0	2	7	1	0	0	0	0	0	0	0	10
	BM	0	0	1	2	7	0	0	0	1	0	0	0	11
	P	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	2	9
	Vs	0	0	0	0	0	1	8	0	0	0	0	0	9
	IC	1	0	0	0	0	0	1	7	0	1	0	0	10
	AVN	0	0	0	1	1	0	0	0	7	0	2	0	12
	EUD	0	0	0	0	0	0	0	2	0	7	1	0	10
	CCE	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	5	0	8
	TA	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	2	8	13
	TOT	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	120

Producer's accuracy

TN (Terreno nudo) = 9/10 = 0.9 = 90%

H₂O (Corsi d'acqua) = 90%

BC (Boschi di conifere) = 70%

BL (Boschi di latifoglie) = 70%

BM (Boschi misti) = 70%

P (Prato) = 70%

Vs (Vegetazione sparsa) = 80%

IC (Unità industriali e commerciali) = 70%

AVN (Zone agricole con vegetazione naturale) = 70%

EUD (Edificato urbano discontinuo) = 70%

CCE (Colture complesse con edifici) = 50%

TA (Terre arabili) = 70%

User's accuracy

TN (Terreno nudo) = 9/12 = 0.75 = 75%

H₂O (Corsi d'acqua) = 100%

BC (Boschi di conifere) = 87.5%

BL (Boschi di latifoglie) = 70%

BM (Boschi misti) = 63.6%

P (Prato) = 77.8%

Vs (Vegetazione sparsa) = 88.9%

IC (Unità industriali e commerciali) = 70%

AVN (Zone agricole con vegetazione naturale) = 58.3%

EUD (Edificato urbano discontinuo) = 70%

CCE (Colture complesse con edifici) = 62.5%

TA (Terre arabili) = 61.5%

Overall accuracy = (9+9+7+7+7+7+8+7+7+7+5+8)/120 = 88/120 = 73.33 %

TABELLA 7.5: Accuracy assessment da error matrix dell'immagine Landsat 5 TM classificata (1992).

		<i>Refernce data</i>												
		TN	H ₂ O	BC	BL	BM	P	Vs	IC	AVN	EUD	CCE	TA	TOT
Dati classificati	TN	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	H ₂ O	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	BC	0	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	BL	0	0	1	8	2	0	0	0	1	0	0	0	12
	BM	0	0	2	2	7	0	2	0	0	0	0	0	13
	P	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	8
	Vs	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	8
	IC	0	0	0	0	0	0	0	7	0	2	0	0	9
	AVN	0	0	0	0	1	1	0	0	7	0	2	0	11
	EUD	1	0	0	0	0	1	0	2	0	7	1	1	13
	CCE	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	6	1	10
	TA	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	7	10
	TOT	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	120

Producer's accuracy

TN (Terreno nudo) = 9/10 = 0.9 = 90%

H₂O (Corsi d'acqua) = 90%

BC (Boschi di conifere) = 70%

BL (Boschi di latifoglie) = 80%

BM (Boschi misti) = 70%

P (Prato) = 70%

Vs (Vegetazione sparsa) = 80%

IC (Unità industriali e commerciali) = 70%

AVN (Zone agricole con vegetazione naturale) = 70%

EUD (Edificato urbano discontinuo) = 70%

CCE (Colture complesse con edifici) = 60%

TA (Terre arabili) = 70%

User's accuracy

TN (Terreno nudo) = 9/9 = 1 = 100%

H₂O (Corsi d'acqua) = 100%

BC (Boschi di conifere) = 87.5%

BL (Boschi di latifoglie) = 66.6%

BM (Boschi misti) = 53.8%

P (Prato) = 87.5%

Vs (Vegetazione sparsa) = 100%

IC (Unità industriali e commerciali) = 77.8%

AVN (Zone agricole con vegetazione naturale) = 63.6%

EUD (Edificato urbano discontinuo) = 53.8%

CCE (Colture complesse con edifici) = 60%

TA (Terre arabili) = 70%

Overall accuracy = (9+9+7+8+7+7+8+7+7+7+6+7)/120 = 89/120 = 74.16 %

TABELLA 7.6: *Accuracy assessment da error matrix* dell'immagine Landsat 5 TM classificata (2003).

<i>Land cover</i>	<i>K statistics</i>
Terreno nudo	0.7573
Corsi d'acqua	0.7508
Boschi di conifere	0.7489
Boschi di latifoglie	0.7529
Boschi misti	0.7545
Prato	0.7508
Vegetazione sparsa	0.7508
Unità industriali e commerciali	0.7529
Zone agricole con vegetazione naturale	0.7573
Edificato urbano discontinuo	0.7529
Colture complesse con edifici	0.7489
Terre arabili	0.7596
<i>Overall K statistics = 0.7531</i>	

TABELLA 7.7: *K statistics* da *error matrix* dell'immagine Landsat 5 TM classificata (1992).

<i>Land cover</i>	<i>K statistics</i>
Terreno nudo	0.7594
Corsi d'acqua	0.7594
Boschi di conifere	0.7575
Boschi di latifoglie	0.7659
Boschi misti	0.7683
Prato	0.7575
Vegetazione sparsa	0.7575
Unità industriali e commerciali	0.7594
Zone agricole con vegetazione naturale	0.7636
Edificato urbano discontinuo	0.7683
Colture complesse con edifici	0.7614
Terre arabili	0.7614
<i>Overall K statistics = 0.7616</i>	

TABELLA 7.8: *K statistics* da *error matrix* dell'immagine Landsat 5 TM classificata (2003).

L'accuratezza complessiva della classificazione risulta soddisfacente; ciò è supportato dalla cospicua bibliografia in materia (tra gli altri, GOMARASCA, 2004, CAMPBELL, 1996, GAO YAN, 2003). L'*overall accuracy* è infatti pari circa al 74% per entrambe le immagini classificate. Anche i valori dell'*overall K statistics* - per entrambi i casi pari a circa 0.75 - confermano l'accuratezza complessiva della classificazione; ciò è supportato nuovamente dalla cospicua bibliografia in materia (tra gli altri, FAVRETTO, 2006).

Le classi presentano generalmente elevati valori di accuratezza, sia per ciò che concerne la *producer's accuracy*, sia per quanto riguarda la *user's accuracy*.

La classe “Colture complesse con edifici” registra invece valori minori di accuratezza (50 % per il 1992 e 60 % per il 2003) nella *producer’s accuracy*: questo significa che una percentuale minore di “Colture complesse con edifici” è stata classificata correttamente. Un’analisi incrociata con la *user’s accuracy* pone in evidenza come soltanto il 62.5 % di quel 50 % (1992) e il 60 % di quel 60 % (2003) - cioè percentuali areali classificate come “Colture complesse con edifici” – siano realmente appartenenti a questa categoria. Sostanzialmente questo è dato dal fatto che tale classe restituisca un’informazione spettrale molto simile a quella individuata come “Zone agricole con vegetazione naturale”.

Anche altre classi – “Boschi misti”, “Zone agricole con vegetazione naturale” e “Terre arabili“ per il dato relativo al 1992, cui si aggiungono “Boschi di latifoglie” e “Edificato urbano discontinuo” per il dato relativo al 2003 (soddisfacente in questo caso l’accuratezza della classe “Terre arabili“) - presentano valori minori di accuratezza nella *user’s accuracy*, ma non nella *producer’s accuracy*: l’analisi incrociata effettuata sopra (come nel caso della classe “Colture complesse con edifici”) fornisce in tal caso risultati soddisfacenti. Ai fini della successiva analisi di controllo delle differenze, la validazione della classificazione *supervised* effettuata ha fornito risultati soddisfacenti.

8. ANALISI DI CONTROLLO DELLE DIFFERENZE: *CHANGE DETECTION* (1992 – 2003).

L'*analisi di controllo delle differenze (change detection)* è il processo attraverso il quale vengono comparate informazioni di periodi diversi per determinare la localizzazione e la natura dei cambiamenti nel corso del tempo (CARRANZA ET AL., 2002), assumendo rilevanza ai fini della valutazione quali-quantitativa della situazione di un dato territorio nonché come strumento di monitoraggio temporale.

La *change detection* operata nel corso del presente studio rientra nel più vasto campo delle *trasformazioni multispettrali* di immagini satellitari derivanti dallo stesso sensore, con presa relativa allo stesso territorio, ma acquisite in periodi temporali differenti. Tale procedura si inserisce inoltre nelle c.d. *post-classification comparison*: analisi comparative *map-to-map*, in quanto oggetto di analisi sono dati discreti, in quanto classificazioni prodotte indipendentemente. Si rimanda al par. 4.4 per una trattazione teorica maggiormente esaustiva in merito alla *change detection*.

Una delle possibili fonti di errore di tale approccio, risiede però nel fatto che i cambiamenti possono derivare da una classificazione errata, risultando fittizi, sovrastimati o sottostimati. E' stato utilizzato tale approccio conseguentemente ai soddisfacenti valori dell'*accuracy assessment* operato sulle classificazioni (vedi sopra: par. 7.5.1).

8.1 *Cross-tabulation*.

La metodologia interpretativa è stata quella della c.d. *cross-tabulation*, che permette di incrociare una coppia di carte tematiche di copertura del suolo relative a due periodi successivi (ARSIA, 2002), come è il caso delle due immagini Landsat 5 TM classificate. La *cross tabulation* è una c.d. *tabella a doppia entrata*, che fornisce la frequenza corrispondente a coppie di caratteri (MAURO, 2005). Il risultato di questa analisi può essere sia tabellare che

cartografico. Nel formato tabellare il risultato è costituito da una matrice che riporta nelle righe e nelle colonne le classi di copertura del suolo, mentre nelle singole celle le superfici (in numero di pixel o in ettari) di ciascuna tipologia di cambiamento. Utilizzando un siffatto risultato è possibile, scegliendo una determinata classe di copertura del suolo del 1992, analizzarne la composizione nel 2003 e, specularmente, l'evoluzione tra i due periodi considerati.

Il risultato cartografico è invece una simbolizzazione spaziale delle variazioni in cui per ogni *patch* [tessera] è individuata la copertura del suolo alle due date oggetto di analisi.

Considerato l'elevato numero di classi di copertura del suolo implementato nel presente studio, si è preferito optare per la presentazione dei risultati in formato tabellare, in quanto l'utilizzo della rappresentazione cartografica avrebbe generato cartogrammi tematici non chiaramente intelleggibili. Sono tuttavia presenti nei risultati le carte tematiche relative ai cambiamenti delle singole classi maggiormente significative dal punto di vista quantitativo.

Il numero teorico totale di *classi di dinamica* è invece dato dal prodotto del numero di classi utilizzate per una data e quello della data successiva. Il numero di classi di dinamica è stato volutamente decrementato e portato a sette classi più generiche, sempre per fornire una migliore intelleggibilità dei risultati, ancorché se in formato tabellare.

Il dato imprescindibile per l'utilizzo di tale approccio è costituito dalla superficie di ciascuna tipologia di cambiamento, rappresentato nelle singole celle della matrice. Tale dato è stato ricavato tramite procedure di *riclassificazione* e *mascheramento*⁸³ operato in ambiente GIS sulle immagini già classificate.

Ogni singola classe di copertura del suolo dell'immagine Landsat 5 TM classificata in modalità *supervised*, è stata estrapolata: questo grazie ad una *riclassificazione binaria* che assegnava valore pari ad 1 per la classe da estrapolare, mentre valore pari a 0 era assegnato alle rimanenti classi. Ogni singola classe del 1992 è stata quindi mascherata con l'immagine classificata relativa al 2003. Il risultato di tale procedura è un insieme di classi discrete che spazialmente – per numero e posizione dei pixel, quindi anche per superficie in

⁸³ La procedura di *mascheramento*, applicato su immagini *raster*, permette di generare una nuova immagine derivata dalla selezione dei pixel con determinate caratteristiche. Un file *maschera*, appositamente creato, filtra i pixel sull'immagine originale (ERDAS, 1999).

ettari – coincide con la classe originaria (1992), ma che risulta composta anche da altre classi di copertura del suolo⁸⁴ – relative al 2003 - che eventualmente e parzialmente hanno sostituito la copertura originaria.

Estrapolando infine dagli attributi delle classi mascherate il numero di pixel relativo a ciascuna tipologia di cambiamento è possibile quantificare tale cambiamento in ettari e conseguentemente compilare la *cross-tabulation*.

8.1.1 Risultati della *cross-tabulation*.

Nella Tabella 8.1 sono presentati i risultati della *cross-tabulation* e le classi di dinamica evolutiva; nella Figura 8.1 l'istogramma rappresentante l'incremento o il decremento di superficie (in ettari) di ogni singola classe dal 1992 al 2003.

Nelle successive figure, infine, vengono presentate le carte tematiche relative ai cambiamenti delle singole classi che hanno subito un significativo incremento o decremento di superficie (in ettari) e che rappresentavano in entrambe le date, in termini relativi, un'estesa porzione dell'area allo studio. Tali classi sono: "Colture complesse con edifici" (Fig. 8.2); "Zone agricole con vegetazione naturale" (Fig. 8.3); "Boschi misti" (Fig. 8.4) e "Boschi di latifoglie" (Fig. 8.5). Pur rappresentando quantitativamente una significativa porzione dell'area tutta, la classe relativa all'edificato urbano discontinuo non è stata rappresentata cartograficamente, risultando irrilevante la sua dinamica evolutiva (incremento di circa 100 ha). Al contrario la classe relativa alle coperture a prato, pur risultando rilevante la sua dinamica evolutiva (incremento di circa 350 ha) non è stata rappresentata cartograficamente in quanto di scarsa incidenza la sua estensione spaziale sulla totalità dell'area allo studio.

Per gli acronimi utilizzati nella presentazione dei risultati si veda immediatamente sotto (vedi anche sopra: par. 7.5.1).

⁸⁴ Naturalmente solo se si è verificato un cambiamento di copertura del suolo nel periodo considerato.

		<i>Land cover 2003 (ha)</i>													
		TN	H ² O	BC	BL	BM	P	Vs	IC	AVN	EUD	CCE	TA	TOT_92	
<i>Land cover 1992 (ha)</i>	TN	8,6	0,0	0,2	0,1	0,0	0,5	0,0	2,3	0,9	1,2	0,7	0,0	14,5	
	H ² O	1,4	40,6	13,8	2,3	5,2	0,3	0,1	1,5	5,1	3,0	1,4	0,1	74,6	
	BC	0,5	15,3	102,2	14,7	98,2	0,5	0,2	1,2	31,5	9,8	4,0	2,8	280,8	
	BL	0,2	0,2	2,4	513,1	172,8	3,0	1,8	3,8	101,7	6,3	31,9	7,7	844,8	
	BM	0,5	8,0	82,6	569,4	1332,5	4,7	1,2	4,0	439,6	48,2	40,9	26,4	2557,9	
	P	3,0	0,0	0,3	1,5	2,1	52,4	3,6	12,6	17,3	36,0	24,7	35,5	188,8	
	Vs	3,6	0,0	0,2	1,6	0,2	2,3	13,7	4,3	3,0	4,1	4,2	3,4	40,6	
	IC	25,7	2,4	4,8	5,9	4,3	20,5	2,8	134,6	28,3	131,6	28,8	30,0	419,7	
	AVN	5,6	1,6	12,4	37,8	47,3	111,2	3,6	20,1	442,2	203,0	232,4	247,7	1364,8	
	EUD	8,1	4,7	19,3	5,4	12,3	60,7	2,1	65,9	180,1	529,9	81,0	116,1	1085,5	
	CCE	10,7	2,2	16,3	538,9	218,6	65,7	14,6	23,1	904,1	110,7	439,2	221,5	2565,5	
	TA	6,8	0,2	2,2	28,6	10,4	218,3	11,7	32,3	171,5	130,3	260,8	268,5	1141,7	
	TOT_03		74,5	75,2	256,6	1719,4	1904,0	540,0	55,3	305,7	2325,1	1214,0	1149,8	959,6	10579,1

TN (Terreno nudo)
H₂O (Corsi d'acqua)
BC (Boschi di conifere)
BL (Boschi di latifoglie)
BM (Boschi misti)
P (Prato)
Vs (Vegetazione sparsa)
IC (Unità industriali e commerciali)
AVN (Zone agricole con vegetazione naturale)
EUD (Edificato urbano discontinuo)
CCE (Colture complesse con edifici)
TA (Terre arabili)









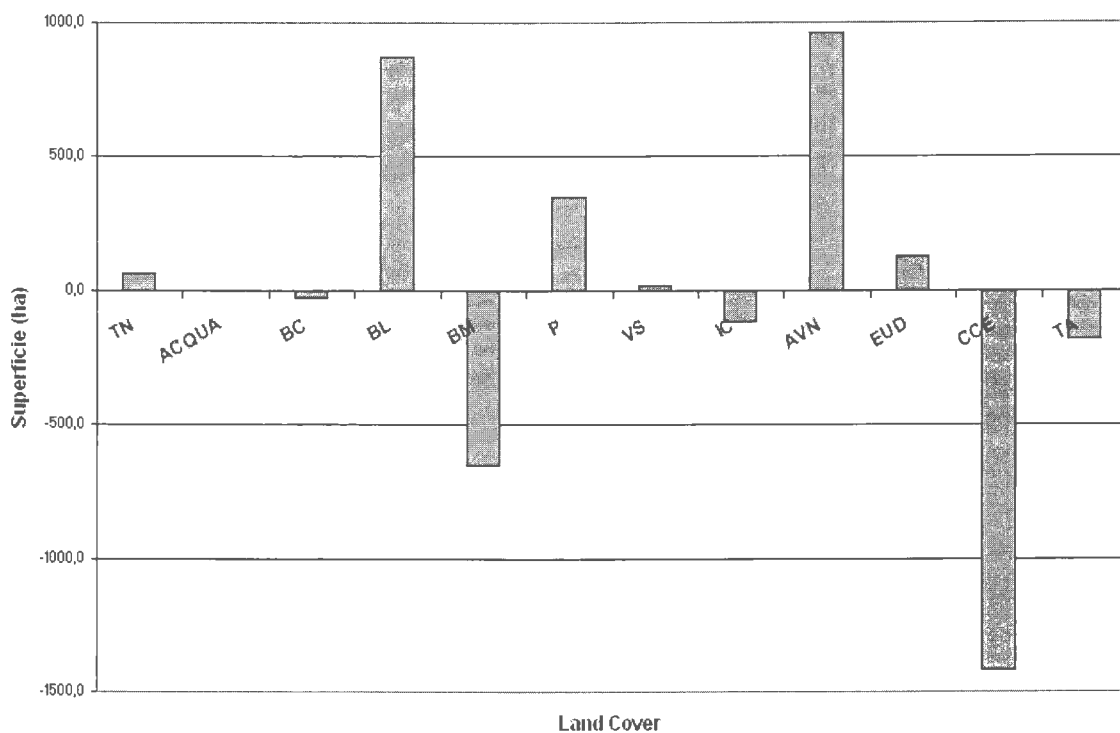
Classi di dinamica evolutiva	
	<i>Antropizzazione</i>
	<i>Coniferamento</i>
	<i>Forestazione</i>
	<i>Deforestazione</i>
	<i>Estensivizzazione</i>
	<i>Intensivizzazione</i>
	<i>Non variato</i>
	<i>Non campionato</i>

TABELLA 8.1: *Cross-tabulation* dell'area oggetto di studio. Nelle righe sono riportate le classi di copertura del suolo del 1992, nelle colonne quelle del 2003. Iniziando a leggere da sinistra e scegliendo una classe di copertura del 1992 (cioè una riga), se ne può analizzare la composizione nel 2003, leggendo nelle celle la superficie di ogni classe indicata in testa alle colonne; per contro, considerando le colonne si quantifica l'evoluzione che ha avuto una determinata classe di copertura relativa al 2003, ovvero la composizione dell'attuale superficie nel 1992.



- TN (Terreno nudo)
- H₂O (Corsi d'acqua)
- BC (Boschi di conifere)
- BL (Boschi di latifoglie)
- BM (Boschi misti)
- P (Prato)
- Vs (Vegetazione sparsa)
- IC (Unità industriali e commerciali)
- AVN (Zone agricole con vegetazione naturale)
- EUD (Edificato urbano discontinuo)
- CCE (Colture complesse con edifici)
- TA (Terre arabili)

FIGURA 8.1: Incremento o decremento di superficie (ha) di ogni singola classe di copertura del suolo dal 1992 al 2003.



CLASSE DI COPERTURA (1992)

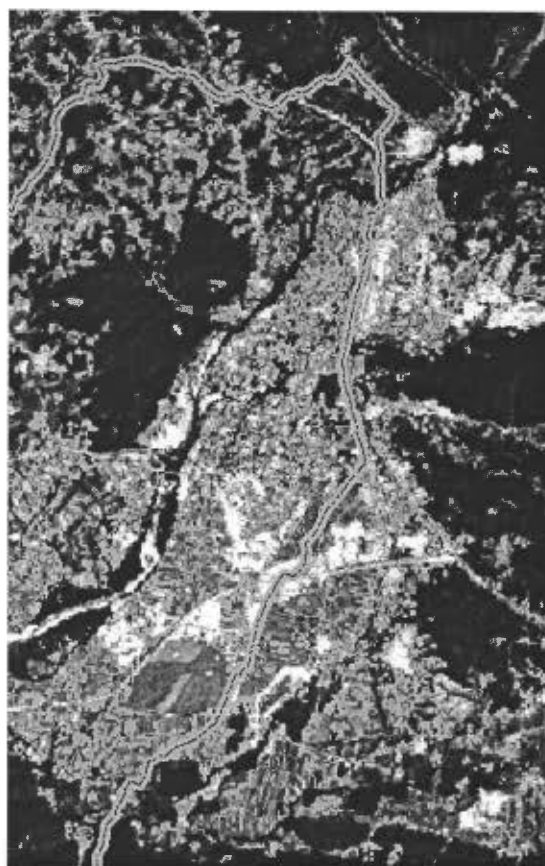
■ colture_complex_con_edif




CLASSE DI DESTINAZIONE (2003)

- Terreno nudo
- Acqua
- Boschi di conifere
- Boschi di latifoglie
- Boschi misti
- Prato
- Vegetazione sparsa
- Unità industriali e commerciali
- Zone agricole con vegetazione naturale
- Edificato urbano discontinuo
- Colture complesse con edifici
- Terre arabili

FIGURA 8.2: dinamica evolutiva della classe “Colture complesse con edifici” dal 1992 al 2003. In rosso la superficie la cui copertura è rimasta immutata.



CLASSE DI COPERTURA (1992)

 Zone agricole con vegetazione naturale



CLASSE DI DESTINAZIONE (2003)






-  Terreno nudo
-  Acqua
-  Boschi di conifere
-  Boschi di latifoglie
-  Boschi misti
-  Prato
-  Vegetazione sparsa
-  Unità industriali e commerciali
-  Zone agricole con vegetazione naturale
-  Edificato urbano discontinuo
-  Colture complesse con edifici
-  Terre arabili

FIGURA 8.3: dinamica evolutiva della classe “Zone agricole con vegetazione naturale” dal 1992 al 2003. In verde la superficie la cui copertura è rimasta immutata.

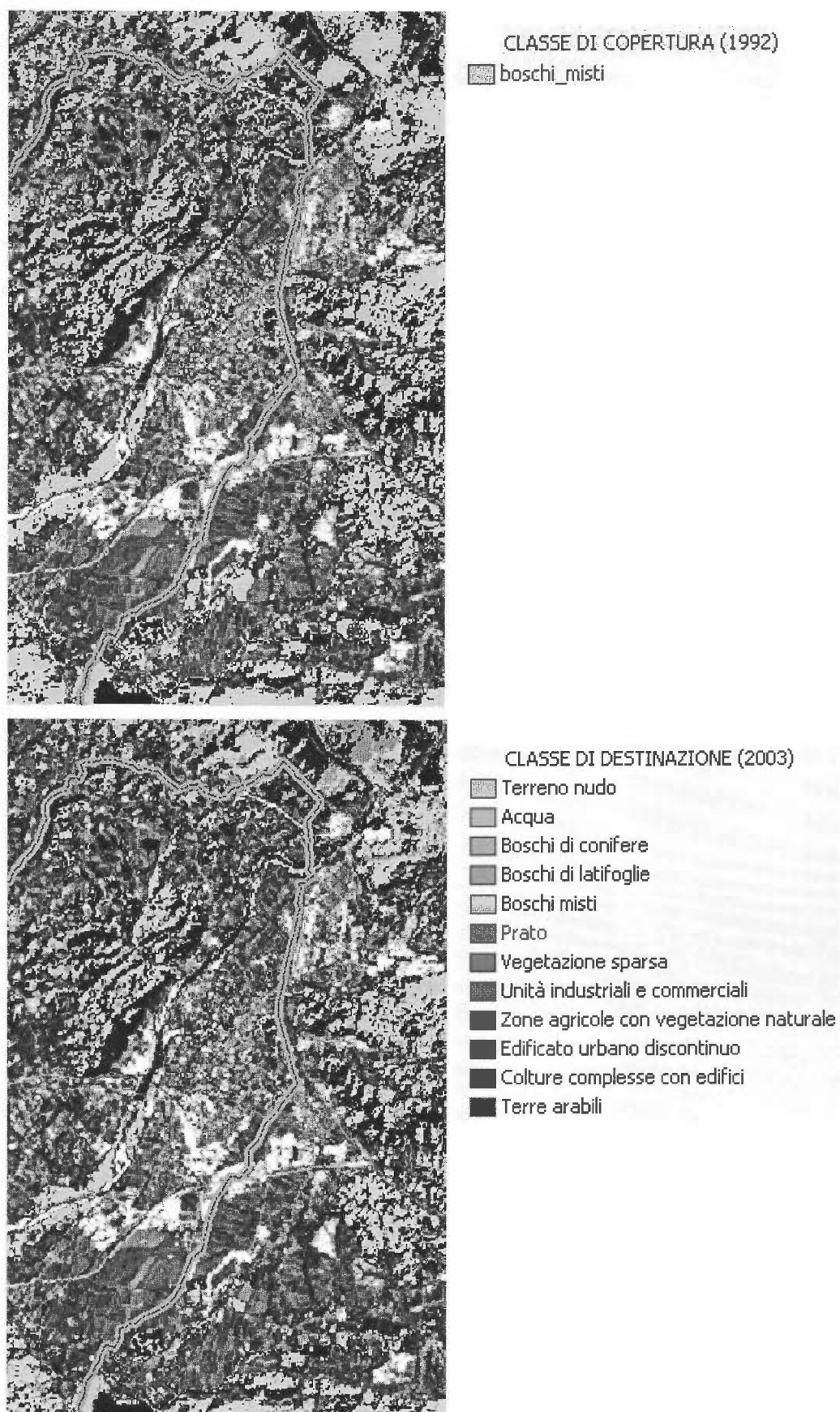


FIGURA 8.4: dinamica evolutiva della classe “boschi misti” dal 1992 al 2003. In giallo la superficie la cui copertura è rimasta immutata.

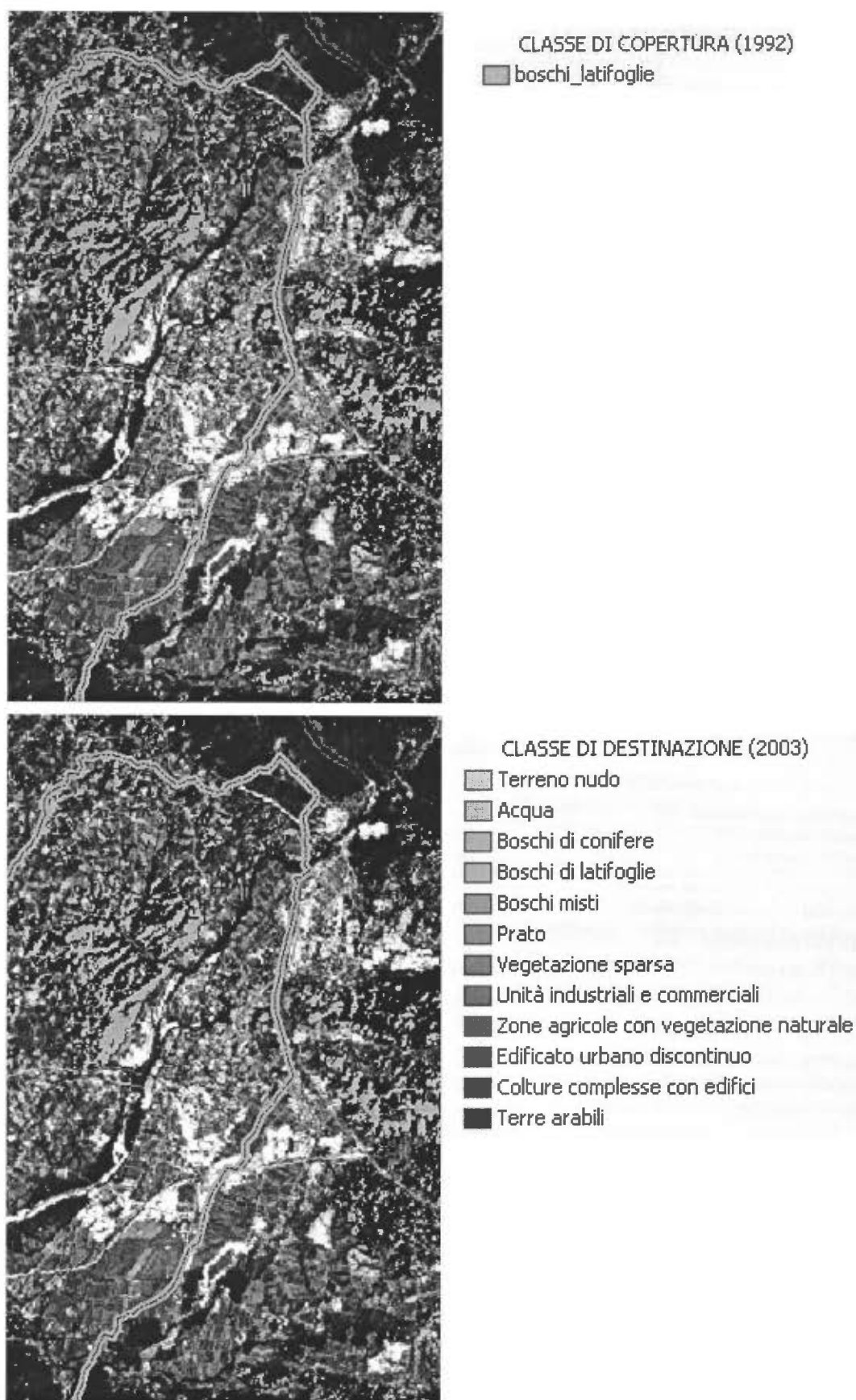


FIGURA 8.5: dinamica evolutiva della classe “Colture di latifoglie” dal 1992 al 2003. In ciano la superficie la cui copertura è rimasta immutata.

8.2 Discussione dei risultati.

Tramite la *cross-tabulation* è possibile operare un'analisi dettagliata retrospettiva ed al tempo stesso evolutiva: retrospettiva in quanto è possibile ricostruire la destinazione passata (1992) delle più recenti (2003) tipologie di coperture del suolo (attraverso una lettura per colonne della matrice); evolutiva in quanto ci si pone al 1992 e si analizza in che cosa si sono trasformate le coperture del suolo nel periodo di studio considerato (attraverso una lettura per righe).

Tale analisi retrospettiva ed evolutiva porta alla costituzione delle classi di dinamica, il cui numero è pari a sette; è stata utilizzata tale classificazione schematica per rendere più agevole l'interpretazione dei dati presenti nella matrice di cui sopra. Le classi di dinamica sono:

- *antropizzazione*: si riferisce a strutture edificali, opere infrastrutturali, opere di ingegneria civile in genere;
- *coniferamento*: considera l'aumento del bosco legato all'espansione delle conifere a seguito di rimboschimento;
- *forestazione*: si riferisce all'aumento del bosco;
- *deforestazione*: si riferisce alla quota di bosco scomparsa in seguito a destinazione ad altro uso;
- *estensivizzazione*: comprende aree soggette ad abbandono colturale, in cui generalmente si ha il passaggio da una coltura maggiormente specializzata ad una meno specializzata;
- *intesivizzazione*: costituisce il processo inverso rispetto all'estensivizzazione, ossia il passaggio da una coltura meno specializzata ad una maggiormente specializzata;
- *non variato*: si riferisce a quelle porzioni di territorio rimaste stabili nelle classi di copertura del suolo utilizzate.

La classe identificata come “*Non campionato*” si riferisce alle tipologie di copertura del suolo “Terreno nudo”, “Corsi d'acqua” e “Vegetazione sparsa”: tali classi sono state computate analiticamente nella matrice, ma non sono state oggetto di analisi durante l'assegnazione delle classi di dinamica; questo in virtù del fatto che le suddette classi presentavano, in entrambi i periodi temporali allo

studio, un'estensione superficiale molto ridotta in termini percentuali rispetto al totale dell'area oggetto di studio.

Prima di procedere ad un'analisi dettagliata delle singole dinamiche evolutive, si rivela utile un'analisi dei cambiamenti globali intervenuti tra il 1992 e il 2003.

Da una lettura del grafico di Figura 8.1 e delle cartografie tematiche delle Figure 8.2 e 8.3, emerge il dato di una drastica riduzione di superficie (circa 1400 ha) della copertura a colture complesse (vigneti, frutteti) miste ad edifici e, contestualmente, di un rilevante aumento (oltre 950 ha) delle zone agricole con porzioni di vegetazione naturale: entrambi i tipi di copertura presentavano una superficie estesa nel 1992 ed hanno subito, nel periodo considerato, la dispersione maggiore verso altri tipi di copertura.

Si può dunque parlare di un aumento di eterogeneità delle tessere paesaggistiche dell'area oggetto di studio.

Questa analisi è confortata anche dall'applicazione di indicatori abitualmente utilizzati nel campo dell'ecologia ed impiegati nell'analisi del paesaggio (PIUSSI, 1994). L'*indice di dominanza di Simpson (C)* e l'*indice di diversità di Shannon (H)* sono stati applicati nel presente studio alle tipologie di copertura del suolo in un'ottica diacronica.

L'indice di dominanza (C) è calcolato sulla proporzione delle classi di copertura del suolo rilevate secondo la formula:

$$C = \sum (n_i/N)^2$$

dove n_i è la superficie occupata da ognuna delle classi di copertura considerata singolarmente ed N la superficie totale delle classi⁸⁵, ossia dell'area oggetto di studio; all'aumentare di C il paesaggio è dominato da un sempre minor numero di tipi di copertura del suolo, mentre al suo diminuire è caratterizzato da una distribuzione equilibrata fra molti tipi. Ad un maggiore indice di dominanza corrisponde dunque una maggiore omogeneità delle tessere che compongono il paesaggio; al diminuire corrisponde invece una maggiore eterogeneità.

L'indice di diversità (H) è calcolato anch'esso sulla proporzione delle classi di copertura del suolo rilevate secondo la formula:

⁸⁵ Il rapporto n_i/N indica la frequenza relativa di una singola classe.

$$H = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N)$$

dove n_i ed N hanno il significato esposto sopra. I valori che l'indice può assumere vanno da 0, quando il paesaggio è interessato da una sola classe di copertura, a $\ln(n)$ – dove n è il numero totale di classi di copertura del suolo – quando tutte le tipologie di copertura sono presenti con la stessa importanza. Ad un maggiore indice di diversità corrisponde dunque una maggiore eterogeneità delle tessere che compongono il paesaggio; al diminuire corrisponde invece una maggiore omogeneità. Ne consegue la relazione inversa tra i due indici: all'aumentare di H corrisponde una diminuzione di C e viceversa.

L'applicazione di questi indici (Tabella 8.2) ha confermato le ipotesi – esposte sopra – di maggiore eterogeneità del paesaggio nel 2003 rispetto al 1992.

	C	H
1992	0.165	0.863
2003	0.144	0.906

TABELLA 8.2: indice di dominanza di Simpson (C) e di diversità di Shannon (H) applicati all'area oggetto di studio nel periodo 1992-2003.

La *cross-tabulation* (Tab. 8.1) riporta dunque, analiticamente, tutti i cambiamenti intervenuti tra le classi di copertura del suolo nel lasso di tempo considerato, laddove la suddivisione in un numero limitato di classi di dinamica riporta le tendenze generali dei cambiamenti tra le classi di copertura, allo scopo di fornire una visione olistica dei mutamenti intervenuti nell'assetto territoriale.

Analizzando la matrice si denota come la dinamica dell'*antropizzazione* sia largamente diffusa per alcune classi di copertura del suolo a vocazione naturale ed agricola. Nella fattispecie ne è investita la classe dei boschi misti (conifere e latifoglie) nella misura di circa il 4%: questo significa che una siffatta percentuale di superficie a bosco misto presente nel 1992 ha subito un processo di antropizzazione, verso strutture edificali ed infrastrutture (presenti nel 2003), ma in maniera rilevante, anche verso (2003). Inoltre la dinamica dei boschi misti verso le colture complesse miste ad edifici si configura a un tempo come antropizzazione ma anche come *intensivizzazione* contestuale a *deforestazione*.

Analoghe considerazioni sulle dinamiche di antropizzazione vanno fatte riguardo ai boschi di latifoglie e ai boschi di conifere la cui incidenza percentuale del mutamento oscilla attorno al 5%.

Tale incidenza dell'antropizzazione risulta maggiormente elevata (tra il 32% e il 39% circa della superficie al 1992) per le aree agricole con porzioni di vegetazione naturale e le coperture a prato; in questo caso la conversione prevalente è verso l'edificato urbano e le aree caratterizzate da colture complesse (vigneti, frutteti) miste ad edificato: in questo secondo caso il processo è ibrido, caratterizzato da antropizzazione e intensivizzazione dell'agricoltura. Simili considerazioni valgono per la copertura a seminativo ("Terre arabili"), dove l'incidenza dell'antropizzazione è del 37%, prevalentemente verso colture complesse miste ad edificato; per cui, ancora una volta, il processo è misto a quello di intensivizzazione.

Il peso dell'antropizzazione risulta infine minimo (circa del 5%) per le colture complesse miste ad edificato; ciò è dovuto principalmente al drastico decremento della superficie (circa 1400 ha, vedi sopra: fig. 8.1) di questa classe ed alle dinamiche di *forestazione* ed *estensivizzazione*, conseguenza della ripresa naturale del bosco e all'abbandono culturale.

La dinamica di *estensivizzazione* incide percentualmente in misura rilevante sulle coperture costituite da terre arabili (ne investe circa il 34%) e su quelle costituite da colture complesse miste ad edifici (circa il 37%). Le dinamiche portano verso le coperture a prato e verso aree agricole con porzioni di vegetazione naturale: nel primo caso ciò è dovuto a fenomeni di abbandono culturale; nel secondo a fenomeni - in commistione con l'abbandono - di ripresa naturale del bosco e di colonizzazione ad opera del *mantello di vegetazione*, lo spazio situato tra la foresta e i coltivi, occupato da vegetazione arbustiva (PIUSSI, 1994). Quando invece il fenomeno dell'abbandono culturale si presenta senza ripresa naturale del bosco e su coperture a vocazione agricola con porzioni di vegetazione naturale, la transizione è verso le coperture a prato. Questo tipo di estensivizzazione incide per circa l'8% sulle zone agricole con vegetazione naturale.

Il processo inverso - quello dell'*intensivizzazione* dell'agricoltura - è invece fenomeno che incide in misura variabile (tra il 14% e il 18%) sulle coperture urbanizzate ("Edificato urbano discontinuo" e "Unità industriali e commerciali")

verso colture complesse miste ad edifici e coperture a seminativo: ciò è dovuto probabilmente a riconversioni fondiari intervenute nel periodo esaminato. La dinamica di intensivizzazione è anche rilevante (in misura variabile tra l'8% e il 18%) per le colture complesse miste ad edifici e le zone agricole con vegetazione naturale, sempre verso le coperture a seminativo. Caso isolato è quello della conversione delle coperture a prato in zone agricole con vegetazione naturale (meno del 10% del prato del 1992): dinamica ibrida anche in questo caso, caratterizzandosi per intensivizzazione ed estensivizzazione al tempo stesso.

Una lettura per colonne della matrice restituisce prontamente l'ampia diffusione della dinamica della *forestazione*, che investe tutte le tipologie di copertura del suolo all'esame, ma che risulta preponderante per le colture complesse miste ad edifici: circa il 30% infatti di tale copertura al 1992 risulta suddiviso tra boschi di latifoglie e boschi misti nel 2003. Anche una rilevante porzione (oltre il 6%) delle zone agricole con vegetazione naturale è investita da forestazione. In entrambi i casi ciò è dovuto, nuovamente, ai fenomeni di abbandono colturale, ripresa naturale del bosco e colonizzazione ad opera del mantello di vegetazione. Analogo discorso – in quanto investe tutte le tipologie di copertura del suolo all'esame – è valido per la dinamica del *coniferamento*, la cui incidenza percentuale – dunque quantitativa – risultò però irrilevante.

L'analisi successiva riguarda la dinamica della *deforestazione*: tale processo risulta presente e rilevante per le tre coperture boschive considerate, incidendo nella misura del 34% per le conifere, del 13% per i boschi a latifoglie e per oltre il 18% per i boschi misti. In tutti i casi la conversione è verso le coperture a prato, verso i seminativi e verso le zone agricole con porzioni di vegetazione naturale, laddove, in questi ultimi due casi, il fenomeno è contestuale a quello dell'intensivizzazione.

L'ultima analisi riguarda la dinamica identificata come "*Non variato*", fornita da una lettura della diagonale della matrice. Valori medio-alti di questa assenza di variazione tra il 1992 e il 2003 sono riscontrabili nelle classi "Edificato urbano discontinuo" (48%), "Boschi misti" (52%) e "Boschi di latifoglie" (60%). L'incidenza percentuale di questa assenza di dinamica oscilla invece tra il 23% e il 36% per le altre classi di copertura del suolo.

Un picco minimo del 17% si registra per le colture complesse miste ad edifici. Ciò è dovuto principalmente – pur in presenza di un irrilevante peso

dell'antropizzazione (circa il 5%) - al drastico decremento superficario (circa 1400 ha, vedi sopra: fig. 8.1) di questa classe ed alle dinamiche di forestazione ed estensivizzazione, conseguenza della ripresa naturale del bosco, dell'abbandono colturale e della vegetazione a mantello.

CONCLUSIONI.

L'area di studio è stata oggetto di analisi quantitative considerandola come una regione unitaria, in cui la linea confinaria, demarcata sul terreno da cippi, e la correlata fascia frontaliera, estesa ad entrambi gli Stati contermini, costituivano il centro della regione stessa. Le tipologie di copertura del suolo sono state individuate, quantificate ed analizzate puntualmente nelle loro dinamiche evolutive a prescindere dalla loro appartenenza stato-nazionale, considerate dunque facenti parte di una regione – appunto - unitaria.

Il confine interno a quest'area si caratterizza per essere di tipo successivo – imposto dal riassetto sistemico post-bellico che ha portato alla nascita del sistema bipolare – ed altamente permeabile. Ciascuno dei due confini politici stato-nazionali che si giustappongono rappresentano un abbozzo di un'unità regionale, definibile come *regione frontaliera* (BATTISTI, 2002). Questa presenta sempre delle caratteristiche diverse da quelle rintracciabili nel resto del territorio nazionale. Frequentemente – come è il caso dell'area allo studio – le due regioni contrapposte denunciano una comunanza di caratteri di poco inferiore a quella che le lega al resto dell'unità politica di cui fanno parte: nasce da qui il concetto di *regione transfrontaliera* (BATTISTI, 2002). Lo studio del *territorio* – considerato come area abitata organizzata consapevolmente dalle comunità ivi stanziate e imprescindibile dalla designazione e demarcazione di un confine che lo delimita e identifica – e della *regione*, costituiscono l'oggetto principale della ricerca geografica che fa perno sulle peculiarità e le differenziazioni riscontrabili sul terreno (BATTISTI, 2002, VALLEGA, 1976 e 1982).

Confine, regione e territorio dunque gli aspetti peculiari del presente studio: confine che delimita un territorio su cui si estende la sovranità dei moderni stati-nazione, italiano e sloveno nella fattispecie; sempre quel confine, tuttavia, che viene a trovarsi interno alla regione transfrontaliera oggetto di analisi.

In geografia, le diverse tipologie di copertura del suolo analizzate si inseriscono d'altronde a pieno titolo nelle peculiarità e nelle differenziazioni riscontrabili sul terreno pocanzi ricordate e oggetto di studi sulla regione.

Una lettura puntuale delle cartografie tematiche sopra presentate (Figure dalla 8.2 alla 8.5 incluse), conduce alle seguenti conclusioni in merito alle interrelazioni tra confine e coperture del suolo principali - in quanto caratterizzate, al tempo stesso, da una significativa estensione areale e dinamica evolutiva - nella regione transfrontaliera oggetto di analisi.

Il drastico decremento di superficie della copertura a colture complesse (vigneti, frutteti, orti domestici) miste all'edificato di pertinenza, che ne ha comportato una riduzione di ben oltre il 50%, è avvenuto in maniera preponderante a conseguenza di processi ibridi che coinvolgono dinamiche di estensivizzazione delle colture, di abbandono colturale, di colonizzazione di vegetazione a mantello (siepi, vegetazione arbustiva), di ripresa naturale del bosco e forestazione. Questo a favore di coperture a seminativo, di aree miste agricolo-naturali e di aree a boschi di latifoglie e a boschi misti.

Siffatto decremento è stato particolarmente intenso – comportando una pressoché totale scomparsa della classe originaria a favore di altre coperture – in prossimità della linea di confine e della fascia frontaliera di pertinenza sia italiana che slovena, a prescindere dal tipo di regione naturale e di paesaggio interessato. Per la copertura a colture complesse miste ad edificato, tale influenza del confine si presenta infatti sia nell'area dell'edificato urbano discontinuo di Gorizia-Nova Gorica-Šempeter/Vrtojba, sia nella zona – più a sud – della pianura isontina e del limite settentrionale del carso isontino corrispondente al corso del fiume Vipacco, sia, infine, nella fascia del paesaggio subalpino del Monte Sabotino.

Il decremento areale, comunque rilevante, risulta tuttavia di minor portata proporzionalmente all'aumentare della distanza dal confine, in particolare nelle zone scarsamente edificate a prevalente vocazione agricola o naturale. La presenza del confine e delle funzioni da questo implementate ha comportato dunque una diminuzione della specializzazione colturale e paesaggistica ed un aumento del fenomeno dell'abbandono colturale.

Le coperture caratterizzate da aree agricole miste a vegetazione naturale sono state interessate, in termini generali, da un rilevante aumento quantitativo (circa

il 70%), conseguentemente al drastico decremento di superficie della coperture a colture complesse miste ad edificato.

Pur tuttavia, in termini relativi, circa il 50% delle aree coperte da fondi agricoli misti a vegetazione naturale presenti nel 1992 è stato oggetto di riconversione fondiaria verso aree a seminativo, a colture miste ad edificato o ad edificato discontinuo. Questa riconversione però, in questo caso, non sembra discendere da una maggiore o minore distanza dalla linea di confine: le dinamiche confinarie non influiscono dunque – in questo caso di studio - su processi di intensivizzazione colturale e di antropizzazione. Caso isolato è quello della specializzazione colturale e dell'antropizzazione - rilevabile nella primissima fascia frontaliera dal confine, da parte italiana – che ha investito la zona immediatamente a nord della stazione ferroviaria “Transalpina”, in prossimità del valico internazionale di Salcano-Solkan. Ciò è dovuto anche alla presenza di una zona industriale e ad un conseguente decremento delle aree a vocazione naturale. L'ultima tipologia di copertura del suolo oggetto di analisi è quella inerente le formazioni boschive a latifoglie e miste (ad esclusione delle formazioni a conifere della fascia subalpina), considerate unitariamente in quanto, nel periodo esaminato, la loro superficie occupata non subisce rilevanti modifiche. Pur tuttavia è un dato che, sempre in termini relativi, le aree a copertura boschiva presenti nel 1992 subiscono un deciso influsso (di circa il 20% della loro superficie totale) dei processi di deforestazione e antropizzazione. Tale fenomeno risulta diffuso in tutta la regione transfrontaliera, ma di una certa rilevanza con l'approssimarsi della linea confinaria, in particolar modo nei settori subalpini e lungo il corso del Vipacco. Anche in questo caso è presente l'eccezione che conferma la regola di un tale influsso del confine: una notevole deforestazione verso zone a vigneto e frutteto ad est della municipalità di Šempeter-Vrtojba, in un'area relativamente più distante dal confine.

L'analisi del *land cover* di una regione transfrontaliera non può dunque prescindere dall'analisi delle dinamiche che il fenomeno confinario fa valere sulla regione stessa, essendo tale confine il centro dell'area transfrontaliera e contestualmente la periferia dei due stati contermini. In un'analisi multitemporale - come il presente studio - una lettura degli influssi del confine sulle tipologie di copertura del suolo si rileva poi essenziale per un'analisi del controllo delle differenze (*change detection*) intervenute nel corso del tempo.

BIBLIOGRAFIA.

ABRAMS M., HOOK S., *ASTER User Handbook-Version 2*, Jet Propulsion Laboratory (JPL) - NASA, Pasadena. 2002.

AGENZIA REGIONALE PER LO SVILUPPO E L'INNOVAZIONE NEL SETTORE AGRICOLO-FORESTALE (ARSIA), *Il paesaggio agro-forestale toscano*, ARSIA, Firenze, 2002.

AZZARI M. ET AL., *Per un atlante delle aree umide in Toscana: le trasformazioni nell'uso del suol in età moderna e contemporanea*, Atti del Workshop "Beni ambientali e culturali e GIS", Firenze, 2003.

BAIOCCHI V., LELO K., *Cartografie storiche e immagini telerilevate a confronto per l'analisi diacroniche del territorio*, in «Atti della VII Conferenza Nazionale ASITA», Verona, 2003.

BAIOCCHI V., CRESPI M.G., DE LORENZO C., *Trasformazione di datum e di coordinate per scopi cartografici: analisi delle prestazioni di alcuni software*, in «Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA», Perugia, 2002.

BAIOCCHI V., LELO K., *Georeferenziazione di cartografie storiche in ambiente Gis e loro verifica mediante rilievi GPS*, in «Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA», Perugia, 2002.

BATTISTI G., *Gorizia Nova Model Plan. Modelli per lo sviluppo sostenibile nell'area di confine*, Ricerca a regia Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia nell'ambito del programma di iniziativa comunitaria "Interreg IIIA Italia-Slovenia 2000-2006", Rapporto preliminare, Dipartimento di Scienze Geografiche e Storiche, Università di Trieste, 2004.

BATTISTI G., *Tra confine e frontiera: la regione "mobile"*, in BATTISTI G. (a cura di), *Un pianeta diviso. Contributi alla geografia dei popoli e dei confini*, Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Scienze Geografiche e Storiche, 2002.

BATTISTI G., *Una regione per Trieste*, Del Bianco, Udine, 1979.

CALZOLAIO V., *Topografia*, Paccagnella Editore, Bologna, 1977.

CAMPBELL J. B., *Introduction to Remote Sensing*, Guilford, New York, 1996.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (CCRS), *Fundamentals of remote sensing. Tutorial*, Canada Centre for Remote Sensing, 2006.

CARRANZA M. L., ACOSTA A., GIANCOLA M., *Analisi delle trasformazioni del paesaggio nel Comune d'Isernia (Italia centro meridionale)*, in «Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA», Perugia, 2002.

CECCHI G., MAZZINGHI P., PANTANI L., VALENTINI R., DE ANGELIS P., *Remote sensing of chlorophyll a fluorescence of vegetation canopies: I. near and far field techniques*, Remote Sensing of Environment, n. 47, 1994.

COMINI F., *Carta Tecnica Regionale Numerica. Criteri generali di restituzione*. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, 1997.

CEFALO R., MANZONI G., *GPS, principi ed applicazioni*, Edizioni Goliardiche, Trieste, 2003.

CORI B., CORNA PELLEGRINI G., DEMATTEIS G., PIENOTTI P., *Geografia urbana*, UTET, Torino, 1993.

DEL FAVERO R. (a cura di), *La vegetazione forestale e la selvicoltura nella regione Friuli-Venezia Giulia*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Foreste e della Caccia, Servizio della Selvicoltura, Udine, 1998.

DELLA MAGGIORE R., FRESCO R., MURA E., PEROTTO E., *Georeferenziazione di carte storiche*, in «Atti della V Conferenza Nazionale ASITA», Rimini, 2001.

DEMATTEIS G., *Rivoluzione quantitativa e nuova geografia*, Università degli Studi di Torino, 1970.

DORLING D., FAIRBAIRN N., *Mapping*, Longman, Harlow, 1997.

DREOSSI G., *Realizzazione della cartografia tematica: piani della viabilità forestale, tipi forestali e tipi strutturali*, Direzione Regionale delle Foreste, Servizio della Selvicoltura, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1999.

EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER (ERSDAC), *Aster user's guide. Dem product (L4A01)*, ERSDAC, 2005.

ERDAS, *Imagine Field Guide*, Erdas Inc., Atlanta, 1999.

ERDAS, *Imagine Tour Guide*, Erdas Inc., Atlanta, 1999.

ESRI, *Using ArcView GIS*, ESRI, Redlands, 2000.

FAVRETTO A., *Strumenti per l'analisi geografica: GIS e telerilevamento*, Patron Editore, Bologna, 2006 (in corso di pubblicazione).

FAVRETTO A. (eds.), *Classification and thematic mapping in a Gis environment*, Patron Editore, Bologna, 2005.

FAVRETTO A., MASTRONUNZIO M., *Integrazione delle cartografie nazionali per le aree transfrontaliere. Un caso applicativo: l'area urbana di Gorizia-Nova Gorica*, in «Atti del Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Cartografia (AIC)», Trieste, 2005 (in corso di pubblicazione).

FAVRETTO A., *Come usare la cartografia storica all'interno di un GIS*, Atti del Workshop "Beni ambientali e culturali e GIS", Firenze, 2003.

FAVRETTO A., JÜRGENS C., *Change detection techniques applied on satellite imagery in order to delineate urban sprawl evolution in Trieste province (north east of Italy) between 1975 and 1999*, in «IV International Symposium Remote Sensing of Urban Areas», Regensburg, 2003.

FAVRETTO A., BATTISTI G., MAURO G., *Urban growth of small villages through a comparison of ancient maps and satellite imagery*, in «Proceeding - 3rd International Symposium Remote Sensing of Urban Areas», Tüyap - Istanbul, 2002.

FAVRETTO A., *Nuovi strumenti per l'analisi geografica: i GIS*, Patron Editore, Bologna. 2000.

GAO YAN, *Pixel based and object oriented image analysis for coal fire research*, unpublished Ph.D dissertation, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, 2003.

GIORGI G., *L'uso delle carte storiche nello studio dell'evoluzione ambientale*, in «Atti della V Conferenza Nazionale ASITA», Rimini, 2001.

GOMARASCA M.A., *Introduzione a Telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali*, Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT), Artestampa, Varese. 1997.

GOMARASCA M. A., *Elementi di geomatica*, Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT), Milano, 2004.

HUGGETT R., *Analisi dei sistemi e spazio geografico*, Franco Angeli, Milano, 1983.

ILIFFE J.C., *Datums and map projections*, Whittles Publishing, Caithness, 2000.

ISNARD H., RACINE J. B., REYMOND H., *Problématiques de la géographie*, Puf, Paris, 1981.

JENSEN J.R., *Remote Sensing of Environment*, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, 2000.

JONES C., *Geographical information systems and computer cartography*, Longman, Harlow, 1997.

KENNEDY M., KOPP S., *Understanding Map Projections*, ESRI, Redlands, 2000.

LECHI G., *Dispense del corso di telerilevamento*, Politecnico di Milano, 2002.

LEICA GEOSYSTEMS, *Atcor for Imagine 8.7. Haze reduction, atmospheric and topographic correction*, Leica Geosystems Gis & Mapping, Atlanta, 2004.

LEICA GEOSYSTEMS, *Leica Photogrammetry Suite Orthobase & Orthobase Pro user's guide*, Leica Geosystems Gis & Mapping, Atlanta, 2003.

LILLESAND T.M., KIEFER R.W., *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley & Sons, New York, 1999.

MARTINIS B., *La geologia*, in ISTITUTO PER L'ENCICLOPEDIA DEL FRIULI-VENEZIA GIULIA (a cura di), *Enciclopedia monografica del Friuli-Venezia Giulia. Il paese*, Enciclopedia del Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1971.

MASTRONUNZIO M., KLEVISSER F., *Produzione di cartografia tematica unitaria per le aree transfrontaliere: il caso di Gorizia e Nova Gorica*, in «Atti del XXIX Congresso Geografico Italiano», Patron Editore, Bologna, 2005.

MASTRONUNZIO M., MAURO G., *Approccio Gis multitemporale per la stima delle variazioni del land cover in un'area transfrontaliera: la coltura della vigna nella penisola di Muggia*, in «Atti del Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Cartografia (AIC)», Trieste, 2005 (in corso di pubblicazione).

MATHER P. M., *Computer processing of remotely-sensed images*, John Willey & Sons, New York, 1999.

MAURO G., *L'ausilio dell'interpretazione visiva per l'analisi dei cambiamenti del territorio*, in «Atti del XXIX Congresso Geografico Italiano», Patron Editore, Bologna, 2005.

MAURO G., *Statistica. Materiale didattico del docente*, Edizioni Goliardiche, Trieste, 2005.

MAURO G., MASTRONUNZIO M., *Metodologie Gis e remote sensing per il monitoraggio qualitativo della vegetazione: una prima applicazione su un'area campione della Provincia di Pordenone*, Atti del Workshop "Beni ambientali e culturali e GIS", Firenze, 2003.

MAURO G., *Metodologie GIS e remote sensing per l'analisi quali-quantitativa della vegetazione con l'utilizzo di immagini satellitari e fonti cartografiche non omogenee*, Tesi di Dottorato di Ricerca non pubblicata, Università degli Studi di Trieste, 2003.

MIGLIACCIO F., *Cartografia tematica e automatica*, Clup, Milano, 2001.

MUSSO N., *Studio della produttività delle biomasse agricole per scopi energetici tramite l'utilizzo di immagini satellitari. Il caso della coltura agroindustriale del mais nella Provincia di Gorizia*, Tesi di Laurea non pubblicata, Università degli Studi di Trieste, 2005.

PANIZZA M., DE NATALE F., PUZZOLO V., BUZZONE L., *Confronto tra tecniche di georeferenziazione ed ortorettificazione su immagini Landsat TM in un'area alpina del Trentino*, in «Atti della VIII Conferenza Nazionale Asita», Roma, 2004.

PERSI P., *Una cartografia per il territorio*, Istituto Interfacoltà di Geografia, Università degli Studi di Urbino, 1991.

PIGNATTI S., *Ecologia del paesaggio*, UTET, Torino, 1994.

PIGNATTI S., *I boschi d'Italia*, UTET, Torino, 1998.

PIROLA A., BAGNI N., LAUSI D., PUPILLO P. (a cura di), *Trattato di Botanica*, Antonio Delfino Editore, Roma, 1982.

PIUSSI P., *Selvicoltura Generale*, UTET, Torino, 1994.

POLDINI L., *La vegetazione del Carso Isontino e Triestino*, LINT, Trieste, 1989.

PROVINCIA DI GORIZIA, *Analisi socio-economica della Provincia di Gorizia*, Provincia di Gorizia, Gorizia, 2002.

PROVINCIA DI GORIZIA, *La costruzione del piano territoriale e provinciale*, Provincia di Gorizia, Gorizia, 2002.

PROVINCIA DI GORIZIA, *Progetto Transplan. Pianificazione territoriale transfrontaliera congiunta. Linee guida per una pianificazione coordinata dell'area transfrontaliera*, Provincia di Gorizia, Gorizia, 2005.

RACINE J. B., REYMOND H., *L'analisi quantitativa in geografia*, Marsilio Editori, Venezia, 1983.

REGIONE AUTONOMA FRIULI-VENEZIA GIULIA, DIREZIONE CENTRALE SVILUPPO E PROGRAMMAZIONE, *Quinto Censimento Generale dell'Agricoltura. Dati comunali*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Trieste, 2003.

REGIONE AUTONOMA FRIULI-VENEZIA GIULIA, DIREZIONE GENERALE SERVIZIO STATISTICA, *Regione in cifre 2005*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Trieste, 2005.

REGIONE AUTONOMA FRIULI-VENEZIA GIULIA, DIREZIONE REGIONALE DELLE FORESTE E DELLA CACCIA, *Boschi e territorio nella Regione Friuli-Venezia Giulia*, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Trieste.

ROBINSON A. H., MORRISON J. L., MUEHRCKE P. C., KIMERLING A. J., GUPTILL S. C., *Elements of Cartography*, John Wiley & Sons, New York, 1995.

SABINS F.F., *Remote sensing: principles and interpretation*, Ed. W. H. Freeman, San Francisco. 1978.

SESTINI A., *Cartografia generale*, Patron Editore, Bologna, 1981.

SLUGA G., *The problem of Trieste and the italo-yugoslav border*, State University of New York press, Albany, 2001.

SMIRAGLIA D., CARRANZA M. L., BLASI C., *Analisi diacronica dei contatti e valutazione dello stato di conservazione del paesaggio*, in «Atti della VI Conferenza Nazionale Asita», Perugia, 2002.

TOURING CLUB ITALIANO, *Il Friuli-Venezia Giulia. Enciclopedia tematica. Cartografie*, Touring Editore, Milano, 2006.

UDINA M. (a cura di), *Gli accordi di Osimo: lineamenti introduttivi e testi annotati*, LINT, Trieste, 1979.

VALLEGA A., *Teoria regionale: problemi di scala e tassonomia*, in PAGNINI P. (a cura di), *Geografia per il principe. Teoria e misura dello spazio geografico*, Unicopli, Milano, 1985.

VALLEGA A., *Compendio di geografia regionale*, Mursia, Milano, 1982.

VALLEGA A., *Regione e territorio*, Mursia, Milano, 1976.

VALUSSI G., *Il confine nordorientale d'Italia*, ISIG, Gorizia, 2000.

VALUSSI G., *Il territorio*, in ISTITUTO PER L'ENCICLOPEDIA DEL FRIULI-VENEZIA GIULIA (a cura di), *Enciclopedia monografica del Friuli-Venezia Giulia. Il paese*, Enciclopedia del Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1971.

VIANELLO G., *Cartografia e fotointerpretazione*, Editrice CUELB, Bologna, 1989.

VITIELLO M., CARRANZA M. L., ACOSTA A., *Cartografia CORINE land-cover attraverso analisi di ortofoto ed immagini MIVIS: un esempio per il Comune d'Isernia (Molise)*, in «Atti della VI Conferenza Nazionale Asita», Perugia, 2002.