

Mappatura delle specie arboree del Parco del Ticino mediante Telerilevamento iperspettrale



**Consorzio Parco Lombardo
della Valle del Ticino**

Sviluppo sostenibile:
tutela della biodiversità
e dell'ambiente, qualità della vita

Regione Lombardia
Direzione Generale Territorio
ed Urbanistica





**Mappatura delle specie arboree
del Parco del Ticino
mediante Telerilevamento
iperspettrale**

Lo studio è stato realizzato da:



Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino

Via Isonzo, 1 - 20013 - Pontevecchio di Magenta (Mi)

Tel. 02/972101; Fax 02/97950607

E-mail: direzione@parcoticino.it

Sito web: www.parcoticino.it

Lo studio è stato finanziato da:



Regione Lombardia

Direzione Generale Territorio ed Urbanistica

via Stresa, 22/24 - 20125 Milano

tel. 02/67655744

Sito web: www.regione.lombardia.it

Con la partecipazione di:



Regione Piemonte

Piazza Castello, 165 - 10122 Torino

Tel. 011/43211

Sito web: www.regione.piemonte.it



Parco Naturale Valle del Ticino

Località Villa Picchetta - 28062 - Cameri (NO)

Tel. 0321/517706; Fax 0321/517707

E-mail: info@parcodelticino.pmn.it

Sito web: www.parcodelticino.pmn.it

Coordinatore dei lavori e Responsabile del Procedimento

Dario Furlanetto

Supervisione scientifica

Mirco Boschetti, Luigi Boschetti

Elaborazioni dati

Ilenia Canova, Laura Casati, Stefano Oliveri

Raccolta dati di campagna

Ilenia Canova, Laura Casati, Roberto Castrovinci, Stefano Olivieri

Autori dei testi

Mirco Boschetti, Ilenia Canova, Laura Casati, Stefano Oliveri

Si ringraziano per la preziosa collaborazione

Lorenzo Busetto, Claudia Giardino, Gianandrea Lorenzoni, Gabriella Penna,

Ilaria Salvadori ed i Guardiaparco, in particolare Massimo Balocco,

Davide Camerini, Marco Mapelli e Matteo Tacconi

Coordinamento editoriale

Ilenia Canova, Laura Casati

Progetto grafico, impaginazione, fotolito e stampa:

Il Guado - Comunicazione, Grafica, Stampa

Via Pablo Picasso, 21/23 - 20011 Corbetta (MI)

MAGGIO 2005



Ringraziamenti

Si desidera ringraziare sentitamente il dott. Alessandro Moneta e il dott. Mario Rossetti nonché tutto il loro staff che, in qualità rispettivamente di Assessore e di Direttore Generale al Territorio e Urbanistica della Regione Lombardia fino al mese di marzo 2005, hanno permesso la realizzazione della ricerca presentata in questo volume. Questo studio, infatti, si inserisce nell'ambito delle numerose attività di ricerca e monitoraggio delle ricadute ambientali causate dall'aeroporto di Malpensa sul territorio del Parco, realizzate attraverso la sottoscrizione di specifiche convenzioni tra Parco Ticino e Regione Lombardia.

Al dott. Davide Boni e al dott. Mario Nova, neo Assessore e neo Direttore Generale al Territorio e Urbanistica della Regione Lombardia, vanno gli auguri di buon lavoro e il ringraziamento per l'attenzione e l'interesse mostrati nei confronti di questa ricerca.



Premessa

I boschi del Parco del Ticino Lombardo rappresentano un patrimonio ad altissimo contenuto di biodiversità e il fiume Ticino costituisce oggi l'unico buffer naturale con zone umide e forestali che taglia verticalmente la Lombardia mantenendo un corridoio ecologico di importanza strategica che collega Catena Alpina ed Appennino e quindi Europa Continentale e bacino del Mediterraneo.


L'importanza dei boschi del Ticino richiede periodicamente un aggiornamento sia sulla struttura vegetazionale dei vari ecosistemi, con particolare riguardo alla presenza di specie esotiche infestanti, che sullo stato di salute dei boschi, considerato un importante indicatore di degrado ambientale soprattutto in zone soggette a forte impatto antropico.

Tali informazioni rappresentano le basi necessarie per l'elaborazione dei diversi strumenti di gestione forestale, per la progettazione delle attività di tutela e riqualificazione delle aree naturali. Inoltre l'identificazione di particolari anomalie nello stato della vegetazione serve a determinare e sperimentare quali interventi di emergenza adottare.

Nell'ambito delle attività di controllo dello stato di salute e stabilità dei suoi ecosistemi, il Parco del Ticino si avvale da anni di un gruppo di esperti forestali che svolgono un ruolo indispensabile di controllo in dettaglio del territorio. A supporto di questa necessaria azione di campo, negli ultimi anni sta sperimentando una serie di tecniche di monitoraggio che si avvalgono dell'analisi di fotografie aeree e ha implementato un moderno Sistema Informativo Territoriale per la gestione ed analisi delle informazioni di carattere spaziale riguardanti la flora e la fauna del Parco.

A queste metodologie si è affiancato l'utilizzo dei dati telerilevati per il monitoraggio dei boschi. Questi dati permettono di studiare lo stato fisico della vegetazione e la struttura vegetazionale dei vari ecosistemi, fornendo informazioni contemporanee per grandi estensioni territoriali. Per questa ragione le tecniche di telerilevamento ben si adattano al monitoraggio dei 91.140 ha di terreni agricoli e forestali del Parco e diventano indispensabili per pianificare una corretta gestione forestale.

Il Parco del Ticino si era già attivato in tale prospettiva realizzando uno primo studio, finanziato dalla Regione Lombardia, sul monitoraggio dello stato di salute dei suoi boschi tramite tecniche di Telerilevamento basate sull'analisi di fotografie aeree all'Infrarosso Falso Colore (AA.VV., 2001).




Peculiarità e applicazioni del Telerilevamento per i boschi del Parco del Ticino

A partire dal 1989, in tutta Europa, si assiste ad un deterioramento generale dello stato delle chiome, con punte massime di defogliazione per la Farnia (*Quercus robur*) (UNECE e EC, 1999). Tale fenomeno, denominato "deperimento delle querce", è da considerarsi causato da un quadro di malattie differenti che, operando in sinergia, causano danni ingenti al patrimonio boschivo. Tale deperimento è stato rilevato, sebbene con differenti caratteristiche, anche in quasi tutte le regioni italiane. I sintomi riscontrati in Italia sono simili a quelli descritti negli altri Paesi europei ma sono stati delineati fattori peculiari, principalmente ambientali, climatici e selvicolturali, che influiscono sulla malattia e contribuiscono alla sua incidenza. I boschi di Farnia nel territorio del Parco mostrano condizioni di generale sofferenza a seguito di riscontrate situazioni di stress vegetazionale: una massiccia presenza di insetti xilofagi e patogeni fungini, la cui diffusione è stata probabilmente favorita dalle ripetute infestazioni di processionaria degli ultimi 3 anni, agenti meteorologici particolarmente sfavorevoli come le gelate primaverili, le estati siccitose, il forte vento e il diffuso inquinamento atmosferico. La situazione si rivela ancora più preoccupante in ragione del fatto che la farnia è considerata la "spina dorsale" dei boschi pianiziali del Parco ed una sua scomparsa porterebbe inevitabilmente alla degenerazione di aree già fortemente pregiudicate dalla presenza di specie infestanti estranee alla flora tipica della pianura padana. Le zone maggiormente colpite si collocano, infatti, nella parte centro-settentrionale del Parco, dove ormai da anni si sta tentando di limitare la diffusione della *Robinia pseudoacacia* e soprattutto del *Prunus serotina* con appositi interventi di miglioramento forestale; in questi boschi la scomparsa della Quercia darebbe certamente spazio ad un'ulteriore diffusione di queste specie infestanti.

Il lavoro esposto in questa pubblicazione si colloca quindi in un più generale quadro di monitoraggio dei boschi del Parco portando, in prima istanza, all'individuazione, attraverso l'analisi di dati telerilevati iperspettrali, della distribuzione di alcune importanti specie arboree, facendo particolarmente attenzione a quelle esotiche infestanti, con la conseguente produzione di mappe specie-specifiche.

In particolare, il primo obiettivo è rappresentato dalla mappatura della distribuzione di specie esotiche infestanti quali *Prunus serotina*, *Robinia pseudoacacia* e *Quercus rubra* e di altre specie di interesse ecologico quali *Quercus robur* e *Carpinus betulus* rivelatori della massima espressione di naturale fitocenosi del bosco identificata dall'associazione Quercio-Carpineto. L'individuazione di queste specie consente infatti di definire aree a differente stato di degrado e naturalità su cui pianificare interventi di



gestione volta al contenimento del fenomeno invasivo e quindi alla tutela delle aree boscate naturali.

In quest'ottica, sono stati mappati anche i boschi di Castagno (*Castanea sativa*), i boschi di Conifere (*Pinus silvestre*, *P. rigida*, *P. nigra* e *P. strobus*), i Saliceti (*Salix alba*, *S. cinerea*, *S. elaeagnos*), gli Ontaneti (*Alnus glutinosa*) e i boschi di Pioppo (*Populus alba*, *P. nigra*, *P. tremula*).

Per il raggiungimento dei obiettivi poc'anzi citati, il Parco si è avvalso della collaborazione di due importanti centri di ricerca italiani nel campo del *remote sensing*: il Reparto Telerilevamento dell'IREA-CNR di Milano ed il gruppo di Telerilevamento del DISAT dell'Università di Milano Bicocca.

Tali centri potranno svolgere un ruolo di supporto fondamentale in altri progetti sperimentali e applicativi, non solo in campo forestale, nei quali il Parco intenderà impiegare i dati MIVIS a propria disposizione.

Infatti il Parco dispone oggi di un dataset georeferenziato di dati iperspettrali ad alta risoluzione geometrica. Grazie alle competenze maturate nel corso del progetto dal personale dell'Ente, tale dataset potrà essere ulteriormente impiegato in campo forestale per altre applicazioni.

Infatti questi dati sono ora utilizzati quale input in un progetto che il Parco sta conducendo, in collaborazione ancora con il gruppo di Telerilevamento del DISAT, sullo studio dei fenomeni di deperimento della Farnia. Questo nuovo progetto ha come obiettivo la produzione di una mappa sullo stato di salute dei boschi di Quercia attraverso la spazializzazione di alcuni parametri biofisici della vegetazione quali la concentrazione di clorofilla, la fluorescenza clorofilliana e il contenuto d'acqua delle foglie che sono stati registrati in dieci siti rappresentativi del Parco affetti da differenti gradi di deperimento.

Concludendo si può affermare che, per estensione del territorio boschivo indagato e per dettaglio specifico delle specie classificate, questo lavoro, realizzato nell'arco di oltre un anno e mezzo tra marzo 2003 e novembre 2004, rappresenta, nel panorama italiano, una delle più importanti esperienze nell'impiego di dati telerilevati iperspettrali ad elevata risoluzione geometrica per la mappatura delle specie arboree.

IL DIRETTORE
Dario Furlanetto

IL PRESIDENTE
Milena Bertani

Indice

● Capitolo1	Introduzione	11
1.1	Che cos'è il telerilevamento	11
	Le peculiarità del Telerilevamento	12
1.2	La radiazione elettromagnetica	14
	La firma spettrale	14
	Le caratteristiche spettrali dei suoli	14
	Le caratteristiche spettrali della corpi idrici	16
	Le caratteristiche spettrali della vegetazione	16
1.3	Il processo del Telerilevamento	18
1.4	I sensori: Dispositivi a scansione	19
1.5	Le immagini digitali	20
	Risoluzione geometrica o spaziale	22
	Risoluzione spettrale	22
1.6	Dalle immagini telerilevate alle mappe tematiche	23
	Scheda di approfondimento A:	
	Il sensore iperspettrale MIVIS	25
● Capitolo2	Metodologia	29
2.1	Definizione della legenda	29
	Scheda di approfondimento B:	
	Principali caratteristiche delle specie forestali classificate nel Parco Ticino	30
2.2	Acquisizione dei dati telerilevati utilizzati per la ripresa MIVIS	38
	Pianificazione del sorvolo	38
2.3	Fasi del pre-processamento	40
	Correzione atmosferica	41
	Correzione geometrica	42
	Minimizzazione dell'effetto della geometria di ripresa	44
	Identificazione delle bande rumorose	46
	Identificazione delle bande significative per la classificazione: potere discriminante	48
2.4	Ricerca delle verità a terra	49
	Scheda di approfondimento C: GPS	65



2.5 Elaborazione dei dati	66
La classificazione automatica	66
Scheda di approfondimento D: Basi statistiche del classificatore di massima verosimiglianza	68
Bande utilizzate	71
2.6 Procedura di creazione delle mappe	71
Fase I: Classificazione automatica	71
Fase II: Post-classificazione	72
Fase III: Mosaicatura delle immagini	73
Fase IV: Accorpamento delle specie	74
● Capitolo3 Risultati	79
3.1 Distribuzione delle classi nel territorio del Parco Lombardo del Ticino	79
1. Colline moreniche a nord	91
2. Area urbanizzata a est di Malpensa	91
3. Asta fluviale in zona centrale	91
3.2 Distribuzione delle classi nel territorio del Parco Naturale del Ticino	93
● Capitolo4 Valutazione dei risultati	101
4.1 Valutazione quantitativa di una classificazione	101
Scheda di approfondimento E: Valutazione quantitativa dell'accuratezza di una classificazione	102
4.2 Validazione quantitativa della mappa	105
Schema di campionamento	105
Matrice di confusione ed indici di accuratezza	106
● Capitolo5 Conclusioni	109
Glossario	112
Bibliografia	115
Pubblicazioni tecniche e scientifiche del Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino	118





● Capitolo 1 Introduzione

Con questo lavoro, si è voluto testare l'utilizzo di dati iperspettrali aerei acquisiti dal sensore MIVIS appartenente al Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali (LARA) del CNR (vedi Scheda di approfondimento A) allo scopo di mappare alcune specie arboree del Parco di particolare interesse forestale ed ecologico. L'obiettivo è stata la definizione della procedura più idonea al trattamento dei dati MIVIS al fine di produrre una mappa delle specie arboree, con particolare riguardo per quelle esotiche infestanti (*Prunus serotina*, *Quercus rubra* e *Robinia pseudoacacia*), indicatori dello stato di degrado ambientale dei boschi.

1.1 Che cos'è il Telerilevamento

Nel corso della sua storia, l'uomo ha sempre cercato nuovi modi per superare i suoi limiti naturali di osservazione e di percezione visiva, per riuscire a scrutare oltre il muro, la collina, la montagna. Il Telerilevamento può essere considerato una tappa di questo cammino dell'uomo verso una visione più completa e complessiva dell'ambiente in cui vive.

Con il termine **Telerilevamento** (*Remote Sensing*) si intende un approccio multidisciplinare allo studio del territorio e dell'ambiente che si basa sulla possibilità **di acquisire a distanza informazioni** dettagliate **sulle caratteristiche** qualitative e quantitative di superfici naturali o porzioni **di territorio**.

L'acquisizione dei dati in Telerilevamento avviene grazie a speciali **sensori che registrano le informazioni** trasportate dall'**energia elettromagnetica** emessa, riflessa o diffusa dai corpi osservati, riuscendo a rendere "visibili" radiazioni che l'occhio umano non sarebbe altrimenti in grado di percepire.

La prospettiva di osservazione varia a seconda della **piattaforma** che il Telerilevamento utilizza (terra, aereo, satellite), infatti la **distanza di osservazione** dalla superficie indagata può essere prossima, con rilievi eseguiti ad altezze di qualche metro da terra, o estrema, grazie alle prospettive di osservazione della Terra rese possibili a partire dagli anni '70 dall'impiego delle tecnologie satellitari per usi civili.

Le origini del Telerilevamento si possono far risalire alla scoperta della fotografia fatta da Nicephore Niépce nel 1825, da allora l'uomo ebbe la possibilità di migliorare le sue capacità di osservazione della realtà e di fissare in modo permanente l'informazione di tipo visivo.

Le prime immagini della terra trasmesse dal satellite meteorologico TIROS-1 (*Television Infrared Observation Satellite*) nel 1960 convinsero la comunità scientifica e quella militare delle immense capacità di osservazione di un tale strumento.

Il successivo e recente progresso tecnologico nei settori della sensoristica, dell'aeronautica spaziale e dell'elettronica hanno contribuito alla realizzazione di strumenti sempre più sofisticati ed efficaci. Dall'esigenza di operare in qualunque situazione ambientale a qualunque ora del giorno, sono nati i presupposti di ricerca per la realizzazione di alcuni sistemi di indagine e di ricognizione come il *radar* che, sfruttando le caratteristiche delle microonde, può fornire informazioni a qualsiasi ora e in tutte le condizioni meteorologiche, i sensori iperspettrali che, grazie al loro dettaglio spettrale, sono in grado di indagare caratteristiche quantitative della superficie terrestre, o i sensori di nuova generazione che forniscono immagini ad altissima risoluzione spaziale perfino inferiore al metro.

Le peculiarità del Telerilevamento

Nel Telerilevamento l'osservazione del territorio è possibile grazie alla ripresa a distanza e all'uso di sensori. Grazie alla prima caratteristica è possibile **monitorare** vasti territori, anche quelli posti in zone remote ed inaccessibili (ad esempio i ghiacciai, i deserti o le foreste boreali), senza un contatto diretto ed un intervento invasivo su essi (si pensi alla possibilità di controllare lo stato di salute di una foresta senza dover raccogliere campioni delle sue foglie). I sensori poi consentono di vedere cose che ad occhio nudo non saremmo in grado di distinguere, discriminando in un'immagine un gran numero di elementi (suolo, vegetazione, acqua, ecc.) e riconoscendo le loro caratteristiche (umidità, stato di salute, concentrazione dei nutrienti, ecc.).

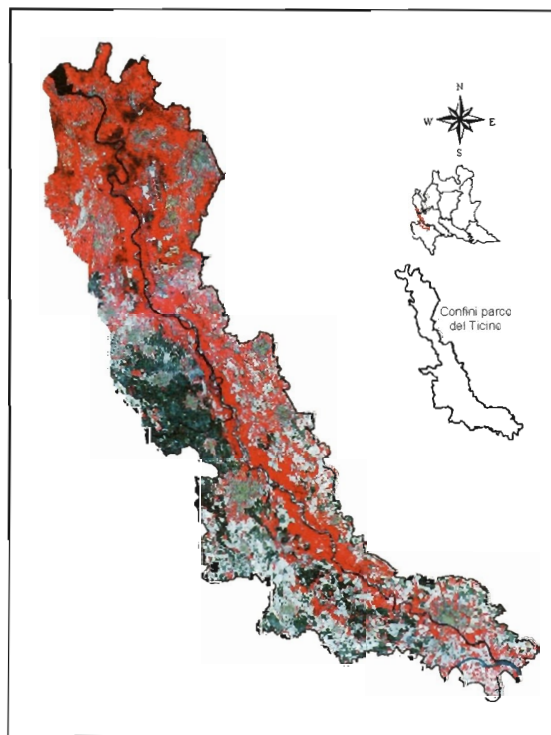
Le caratteristiche che rendono il Telerilevamento un potente strumento per il monitoraggio dell'ambiente sono la ripresa sinottica, la ripresa multispettrale e la ripresa multitemporale.

Ripresa sinottica

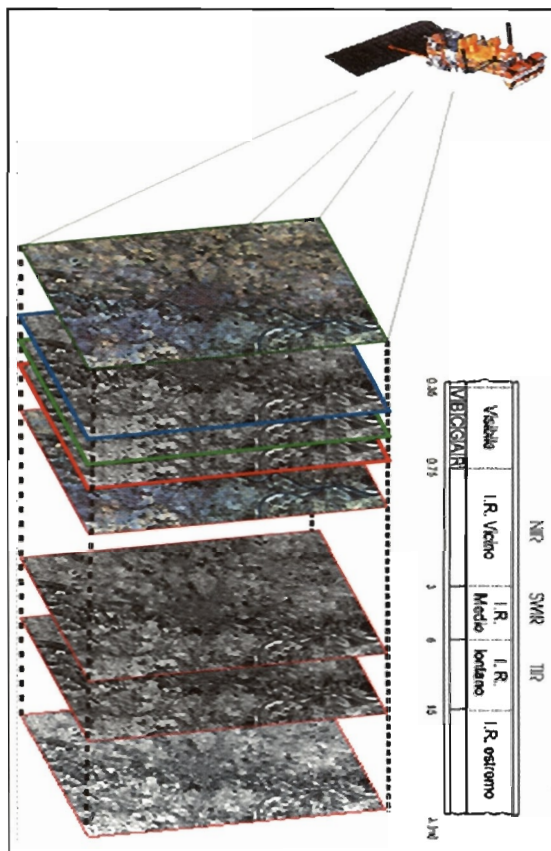
La ripresa a distanza offre una prospettiva di visione di estese porzioni di territorio: possiamo così seguire il percorso del fiume Ticino lungo i 110 Km dal Lago Maggiore alla sua immissione nel fiume Po (Figura 1).

Ripresa multispettrale

La visione a colori dell'uomo è limitata perché permette di osservare solo una



● **Figura 1**
Una visione sinottica dell'intero Parco del Ticino ripresa dal sensore Spot XS (RGB 123)



● **Figura 2**
La ripresa multispettrale delle sette bande del sensore TM

piccola parte del comportamento spettrale degli oggetti che avviene sempre lungo tutto lo spettro elettromagnetico. Il Telerilevamento, invece, consente di misurare il comportamento delle superfici in varie porzioni dello spettro, riprese dalle bande dei sensori, riuscendo così a distinguere in un territorio tipologie e stato delle superfici e degli oggetti che lo compongono (Figura 2).

Ripresa multitemporale

Infine, le tecniche di Telerilevamento consentono di riprendere la stessa scena ad intervalli di tempo diversi e regolari (Figura 3). Questo è particolarmente interessante se si è interessati a monitorare fenomeni naturali con un andamento dinamico, come l'evoluzione meteorologica, lo scioglimento dei ghiacciai, il ciclo vegetativo delle colture, o fenomeni devastanti connessi all'attività umana, come la deforestazione di alcune aree del pianeta.



● **Figura 3**
Esempio di ripresa multitemporale: l'area della Malpensa vista dal sensore Landsat TM prima dell'ampliamento dell'aeroporto nel 1994 (a) e dopo nel 1999 (b)

1.2 La radiazione elettromagnetica

La radiazione elettromagnetica (EM) gioca nel Telerilevamento il ruolo fondamentale di mezzo che trasporta le informazioni relative alle superfici che si intendono studiare. La radiazione EM è una forma di energia che si propaga alla velocità della luce sotto forma di onde, che attraversa lo spazio o i mezzi materiali con i quali interagisce, modificandosi o eventualmente trasformandosi in un'altra forma di energia.

Tutti i corpi emettono energia elettromagnetica, con lunghezze d'onda proporzionali alla loro temperatura. In particolare, un oggetto molto caldo (come il Sole, 6000 K) emette radiazione ad una lunghezza d'onda minore (massimo di emissione tra i 0,4-0,7 μm) rispetto a quella emessa da un corpo con temperature più basse (come la Terra, 300 K, con massimo di emissione tra gli 8-14 μm).

L'insieme delle radiazioni EM emesse da un corpo, ordinate secondo la loro lunghezza d'onda, costituiscono lo spettro elettromagnetico. Esso viene convenzionalmente suddiviso in diverse regioni (o bande spettrali) che prendono il nome o dalla sorgente, come i raggi Gamma o X, o come estensione del visibile, quali ultravioletto (UV) o infrarosso (IR), o ancora per l'utilizzo pratico, come per le onde radio. L'occhio umano è in grado di percepire queste informazioni unicamente all'interno di una piccola zona dello spettro elettromagnetico, detta porzione del visibile (vedi Figura 4).

Rispetto all'occhio umano, i sensori utilizzati nel *remote sensing* sono in grado di rilevare la radiazione in un range di lunghezze d'onda molto più ampio, il che consente di ottenere informazioni supplementari sulle superfici indagate.

Le bande spettrali più utilizzate nel telerilevamento sono:

- il visibile VIS (0,4 - 0,7 μm),
- l'infrarosso (0,7 μm - 1 mm), che viene ulteriormente suddiviso in:
 - infrarosso vicino o riflesso NIR (0,7 - 3 μm);
 - infrarosso medio SWIR (3 - 7 μm);
 - infrarosso lontano o termico TIR (7 - 20 μm);
 - infrarosso estremo TIR (> 20 μm);
- le microonde (1 mm - 300 cm), dove si usano strumenti sia passivi che attivi (ad esempio il radar).

La firma spettrale

L'energia EM si manifesta solo attraverso gli effetti della sua interazione con le superfici naturali. Quando una radiazione EM colpisce un corpo qualunque (E_i = energia incidente), sono possibili tre meccanismi di interazione: una parte dell'energia viene riflessa (E_r), una parte assorbita (E_a) e la restante viene trasmessa attraverso il mezzo (E_t) (Figura 5).

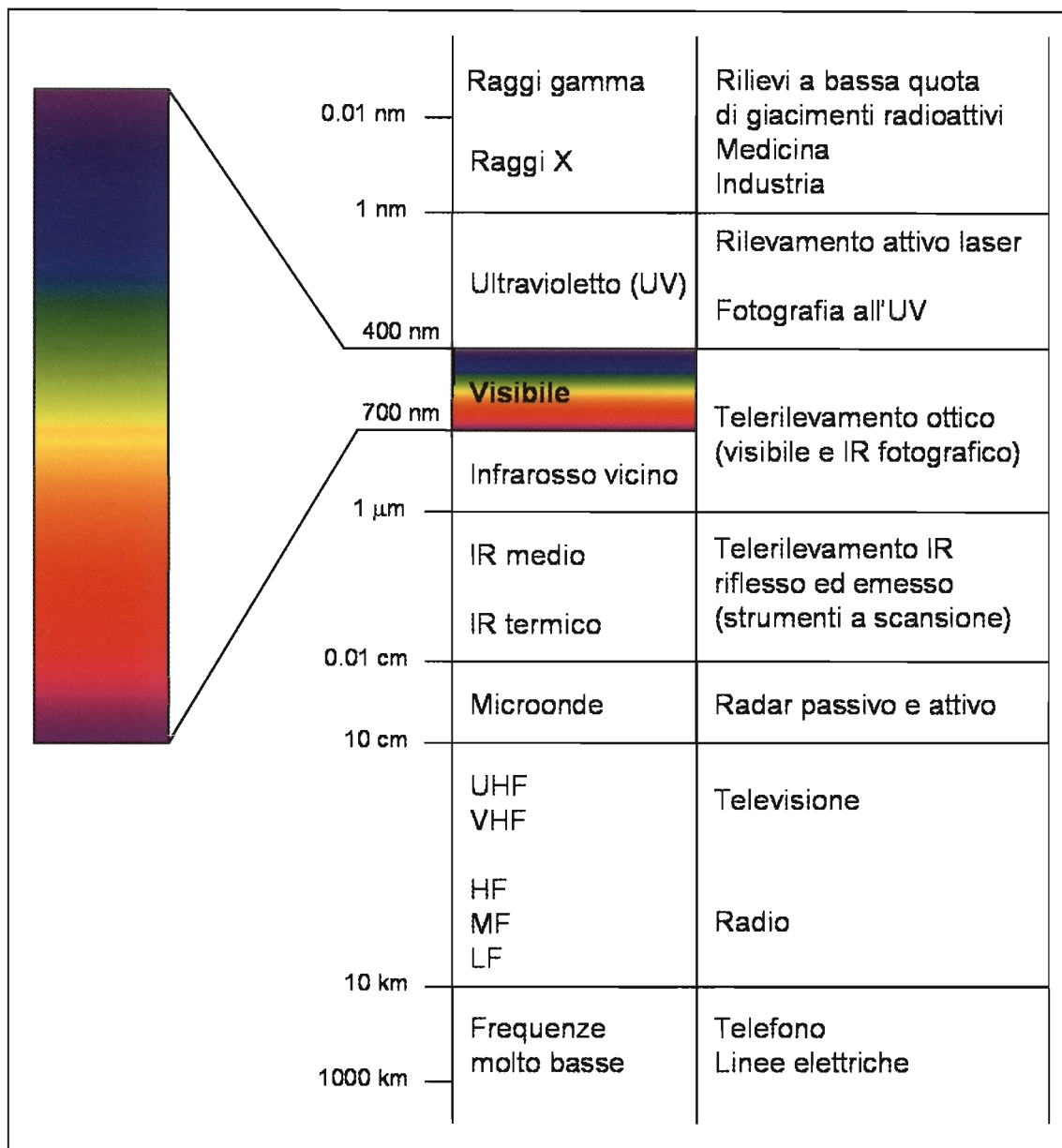
La radiazione riflessa da un oggetto contiene informazioni sulla natura dell'oggetto stesso.

Diversi tipi di superficie come l'acqua, il suolo nudo o la vegetazione riflettono la radiazione in modo diverso e peculiare alle varie lunghezze d'onda.

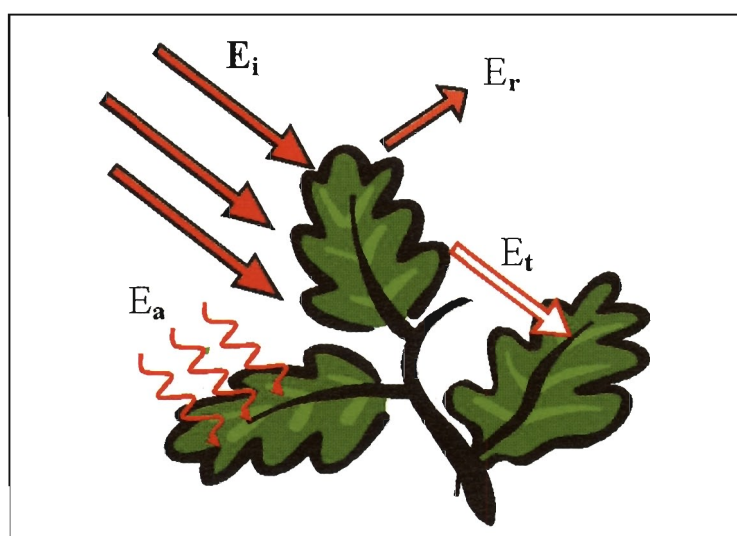
Se si riporta su un grafico la quantità di radiazione riflessa da una superficie in funzione della lunghezza d'onda, si ottiene la firma spettrale di quella superficie.

Le caratteristiche spettrali dei suoli

La riflessione di un suolo nudo aumenta leggermente dal visibile all'infrarosso, e il comportamento spettrale cambia a seconda del tipo di suolo e del contenuto di acqua.



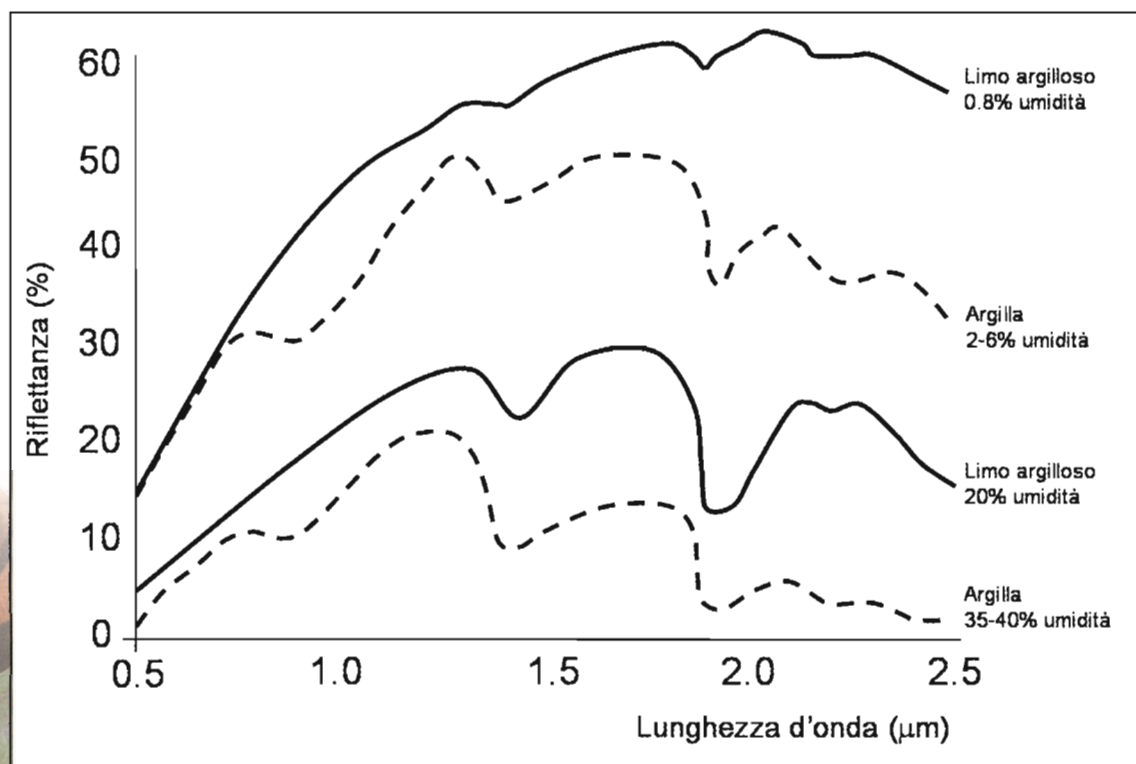
15



● **Figura 4**
Lo spettro elettromagnetico

● **Figura 5**
Interazione della radiazione elettromagnetica con le superfici

All'aumentare dell'umidità del suolo la sua riflettività diminuisce. Per questa ragione i suoli dopo una pioggia appaiono all'occhio scuri mentre quelli asciutti risultano molto più chiari e brillanti (Figura 6).



● **Figura 6**
Firma spettrale di suoli diversi al variare del contenuto d'acqua

Le caratteristiche spettrali dei corpi idrici

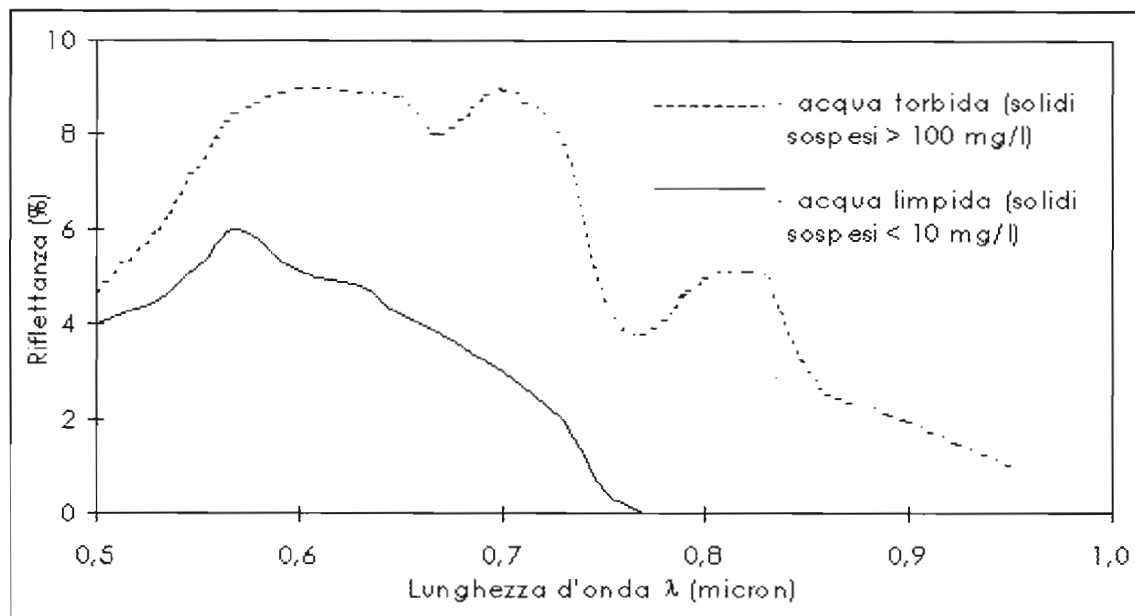
La risposta spettrale dell'acqua varia con la lunghezza d'onda: l'acqua limpida assorbe maggiormente le radiazioni più lunghe del visibile e dell'infrarosso, mentre diffonde le lunghezze d'onda più corte; per questo motivo l'acqua ci appare blu o blu-verde, avendo il valore massimo di trasmittività nel blu a 450 nm. Usualmente l'acqua in condizioni di purezza, riflette fino ad un massimo che può raggiungere il 5% dell'energia incidente, valore che, rispetto alle normali superfici opache, risulta estremamente piccolo. Quando nell'acqua è presente sedimento sospeso, come ad esempio nei fiumi in piena, la diffusione aumenta anche per lunghezze d'onda maggiori inducendo una colorazione giallo-rossastra (Figura 7).

Le caratteristiche spettrali della vegetazione

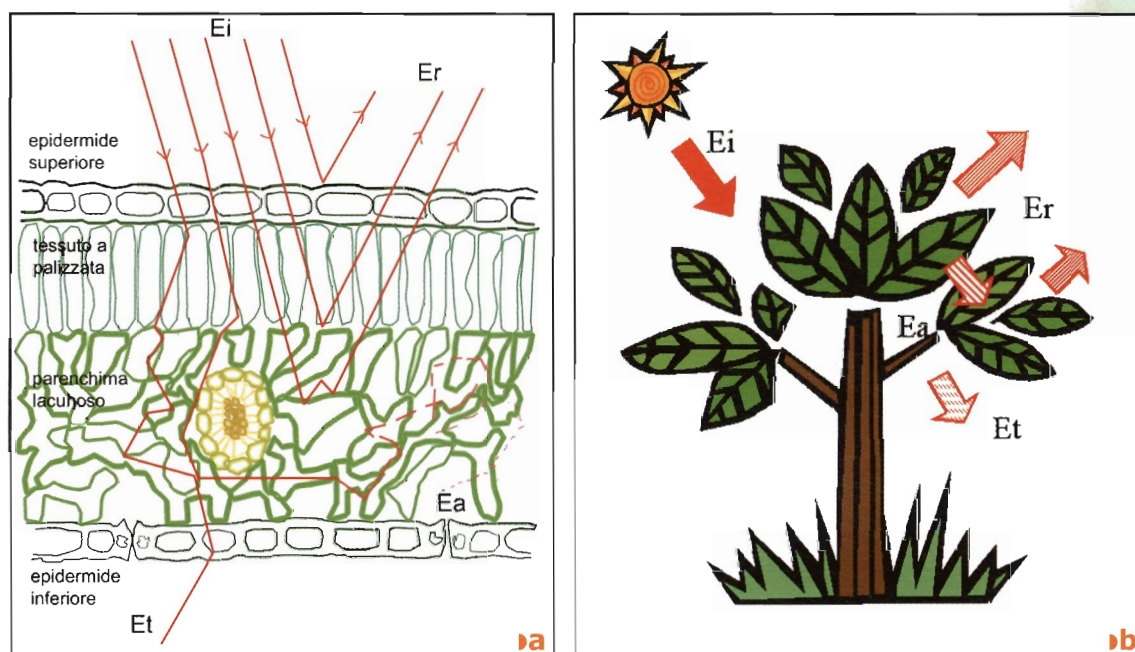
La curva di riflettanza della vegetazione può variare in funzione di molti fattori, quali il tipo di vegetazione e la sua densità, lo stadio fenologico, il contenuto d'acqua. In generale, la vegetazione è facilmente distinguibile nelle immagini telerilevate dalle altre categorie (suoli nudi, acqua, zone artificiali, ecc.) grazie al suo tipico comportamento spettrale.

Tale comportamento dipende principalmente da due fattori:

- le caratteristiche chimico-fisiche delle foglie e delle altre componenti della pianta (Figura 8a);
- l'aggregazione dei singoli elementi (foglie, rami) e la struttura complessiva della pianta (*canopy*) (Figura 8b).



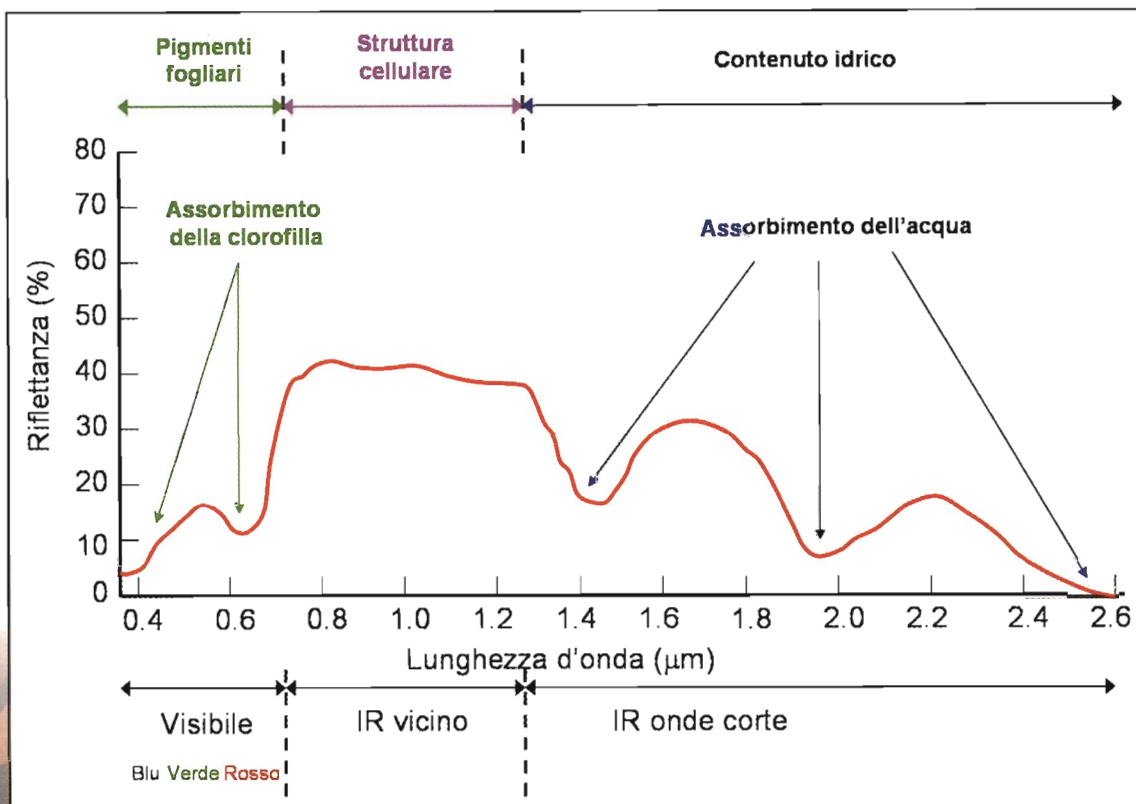
● **Figura 7**
Firma spettrale dell'acqua in condizioni di purezza ed in presenza di un carico di sedimenti



● **Figura 8**
Interazioni della radiazione EM con la vegetazione a livello fogliare (a) e di canopy (b)

Come si può vedere dalla Figura 9, nella regione del visibile si ha un assorbimento nelle lunghezze d'onda del blu (400 nm) e del rosso (700 nm) e una riflessione nel verde a causa dell'attività fotosintetica dei pigmenti fogliari. E' per questo che i nostri occhi riconoscono la vegetazione di colore verde.

La struttura della vegetazione influenza invece il comportamento spettrale nell'infrarosso vicino (700 - 1200 nm), determinando, come mostrato in figura, un tipico platò nella firma, dovuto ad una riflessione più intensa della radiazione incidente che, in condizioni sane, può arrivare al 70%. La porzione di spettro in cui si ha un brusco aumento di riflettanza tra la regione del rosso e dell'IR vicino è nota con il nome di *red edge*.



● **Figura 9** La firma spettrale della vegetazione

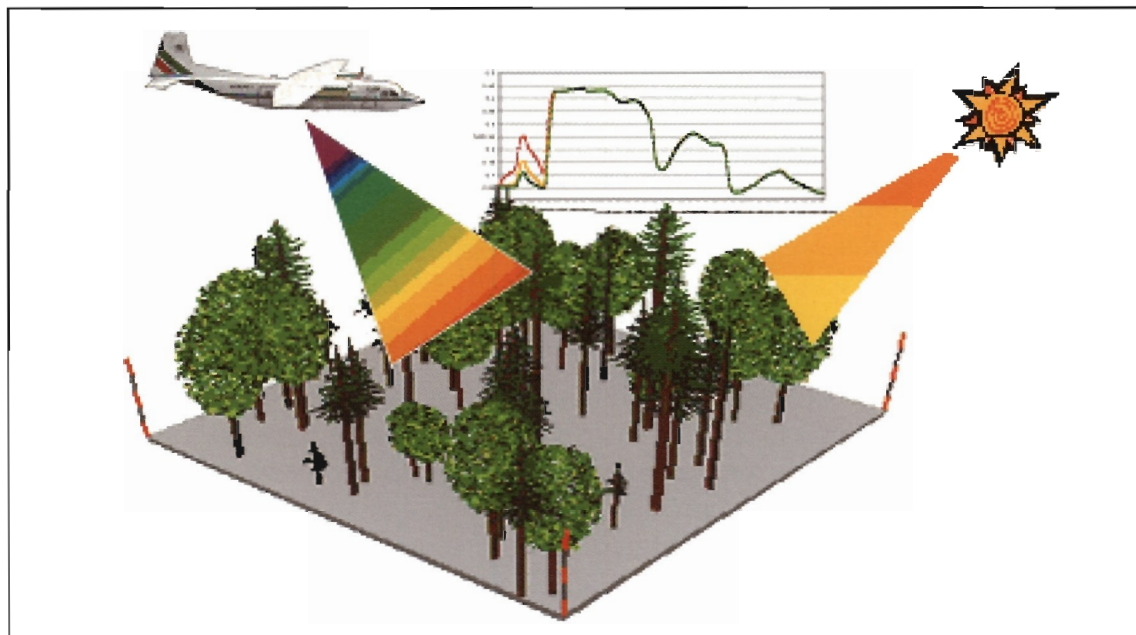
La regione del medio infrarosso (1500-2500 nm) è invece caratterizzata da peculiari picchi di assorbimento riconducibili al contenuto d'acqua della foglia e al chimismo di lignina e cellulosa.

Questo comportamento è tipico di tutta la vegetazione, tanto che le differenti specie forestali posseggono una risposta spettrale che si distingue solo per lievi differenze. Esse sono dovute ad un chimismo differente delle foglie (concentrazione e tipologia dei pigmenti fotosintetici, struttura della foglia, contenuto d'acqua e sostanza organica presente) e alla struttura della pianta (distribuzione delle foglie e dei rami) e possono perciò essere rilevate solo con strumenti che posseggono un'alta risoluzione spettrale.

1.3 Il processo del Telerilevamento

Il Telerilevamento può essere descritto come un processo che sfrutta il diverso modo in cui le superfici naturali interagiscono con l'energia elettromagnetica proveniente da una sorgente per ottenere informazioni sulle loro caratteristiche. Un sistema di rilevamento a distanza è costituito da 4 elementi essenziali (Figura 10):

1. un oggetto da osservare, il bersaglio di indagine;
2. una sorgente di energia elettromagnetica, che può essere naturale (come il Sole) o artificiale (come la luce di un flash, o i segnali a microonde prodotti da un radar);
3. uno strumento o un sensore per osservare l'oggetto; essi vanno dai più semplici, come quelli fotografici (pellicole), a quelli optoelettronici (detector), ed elettronici (antenne). Ad ogni tipo, secondo le proprie caratteristiche, compete un particolare campo d'azione e di sensibilità all'interno di tutta la gamma delle radiazioni EM;
4. una piattaforma in grado di sostenere lo strumento (aereo o satellite).



● **Figura 10**
Sistema di rilevamento a distanza costituito da sorgente di energia (Sole),
oggetto (superficie terrestre), sensore e piattaforma aerea

Nel nostro caso l'oggetto di studio è rappresentato dalle aree forestate che ricoprono il territorio della Valle del Ticino mentre la sorgente di energia è quella naturale del sole. L'obiettivo dello studio è quello di sfruttare al meglio l'alta risoluzione spettrale del sensore MIVIS e quella geometrica di un volo aereo per individuare e classificare all'interno dei boschi le diverse specie arboree.

1.4 I sensori: dispositivi a scansione

In funzione delle applicazioni richieste, sono stati messi a punto diversi sistemi in grado di misurare la radiazione EM proveniente da un oggetto. Tra questi si possono citare: la fotografia all'infrarosso falso-colore, i radiometri, le termocamere e i sistemi di ripresa a scansione (scanner). Gli scanner digitali, proprio come quelli collegati ai computer di casa che vengono utilizzati per "digitalizzare" testi o immagini, sono dei radiometri a scansione in grado di esplorare una "scena" riga per riga producendo un'immagine bidimensionale del territorio ripreso.

Gli scanner sono apparati che esplorano a scansione, cioè linea per linea, una scena, ne misurano la radianza¹ punto per punto in una o più bande² dello spettro elettromagnetico, registrando i dati sottoforma di un segnale elettrico proporzionale alla radiazione incidente sul sensore. Questi segnali analogici vengono convertiti in valori numerici digitali (*Digital Number DN*), che vengono memorizzati su supporto magnetico o su disco, producendo un'immagine bidimensionale del territorio ripreso.

¹ Radianza: flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido, per una data direzione e misurato su un piano perpendicolare alla direzione data (Lechi, 1999).

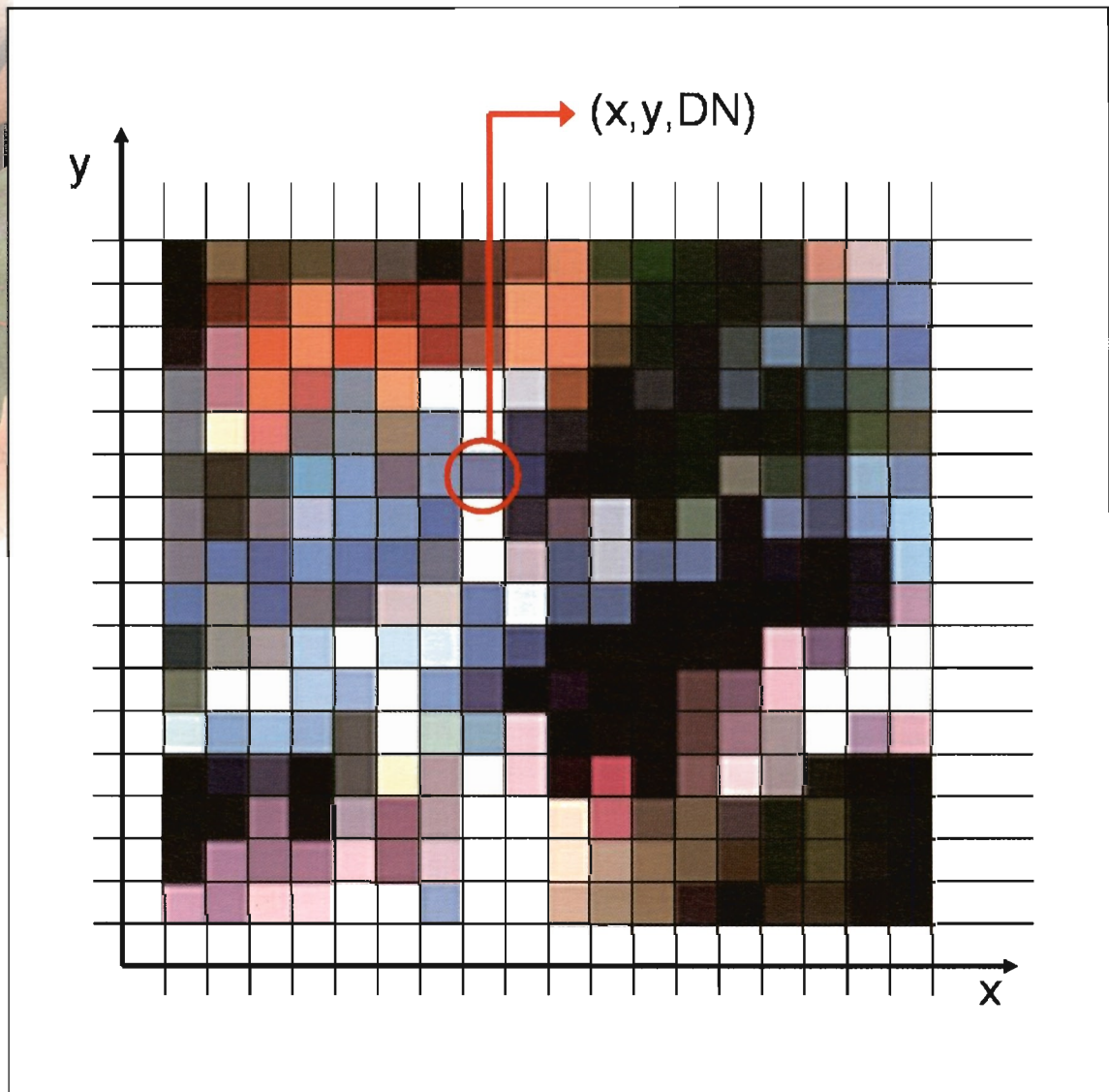
² Banda: porzione di spettro ripresa dal sensore.

Il loro funzionamento è caratterizzato da tre momenti fondamentali:

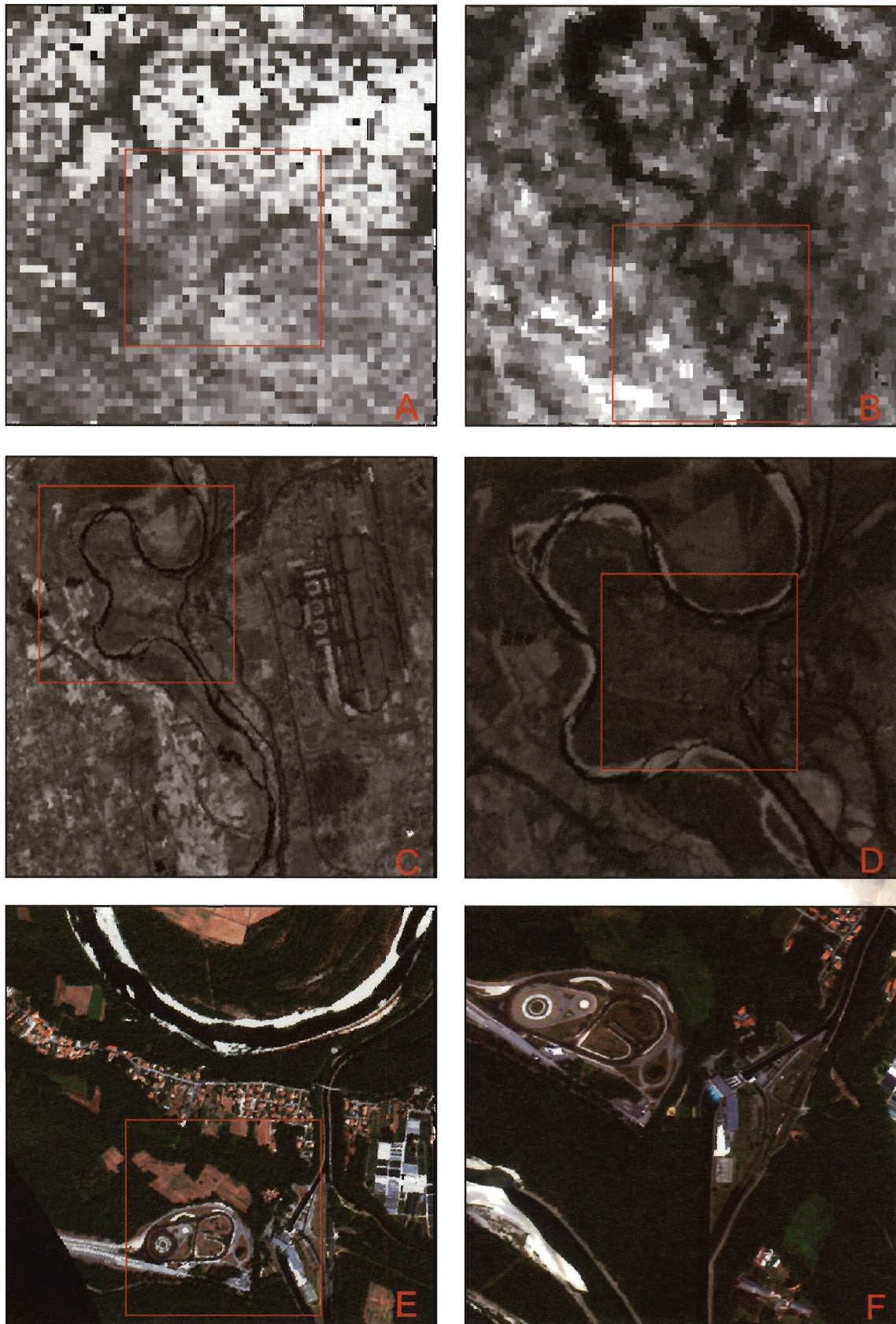
- raccolta dell'energia elettromagnetica proveniente dalla scena attraverso un sistema ottico;
- acquisizione della radiazione e separazione in varie lunghezze d'onda; quest'operazione viene effettuata attraverso un prisma selettore che, in un sistema multi-spettrale, è in grado di separare le varie lunghezze d'onda in funzione delle bande spettrali previste dal sensore;
- trasformazione dell'energia in segnali elettrici attraverso dei rilevatori.

1.5 Le immagini digitali

Un'immagine digitale è un insieme di elementi discreti organizzati per righe e colonne, cioè una matrice (Figura 11): ad ognuno di tali elementi detti *pixel* (*picture element*) è associato un numero intero e positivo che rappresenta la radianza media misurata su una piccola area, o cella elementare di risoluzione θ , più in generale, la grandezza misurata. Il *pixel* è inoltre caratterizzato da una coppia di valori che individuano la sua posizione all'interno dell'immagine digitale (riga e colonna).



● **Figura 11** Immagine digitale



● **Figura 12**

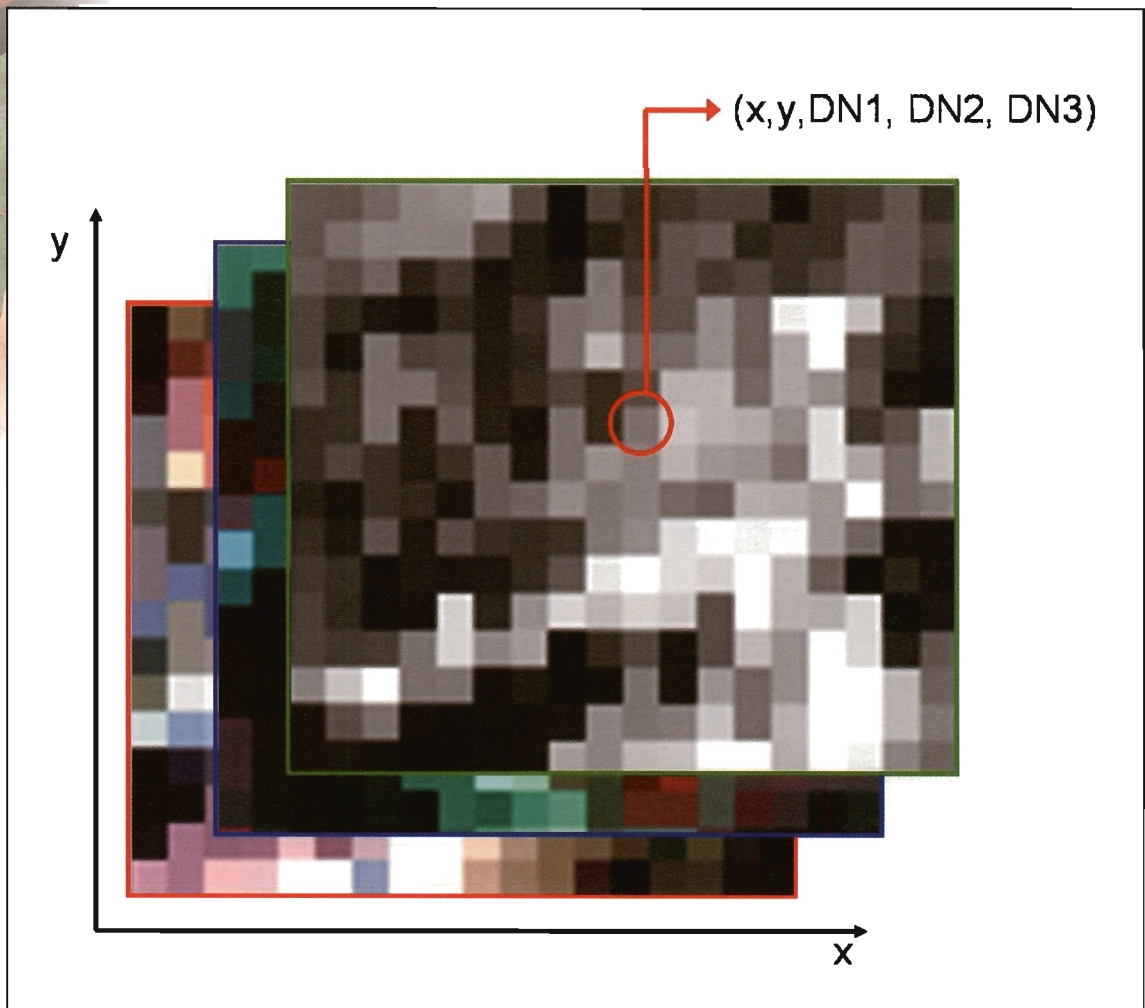
Esempi di risoluzione spaziale: un elemento del Parco visto da diversi sensori. (a) 1 km banda del NIR del NOAA AVHRR; (b) 250 m banda del NIR del MODIS TERRA; (c) 30 m banda 4 del TM; (d) 15 m banda pancromatica del ETM+; (e) 4 metri RGB 13:7:3 del sensore MIVIS ripreso alla quota di 2000 metri; (f) 2 metri RGB 13:7:3 del sensore MIVIS ripreso alla quota di 1000 metri

Risoluzione geometrica o spaziale

La risoluzione geometrica o spaziale delle immagini esprime le dimensioni della più piccola area rilevabile. Per i satelliti la dimensione dell'area risolta al suolo varia da una dimensione nell'ordine di grandezza dei metri (0,75 m per Quickbird, 1 m per l'Ikonos, 30 m per il TM), fino a qualche chilometro (EOS-TERRA MODIS tra 250 m e 1 Km, Spot VEGETATION e NOAA AVHRR 1km, 2,5 km per il Meteosat). La dimensione del pixel influisce sulla riproduzione dei dettagli della scena ed é determinata dall'altezza del sistema di ripresa e dalle sue caratteristiche di funzionamento, in particolare dall'angolo di vista del sensore che determina l'area-impronta sulla superficie terrestre ripresa, detta anche IFOV (*Instantaneous Field Of View*). Un oggetto, quindi, per poter essere distinto nell'immagine, deve avere una dimensione uguale o maggiore rispetto alla risoluzione del sistema (Figura 12).

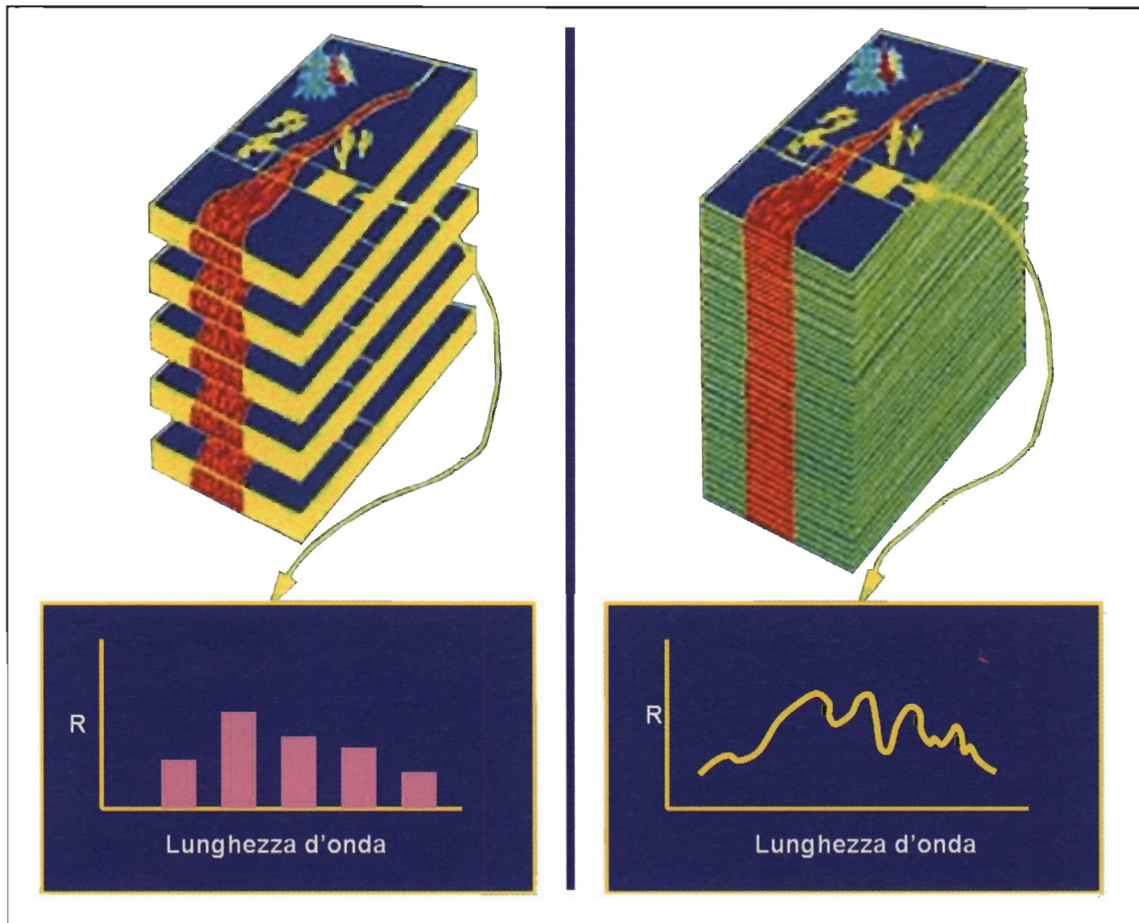
Risoluzione spettrale

Un'immagine multispettrale risulta costituita da un numero di matrici, tante quante sono le bande del sensore che le ha acquisite (Figura 13). Ogni *pixel* risulta, in questo caso, caratterizzato da tanti valori (DN1, DN2, ...) quanti sono le bande spettrali (canali di ripresa), oltre che dalle sue coordinate immagine (posizione del *pixel* sulla matrice).



● Figura 13 Immagine digitale multispettrale

Le immagini iperspettrali sono un'evoluzione di quelle multispettrali, essendo caratterizzate da un numero molto maggiore di bande, di dimensioni più ristrette (maggiore risoluzione spettrale, Figura 14).



● **Figura 14**
Confronto tra riflettanze di un'immagine multispettrale (a sinistra)
e di una iperspettrale (a destra)

I dati iperspettrali sono quelli più idonei per l'obiettivo di questo lavoro. Essi sono infatti caratterizzati da un elevato numero di bande con alta risoluzione spettrale (circa 10 nm), che permettono di misurare la firma spettrale degli oggetti in maniera tanto dettagliata da riconoscere gli elementi caratteristici delle superfici indagate necessari per la loro distinzione e, quindi, classificazione.

A questo scopo è stato individuato come ideale l'uso di dati iperspettrali aerei, ottenuti cioè da un sensore montato su piattaforma aerea. L'uso di una piattaforma aerea consente infatti di pianificare in maniera ottimale il sorvolo, nel periodo che garantisce la miglior distinzione tra le specie da analizzare e di ottenere, in funzione della quota di volo, immagini con una risoluzione spaziale idonea al caso di studio, ovvero la distinzione delle chiome degli alberi.

1.6 Dalle immagini telerilevate alle mappe tematiche

L'analisi numerica di immagini telerilevate del territorio ha come scopo la descrizione della scena osservata in termini quantitativi, attraverso un prodotto che è detto mappa tematica. La mappa tematica ottenuta mediante il processo di classificazione

è costituita da un insieme di elementi (*pixel*) ai quali è associata un'informazione di tipo semantico, che specifica un attributo relativo ad un particolare tema di interesse, detto classe o categoria (Figura 15).

Queste classi di interesse, che nel nostro caso sono rappresentate dalle differenti tipologie arboree, non sono registrate direttamente nelle immagini, ma si devono derivare in modo indiretto attraverso un processo detto di classificazione, usando le evidenze contenute nelle misure spettrali che costituiscono le immagini.

La similarità fra *pixel* o gruppi di *pixel* è il concetto fondamentale che sta alla base della maggior parte degli algoritmi di classificazione grazie ai quali è possibile suddividere gli elementi di una popolazione di dati, i *pixel* dell'immagine, in gruppi caratterizzati da un certo grado di associazione. L'etichettatura dei *pixel* dell'immagine avviene sulla base del confronto tra le caratteristiche spettrali delle superfici in esame con quelle di esempi (detti *training*) di cui è nota la presenza all'interno dell'area studiata (vedi Capitolo 2).

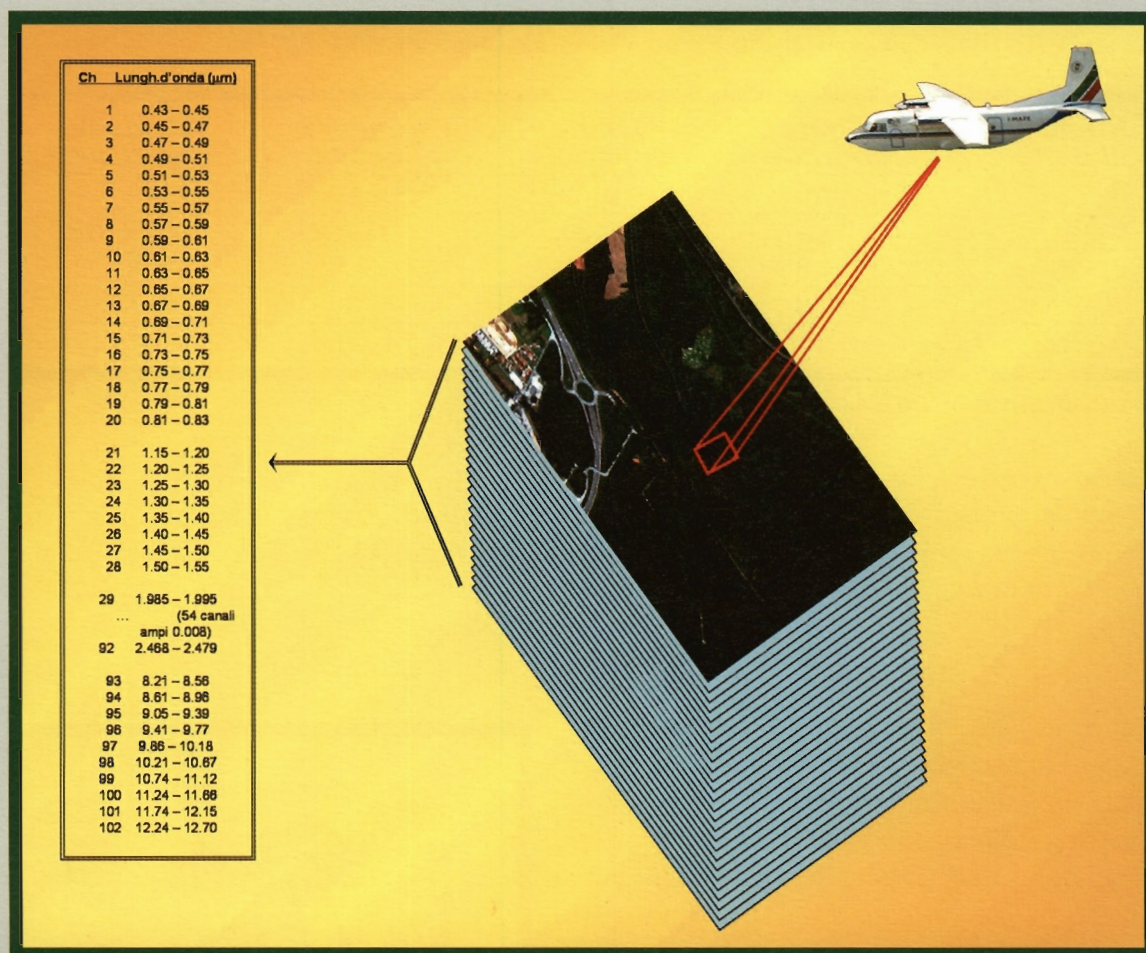


● **Figura 15**
Il processo di classificazione: dalla scena del territorio ripresa nell'immagine telerilevata iperpestrale alla mappa tematica.
(a) Composizione a colori reali dell'immagine MIVIS; (b) mappa tematica da classificazione

Scheda di approfondimento A

Il sensore iperspettrale MIVIS

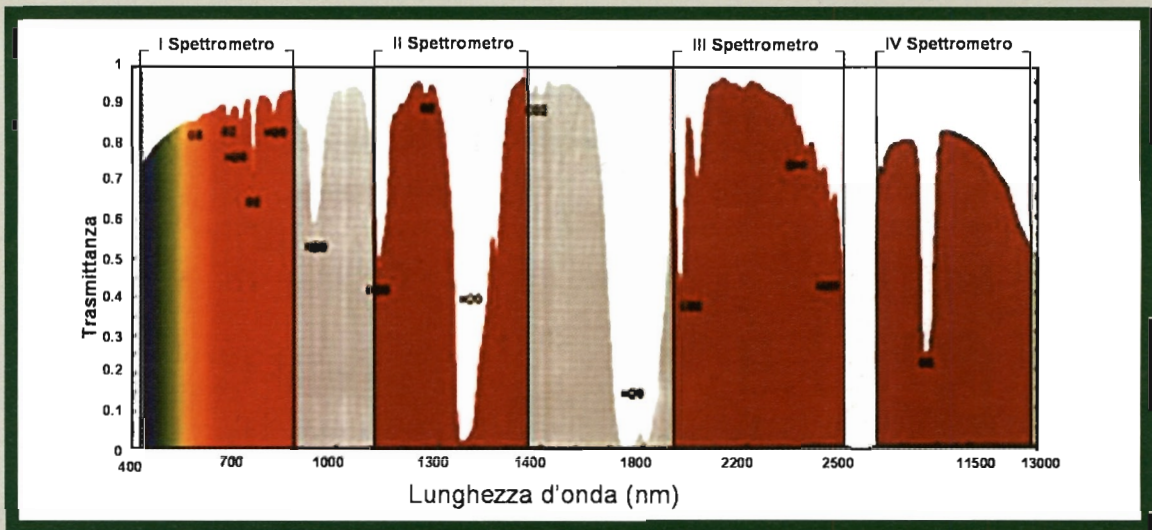
Il sensore iperspettrale utilizzato nel presente lavoro è il MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*) prodotto dalla ditta statunitense Daedalus e, dal 1994, di proprietà del progetto LARA (Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali), oggi sezione dell'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Per approfondimenti relativi all'uso di questo sensore in campo forestale si rimanda ai testi elencati in Bibliografia. Il MIVIS è un sensore aerotrasportato, installato su un bimotore CASA-212/200, gestito dalla Compagnia Generale Riprese aeree di Parma, in grado di registrare la radiazione elettromagnetica proveniente dalla superficie della terra in 102 canali di ripresa (Figura A.1).



●Figura A.1 Sistema di acquisizione dati del sensore MIVIS

Le caratteristiche spettrali

Il sensore è costituito da quattro diversi spettrometri che registrano simultaneamente la radiazione elettromagnetica proveniente dalla superficie terrestre nel visibile (20 bande tra 0,43-0,83 µm), nell'infrarosso vicino (8 bande tra 1,15-1,55µm), nell'infrarosso medio (64 bande tra 2,0-2,5 µm), e nell'infrarosso termico (10 bande tra 8,2 e 12,7 µm), ottenendo della stessa scena 102 immagini perfettamente sovrapponibili (Figura A.2 e Tabella A.1).



● **Figura A.2** Le regioni spettrali dei 4 spettrometri del sensore MIVIS

Numero di Bande	Limite inferiore	Limite superiore	Larghezza di banda	Regione spettrale
#	µm	µm	µm	-
1-20	0.43	0.83	0.02	VIS-NIR
21-28	1.15	1.55	0.05	NIR
29-92	1.983	2.478	0.009	SWIR
93-102	8.18	12.7	0.34-0.54	TIR

● **Tabella A.1** Numero e caratteristiche delle bande MIVIS

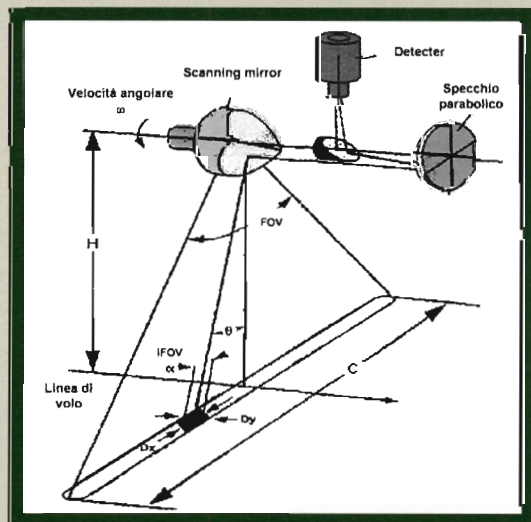
Le caratteristiche di ripresa

L'angolo di vista complessivo del sensore (FOV, o *Field of View*) è pari a 71,059° e condiziona la larghezza complessiva dell'immagine acquisita che può essere calcolata mediante la relazione:

$$L = 2H \cdot \text{tg}(\text{FOV}/2)$$

dove L = larghezza immagine e H = quota di volo

Per ogni *pixel* dell'immagine il sensore misura l'energia elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie al suolo corrispondente al *pixel* stesso. Le dimensioni al suolo di ciascun *pixel* dipendono dall'angolo di vista istantaneo (IFOV, o *Istantaneous Field Of View*) dello strumento e dalla quota di volo: il valore dell'IFOV per il sensore MIVIS è pari a 2.0 mrad (Figura A.3). Ciascun *pixel* dell'immagine acquisita corrisponde ad una superficie al suolo definita da un quadrato di lato pari circa a due volte la quota di volo. Per un volo realizzato ad una quota di 2000 metri, quindi, ogni *pixel* corrisponde ad una superficie al suolo di circa 16m² ovvero ad un *pixel* di 4x4 metri come è avvenuto nel nostro caso di studio.



● **Figura A.3** Parametri geometrici del sistema di ripresa

Componenti tecniche



● **Figura A.4**
La strumentazione di controllo del sensore MIVIS

Il MIVIS è costituito da 5 sottosistemi, tre dei quali sono dotati di computer di controllo che inviano comandi e informazioni sullo stato dei loro assistiti attraverso una rete di comunicazione locale ethernet (Figura A.4). I cinque sottosistemi sono:

1. Testa di scansione e spettrometro

La testa di scansione è costituita da elementi ottici che comprendono il telescopio collimatore primario ed uno specchio rotante di scansione

ne, dal motore-contatore che controlla la frequenza di scansione e da due corpi neri di riferimento termico. Tali componenti sono contenute all'interno di una struttura in acciaio e alluminio che scherma la radiazione ottica dispersa e fornisce l'interfaccia con lo spettrometro.

2. Digitalizzatore

La funzione principale del digitalizzatore è di convertire i 102 segnali analogici in forma digitale a 12 bit, formattare questi dati e registrarli su supporto magnetico. Questo processo è sincronizzato con la rotazione dello specchio di scansione per mezzo di segnali inviati dal contatore ottico installato nel motore di scansione. Il digitalizzatore sovrintende anche al sistema PAS (*Position and Attitude Sensor*) ed al ricevitore GPS.

3. Distributore di alimentazione

È l'interfaccia tra l'alimentazione dell'aereo (28 Volt corrente continua) ed i restanti sottosistemi del MIVIS operanti anche con altre tensioni elettriche.

4. Moving Window Display e Monitor

Il MWD contiene un monitor CRT, un oscilloscopio digitale ed un trasformatore corrente continua/corrente alternata che fornisce 115 volt 60 Hz al Monitor CRT e al registratore VLDS. Le funzioni del **Moving Window Display** sono controllate attraverso un menù di selezione disponibile all'operatore su un **Touch Screen Display**.

5. Registratore VLDS (Very Large Data Store)

È un registratore digitale su nastro magnetico VHS capace di memorizzare ad alta velocità grandi quantità di dati. La versione VLDS utilizzata per il MIVIS è provvista di un buffer che permette, attraverso memorie interne, il trasferimento di dati ripresi a diversa velocità di scansione. I dati registrati possono essere successivamente elaborati, archiviati e distribuiti attraverso un apposito software denominato MIDAS (*Multispectral Interactive data Analysis System*). Il software MIDAS è stato sviluppato originariamente per sistemi operativi UNIX e solo recentemente adattato a sistemi Windows.



● Capitolo 2 Metodologia

2.1 Definizione della legenda

Con l'aiuto dei tecnici forestali del Parco, sono stati definiti gli obiettivi del lavoro, la metodologia per i rilievi di campo (necessari per l'acquisizione dei dati a terra utili nelle successive fasi di classificazione), e la legenda comprendente le classi relative alle specie arboree di interesse. Quelle infine individuate sono elencate nella Tabella seguente.

Legenda generale ottimale	Legenda specie accorpate
Quercia (<i>Quercus robur</i>) Carpino bianco (<i>Carpinus betulus</i>)	Associazione Quercia - carpineto • Quercia • Carpino
Pioppo (<i>Populus alba</i> , <i>P. nigra</i> , <i>P. tremula</i>)	Boschi di Pioppo e pioppeti
Ontano nero (<i>Alnus glutinosa</i>)	Ontaneti
Salice (<i>Salix alba</i> , <i>S. cinerea</i> , <i>S. elaeagnos</i>)	Saliceti
Pino (<i>Pinus sylvestris</i> , <i>P. rigida</i> , <i>P. strobus</i> , <i>P. nigra</i>)	Boschi di Pino
Castagno (<i>Castanea sativa</i>)	Boschi di Castagno
Prugnolo tardivo (<i>Prunus serotina</i>) Robinia (<i>Robinia pseudoacacia</i>) Quercia rossa (<i>Quercus rubra</i>)	Latifoglie esotiche infestanti • Prugnolo tardivo • Robinia • Quercia rossa

● Tabella 1
Legenda generale ottimale e legenda delle specie accorpate definite per la produzione della mappa finale

Come si può notare dalla lettura della Tabella 1, alcune delle specie indicate sono state accorpate, per la produzione della mappa finale, in un'unica categoria di ordine superiore. Tale accorpamento è stato adottato per meglio identificare e differenziare, alla scala prescelta per la restituzione cartografica delle mappe finali (1:25000), le zone di maggior degrado ambientale, invase dalle latifoglie esotiche infestanti (Prugnolo tardivo, Quercia rossa e Robinia), da quelle specie che rappresentano la massima espressione della fitocenosi dei boschi del Parco (Quercia - Carpineto, Boschi di Conifere e Castagno, Boschi di Pioppo, Saliceti e Ontaneti).

Scheda di approfondimento B

Principali caratteristiche delle specie forestali classificate

Farnia (*Quercus robur*)

Aspetto (Figura B.1a): Fusto robusto, diritto, presto suddiviso in rami forti, contorti, piegati a gomito che portano rametti piccoli, a loro volta portanti foglie. La chioma risulta irregolare, con ciuffetti di foglie disposti sparsamente. La corteccia è grigia e liscia in gioventù, con l'età si imbrunisce e si fessura specialmente in senso longitudinale. Le foglie sono alterne, semplici, caduche, con brevi piccioli di 1-5 mm; la lamina è ovato-oblunga, glabra, terminante alla base con due orecchiette asimmetriche e raggiunge la massima larghezza nel terzo superiore; il margine fogliare è lobato, a volte anche doppiamente, con 5-7 lobi per lato. I fiori maschili sono riuniti in amenti lassi e penduli. Quelli femminili sono portati in gruppetti di 2-5 su un asse glabro. La fioritura avviene nella seconda metà di aprile, quasi contemporaneamente all'emissione delle foglie. Il frutto (ghianda) è un achenio con una caratteristica cupola che lo ricopre parzialmente ed è portato da un peduncolo che porta i fiori femminili lungo 2-7 cm. Ogni peduncolo può portare fino a 4 o 5 ghiande. La crescita dell'albero è abbastanza rapida, se vive in condizioni ottimali. Nel Parco, mediamente, il fusto della Farnia raggiunge un diametro di 30 - 40 cm in 40 - 60 anni.

Habitat: Predilige i suoli profondi, umidi, sciolti e ben areati. Gli ambienti elettivi della Farnia sono la pianura e la collina bassa, ma popola anche i versanti montani, elevandosi, nelle Alpi, fino a poco sopra i 900 m con esemplari sparsi.

Diffusione: E' diffusa in tutta Europa, tranne che nel nord estremo, fino agli Urali e al Caucaso. Nel Parco del Ticino, quasi tutti i boschi naturali presentano una componente più o meno abbondante di Farnia.

Osservazioni: I boschi di Farnia possono subire, all'inizio dell'estate, attacchi da parte della Processionaria della quercia la quale, allo stadio di bruco, defoglia gli alberi. Negli ultimi anni la Farnia sta attraversando una fase di deperimento, le cui cause non sono ancora state del tutto chiarite; una di queste è probabilmente dovuta a prolungati periodi di siccità, con conseguente abbassamento della falda.



● Figura B.1

(a) In alto: Quercus-Carpineto; in basso un tronco, un esemplare isolato, una ghianda
(b) Particolari di Carpinus: la chioma, le foglie, i fiori

Carpino bianco (*Carpinus betulus*)

Aspetto (Figura B.1b): Il fusto è eretto, scanalato, a sezione irregolare e termina in una chioma ovale-allungata; raggiunge un'altezza di 20-25 m. la corteccia è liscia e color grigio cenere. Le foglie sono semplici, alterne, con breve picciolo; quando sono secche restano sull'albero per tutto l'inverno e cadono poco prima della nuova cacciata. La lamina fogliare è ellittica, con apice acuminato e base rotonda o a forma di cuore; la superficie del lembo è plissettata da giovane, quasi bollosa da adulta; il margine è doppiamente seghettato. I fiori sono unisessuali, riuniti in infiorescenze pendule a sessi separati, e si sviluppano con l'emissione delle foglie. I frutti formano infruttescenze molto tipiche: ognuno è accompagnato da una brattea triloba, verde, coriacea, lunga 2-3 cm, percorsa da una fitta trama reticolare e leggera. La crescita è lenta.

Habitat: Il Carpino predilige i terreni profondi e freschi, con una discreta componente argillosa; non sopporta i terreni acidi. In pianura si accompagna normalmente alla Farnia, ma entra anche in altri consorzi boschivi della collina e della bassa montagna.

Diffusione: E' presente in tutta Europa, nel Caucaso e nell'Asia Minore. Sulle Alpi si spinge a 700-800 m di altezza. Nel Parco Ticino non è molto diffuso. Generalmente si trova governato a ceduo e forma boschetti puri sparsi nelle formazioni di Farnia.

Osservazioni: Il Carpino, insieme con la Farnia, da origine alle formazioni tipiche della foresta planiziale (Quercu-carpinetto).

Pioppo (*Populus alba*, *P. nigra*, *P. tremula*)

Aspetto: Il Pioppo bianco (*P. alba*) ha una chioma ampia, arrotondata e densa; la corteccia da giovane è bianca e liscia, con l'età si fessura. Le foglie del P.Bianco hanno una forma triangolare, con lamina lobata e bianco-tomentosa, che sviluppandosi diventa verde cupo. Il Pioppo nero (*P. nigra*, Figura B.2) è caratterizzato da un tronco eretto, con chioma allargata e densa; la corteccia è grigia, con sfumature biancastre o giallastre, che si fessura con l'età in senso longitudinale. Le foglie del P.Nero sono glabre, spicciolate e caduche; la lamina fogliare è verde sulle due facce, a contorno triangolare, con margine regolarmente dentato; la base è arrotondata a forma di cuore o bruscamente tagliata. Il Pioppo tremulo (*P. tremula*) ha un fusto dritto e slanciato, con rami addensati verso la parte alta.; la corteccia è grigio-verdastra o giallognola e resta a lungo liscia. Le foglie hanno forme diverse: quelle turionali sono a lamina triangolare-ovata, grande, con base cordata o troncata, con apice acuminato e margine dentato, glabre da adulte; quelle dei brachiblasti hanno lamina suborbicolare, più piccola delle precedenti, con margine irregolarmente e grossolanamente dentato-crenulato, apice poco pronunciato o arrotondato. La pagina superiore è verde, quella inferiore più chiara. Il picciolo è sottile, nettamente compresso ai lati: tale forma favorisce il continuo tremolio delle foglie, spiegando il nome dell'albero. I pioppi hanno fiori nudi, cioè senza calice e corolla, riuniti in infiorescenze. Sono alberi dioici, cioè portano solo o fiori maschili o femminili.



● **Figura B.2**
Tronco e foglie di Pioppo nero

Il frutto è una capsula che a maturità si apre in due o quattro valve lasciando uscire piccoli semi leggeri contornati da un fiocco cotonoso che facilita la dispersione.

Habitat: Crescono su terreni umidi, sciolti, profondi e areati. Il P. bianco ama la luce, il caldo e i terreni freschi e umidi; resiste abbastanza bene alla siccità. Il P. nero è abituale nelle foreste di pianura, in suoli freschi generalmente posti in continuità spaziale con le formazioni arboree legate all'acqua. Il P. Tremulo tollera molto bene i climi freddi: nelle Alpi si spinge a quote poco inferiori ai 2000 m. Per questo motivo può essere considerato complementare del P.bianco.

Diffusione: Il P. bianco non è molto diffuso, vegeta per lo più consociandosi con P.nero, Ontano e salici. È presente in quasi tutta l'Europa centrale e meridionale, nel Caucaso, in Asia occidentale e centrale fino all'Himalaya e in Africa settentrionale. L'areale del P. nero è ampio: Europa centrale e meridionale, Asia temperata, Nordafrica. Il P. tremulo è diffuso in tutta Europa fino al Circolo Polare Artico, in Asia fino al Giappone, e in Algeria.

Osservazioni: Un tempo molto diffuso, il P. nero è stato soppiantato dai pioppi ibridi messi a dimora dall'uomo, che ne minacciano l'esistenza anche nella discendenza, essendo provata una discreta capacità di ibridazione.

Ontano nero (*Alnus glutinosa*)

Aspetto (Figura B.3): La corteccia delle parti giovani del fusto è color bruno rossastro con marcate lenticelle chiare disposte orizzontalmente con il loro asse maggiore; con il tempo la corteccia si fessura e forma placche a disposizione longitudinale. Le foglie sono caduche, spicciolate, a lembo arrotondato, cuneato alla base e troncato all'apice; il margine è doppiamente dentato, tranne che verso la base ove è intero; le nervature sono diritte e giungono fino al margine; la pagina superiore è color verde scuro, lucente, quella inferiore è più chiara. Le gemme, i rami e le foglie giovani sono appiccicose (da qui l'epiteto *glutinosa*). I fiori sono riuniti in infiorescenze divise in maschili e femminili. I frutti sono acheni con stretta ala membranacea, in qualche modo atti al volo planato. La crescita è rapida.



● Figura B.3
In alto: Ontaneto; in basso fiori e tronco

Habitat: E' una specie di pianura, tipica dei suoli alluvionali umidi. Si mischia a salici e pioppi, caratterizza gli aspetti più umidi della foresta planiziale e forma anche boschi puri, di dimensioni modeste (ontaneti).

Diffusione: E' diffuso in tutta Europa, tranne quella boreale estrema, nel nord e nel centro dell'Asia e nell'Africa settentrionale. Nel Parco Ticino è molto diffuso.

Osservazioni: Nell'apparato radicale si sviluppano batteri azotofissatori, che contribuiscono ad aumentare la fertilità del terreno. Il legno di Ontano nero diviene particolarmente durevole quando immerso nell'acqua.

Salice (*Salix alba*, *S. cinerea*, *S. elaeagnos*)

Aspetto (Figura B.4): Il S. bianco (*S.alba*) presenta rami allungati ed eretti; la cor-

teccia adulta è di color olivastro e liscia, i tronchi vecchi hanno invece la corteccia profondamente fessurata in senso longitudinale. Le foglie sono caduche e hanno un corto picciolo. La lamina è stretta e lunga, di forma lanceolata-lineare, di dimensioni variabili, finemente seghettata ai bordi e coperta da peli bianchi e setosi sulla faccia inferiore. I fiori hanno colore giallo o verdastro, e sono privi di corolla. Il frutto è senza peli, con base rigonfia e breve peduncolo. La crescita è molto rapida. Il S. cinerino (*S. cinerea*), ha corteccia liscia e verdastra, le foglie hanno un picciolo molto lungo e un po' cotonoso; la lamina è larga, a contorno ovaleggiante, lunga da 5 a 13 cm, larga fino a 9 cm, verso l'alto



● **Figura B.4**
Esempi di Salice. In basso esemplare di *Salix Cinerea*, e particolare di foglia di *Salix Alba*

si restringe bruscamente in una punta corta, piegata a gronda lungo la linea mediana; il margine fogliare è irregolarmente e grossolanamente dentato, la pagina inferiore è vellutata, color grigio-glaucos; le infiorescenze sono grosse, vistose, color giallo o verde. Il frutto è coperto di piccoli peli, i semi leggeri e adatti alla disseminazione attraverso il vento. Il S. ripaiolo (*S. eleagnos*) è un piccolo albero di 5-7m, che può raggiungere un massimo di 15 m di altezza; ha corteccia grigio-pubescente, che diventa scura e fessurata con l'età; Le foglie sono caduche, lunghe e strette; la lamina è sorretta da un picciolo corto, la faccia superiore è verde scura, quella inferiore bianco-cotonosa; i fiori maschili hanno due stami con filamenti vellutati, quelli femminili hanno un pistillo con uno stilo un po' allungato e stigmi biforcati color porpora; i frutti sono glabri e portati da un corto peduncolo. I semi sono piccoli e con setole cotonose.

Habitat: I salici sono tipici di zone umide, si trovano sulle rive del fiume, lungo rogge o fossi. Il S.ripaiolo sopporta meglio delle altre specie la perdita di umidità del suolo. Cresce bene anche ai bordi delle acque e dei torrenti di montagna, ove consolida le rive.

Diffusione: Il S.bianco è la specie più diffusa tra i salici del Parco. Si trova in Europa, Asia Minore e Nordafrica. Il S.cinerino è molto diffuso, sia in altitudine che come espansione geografica: è presente in tutta l'Europa, e in Asia. Il S.ripaiolo è diffuso nell'Europa centro-meridionale e in Asia Minore.

Osservazioni: Negli ultimi anni i Salici bianchi presenti nel territorio del Parco sono affetti da una grave fitopatia (le cui cause sono attualmente oggetto di studio), che ha molto spesso esiti letali, in particolare sulle piante adulte.

Pino (*Pinus sylvestris*, *P. rigida*, *P. strobus*, *P nigra*)

Aspetto (Figura B.5): Il Pino silvestre, pianta sempreverde, ha un tronco dal portamento ritto solo quando vive in comunità dense ed è seguito nel suo sviluppo dal selvicoltore. Invece individui isolati o in condizioni di spinto pionierismo, hanno spesso tronchi storpiati, contorti e mutilati. Mediamente alto 20 m, arriva a punte eccezionali di 30. La corteccia, che si fessura in placche di varia forma, è di color rosso mattone nella parti giovani, si scurisce e tende al grigio in quelle vecchie. La chioma, di color verde bluastrò, è irregolare ed espansa negli individui isolati, tende a raccogliersi verso l'alto in quelli dei boschi fitti, con progressiva caduta di quelli più bassi. Le foglie sono

dure, pungenti, lunghe 4-7 cm. I fiori sono riuniti in infiorescenze a sessi separati di forma vagamente conica (strobili). Le pigne hanno forma conica, pedunculata e formate da squame che diventano legnose alla maturità. La crescita dell'albero è abbastanza rapida, la longevità è ridotta. Il Pino rigido è una pianta alta mediamente 18-22 m, i rami sono disposti orizzontalmente, la chioma è vagamente piramidale, espansa e irregolare. Caratteristica peculiare sono i molti piccoli rametti, fitti di foglie, disposti lungo il tronco. Le foglie, che durano due anni, sono disposte a tre, rigide, lunghe 10-12 cm, di color verde chiaro e denticolate ai margini. Le pigne sono tozze, lunghe al massimo 7 cm, disposte a gruppi di tre o più. Il seme è scuro e piccolo. I numerosi rametti disposti sul tronco possono, in caso di taglio dello stesso, dare origine a polloni: fenomeno singolare per una conifera. Il Pino nero ha una chioma piramidale in gioventù che tende a divenire globosa e a diradarsi con l'età. La corteccia è grigio scura prima screpolata e poi scagliosa. Il legno è rossiccio e molto resinoso, di qualità variabile. Le foglie sono lunghe 6-15 cm, di colore verde scuro, grosse, disposte a due a due e inserite perpendicolarmente sui rami. I semi sono piccoli, grigiastri e lungamente alati. Il Pino strobo ha un tronco diritto, chioma globosa e piramidale e può superare i 30 m di altezza. La corteccia di color grigio chiaro è poco consistente, si ispessisce solo alla base del tronco negli individui adulti. Le foglie riunite in ciuffetti di 5 su breve rametto, sono lunghe anche più di 10 cm, tenere, verdi con tonalità bluastre.

Habitat: In generale il pino è una pianta molto plastica sotto il profilo ecologico, si adatta a climi diversi e ha un'ampia distribuzione altitudinale (dai 100m dell'alta pianura ai 1700 m- 1900 m delle valli secche alpine). Si adatta a vari tipi di suolo. Per tali caratteristiche è considerata un'essenza squisitamente pioniera, idonea a condizioni ecologiche estreme. Tuttavia presenta intolleranza verso la concorrenza di altre specie e verso l'ombreggiamento; in pratica i pini vegetano bene dove l'uomo interviene sulle specie concorrenti, in genere latifoglie (Farnia, Castagno, Robinia, Prugnolo tardivo, Carpino, Betulla, Acero) con cui spesso si associano in proporzioni variabili da luogo a luogo. Poco male se tale evoluzione avvenisse a favore di essenze naturali e spontanee verso forme di vegetazione più evolute e stabili. Invece spesso la sostituzione avviene in favore delle essenze esotiche più aggressive, con conseguente peggioramento naturalistico ed estetico dell'ambiente.

Diffusione: Nel Parco del Ticino il Pino silvestre è tra gli alberi più diffusi e, col Castagno, tra i più caratteristici, dei boschi settentrionali del Parco. Tuttavia esso è spesso rappresentato solo da individui adulti, mentre mancano le nuove generazioni che invece si trovano più facilmente sui sentieri più aperti o sotto i grandi elettrodotti dove il suolo è periodicamente ripulito dalla vegetazione concorrente. Il Pino rigido e il Pino strobo sono originari della parte orientale del Nordamerica. Introdotti in Europa tra il 1750 e il 1800, si sono diffusi in diversi paesi, Italia compresa. Il Pino nero in Italia è specie spontanea sulle Alpi orientali e nell'Appennino meridionale; è una pianta abbastanza rara all'interno del territorio del Parco.



● **Figura B.5**
Abetaia; nel riquadro: particolare di Pino strobo

Osservazioni: Il legno del Pino silvestre di buona qualità è tra i più usati in falegnameria, la resina è usata per estrarre la trementina. Sui vecchi tronchi presenti nel Parco sono spesso visibili serie sovrapposte di vecchie incisioni a V che testimoniano le passate pratiche di resinazione.

Castagno (*Castanea sativa*)

Aspetto (Figura B.6): Il fusto è diritto, ma ramifica con estrema facilità in grosse branche a poca distanza dal terreno. È alto mediamente intorno ai 20-25 m, con punte di 30 negli esemplari più maestosi. La corteccia è rossastra sulle parti giovani; bruna, fessurata in senso longitudinale e con curvature a spirale sul tronco. Le foglie sono caduche, spicciolate lunghe da 10 a 20 cm, disposte in modo alterno sui rami. Il margine è grossamente dentato, l'apice si restringe progressivamente fino a una breve punta. I fiori maschili sono riuniti in infiorescenze filiformi (amenti), erette, gialle, lunghe 10-20 cm, molto vistose, mellifere, dall'odore penetrante. Quelli femminili sono riuniti in gruppi di 3-4 entro un involucro formato da brattee, che può trasformarsi nel "riccio" (cupola) e si collocano alla base degli amenti maschili più alti. A maturità il "riccio" si apre in due o quattro parti e fuoriesce la castagna (achenio).

Habitat: I boschi di Castagno sono sicuramente di origine antropica e, nella zona nord del Parco, hanno sostituito in gran parte la primitiva foresta di Farnia.

Diffusione: Insieme al Pino silvestre, il Castagno è l'albero che meglio caratterizza i boschi settentrionali del Parco, specialmente quelli collinari. La millenaria coltivazione di quest'albero, iniziata con molta probabilità in epoca romana, la sua estesa diffusione e l'impossibilità di individuare con precisione le forme di vegetazione che esso ha soppiantato, ne fanno ormai un elemento caratteristico del paesaggio collinare e montano.

Osservazioni: Nel Parco il Castagno era comunemente governato a ceduo per produrre legname da opera. Invece i castagneti da frutto erano boschi puri che richiedevano cure assidue e spese di manodopera che non venivano ripagate dalla produzione.



● **Figura B.6**
Esemplare di Castagno a sinistra, fiori maschili e femminili a destra (www.habitas.org.uh, www.piante-e-arbusti.it, P.Ticino)

Prugnolo tardivo (*Prunus serotina*)

Aspetto (Figura B.7): Ha portamento variabile: a volte ha fusto diritto, di medie dimensioni che raramente supera i 18-22 m; più frequentemente il fusto, dopo qualche mese di crescita eretta, si piega disponendosi quasi orizzontalmente. Tagliato emette dalle ceppaie polloni molto vigorosi. La corteccia è rosso-bruna sui rami giovani, fessurata in brune squame sul tronco; se scalfita emana un odore penetrante. Le foglie sono caduche, spicciolate di dimensioni e forma variabili sulla stessa pianta a seconda della loro esposizione alla luce diretta del sole. I fiori sono ermafroditi, con corolla bianca, riuniti in infiorescenze (racemi) erette, che diventano pendule quando si caricano di frutti. Il frutto (drupa) è piccolo, sferoidale, rosso quando acerbo, poi bruno. Cresce rapidamente e dissemina precocemente.

Habitat: Questa specie occupa tutto lo spazio disponibile. Tende a dominare e predominare in tutti gli strati del bosco, lasciando spazi minimi alle altre specie. Sopporta molto bene l'ombreggiamento e si diffonde nei boschi dapprima popolando il sottobosco in attesa che aperture accidentali o volute nello strato arboreo permettano il rapido sviluppo degli alberi in sostituzione di quelli rimossi.

Diffusione: Si ritiene che l'introduzione di quest' essenza in Lombardia risalga al 1922. Veniva utilizzata come specie frangifuoco e negli impianti di recupero forestale della brughiera. La misura della vivacità dell'albero viene dal fatto che prende il posto della Robinia, specie considerata molto invasiva, quando le due entità si trovano in concorrenza.

Osservazioni: A causa della particolare invasività, questa specie è spesso oggetto di interventi per tentare di contenerne la diffusione.

Quercia rossa (*Quercus rubra*)

Aspetto (Figura B.8): Il fusto è diritto, cilindrico, slanciato; può superare agevolmente i 30 m di altezza. Ha rami robusti di color rosso scuro e rametti rossicci, sottili e lucidi. La chioma è arrotondata; la corteccia è liscia nelle parti giovani e col tempo si fessura minutamente in senso longitudinale. Le radici sono forti e profonde, adatte a consolidare terreni instabili. Le foglie, lungamente spicciolate, sono caduche, la lamina è incisa da 7-11 lobi acuti e dentati; la colorazione è verde scura superiormente, chiara inferiormente e rossa in autunno con un notevole effetto cromatico. I fiori sono riuniti in infiorescenze separate e formano amenti sottili e penduli (fiori maschili) oppure spighe piccole di pochi elementi (fiori femminili). I frutti (achenii) sono grosse ghiande sessili, di eccellente qualità. Crescono più rapidamente delle querce autoctone. Il legno è rossiccio, duro, leggero, resistente di pregevole qualità per usi di falegnameria.



● **Figura B.8**
Chioma autunnale di Quercia rossa.
 Nel riquadro: esempio di foglia e ghianda
 (www.piantemati.it, www.mntca.org)



● **Figura B.7**
In basso: macchia di Prunus;
in alto a sinistra: frutti; a destra: ricacci

Habitat: Anche la Quercia rossa è originaria della parte orientale del Nordamerica ed è abbondantemente diffusa in tutta Europa.

Diffusione: Molto spesso questa specie è piantata e coltivata in filari, ma è anche in grado di rinnovarsi spontaneamente. Come pianta ornamentale è posta lungo le strade o nei parchi. Rispetto alla querce nostrane è meno esigente riguardo alla fertilità del terreno e tollera meglio i suoli acidi, per questo motivo è frequente nell'area collinare e del pianalto.

Osservazioni: Questa specie, essendo molto meno esigente in luce rispetto alle querce autoctone, si rinnova facilmente anche sotto copertura.

Robinia (*Robinia pseudoacacia*)

Aspetto (Figura B.9): Il tronco è eretto, la chioma espansa, tondeggiante, leggera. La corteccia del tronco è solcata in senso longitudinale ed è di colore marrone scuro. Le foglie caduche sono lunghe 10-25 cm, composte, imparipennate, ognuna con 4-10 paia di foglioline più quella apicale, color verde sulla pagina superiore, verde pallido su quella inferiore. Le spine appiattite che armano i rami, derivano dalla trasformazione delle stipole. I fiori sono bianchi, riuniti in infiorescenze pendule, profumati e melliferi. La corolla è formata da cinque pezzi (papilionacea): uno portato alto, detto vessillo, due laterali, detti ali, due basali concresciuti detti carena. Il pistillo ha un ovario molto allungato, con all'interno numerosi ovuli. Il frutto (legume) a maturità è coriaceo, rosso-bruno, contenente da 4 a 10 semi e resta sulla pianta per l'intero inverno. La crescita è molto rapida e può vivere fino a 200 anni. Il legno, di color giallo-bruno o verdognolo, è duro e abbastanza pesante, nervoso, resistente; trova varie applicazioni nella carpenteria ed è un ottimo combustibile. Può presentarsi come albero dalle dimensioni dignitose o come arbusto dalle salde radici che sopporta frequenti ceduzioni, pronto a rigettare polloni di 2-3 m già nel primo anno dopo il taglio.

Habitat: Originaria della parte orientale dell'America settentrionale è oggi largamente diffusa in tutto il continente europeo, a quasi 4 secoli dalla sua introduzione. Nella terra d'origine non è così diffusa come da noi in quanto controllata da diversi parassiti e sottoposta alla concorrenza di altre essenze ugualmente vitali.

Diffusione: La Robinia, nei boschi e nelle foreste, è allo stesso tempo causa e sintomo di uno stato di degrado tanto più accentuato quanto maggiore è la presenza dell'esotica. Nel Parco questa specie è ormai la più diffusa tra le essenze esotiche introdotte e il suo areale va indistintamente da nord a sud. E' presente quasi ovunque: forma siepi, si aggrega in boschetti isolati, ricopre intere pendici collinari, costituisce un cordone quasi ininterrotto lungo le scarpate dei terrazzi fluviali e orla le rive dei canali.

Osservazioni: La capacità della Robinia di consolidare le zone esposte alle frane e all'erosione deriva dalla reazione della pianta alla povertà di nutrimento che caratterizza tali terreni; questa carenza stimola la pianta a produrre numerosi polloni e a ricoprire così in breve tempo la zona, sviluppando una fitta trama di radici. Come tutte le Leguminose, la Robinia ha noduli radicali contenenti simbiotici in grado di fissare l'azoto atmosferico e quindi di nitrificare il suolo rendendolo fertile. La Robinia riesce a smuovere passioni vivaci. C'è chi la detesta perché estranea alla nostra flora e infestante dei boschi, chi la tollera perché assicura una salda copertura boschiva in terreni instabili e poveri, chi la loda per l'elevata capacità produttiva; infine vi sono gli apicoltori che la vorrebbero ancora più diffusa per l'ottimo miele che si produce dai suoi fiori.

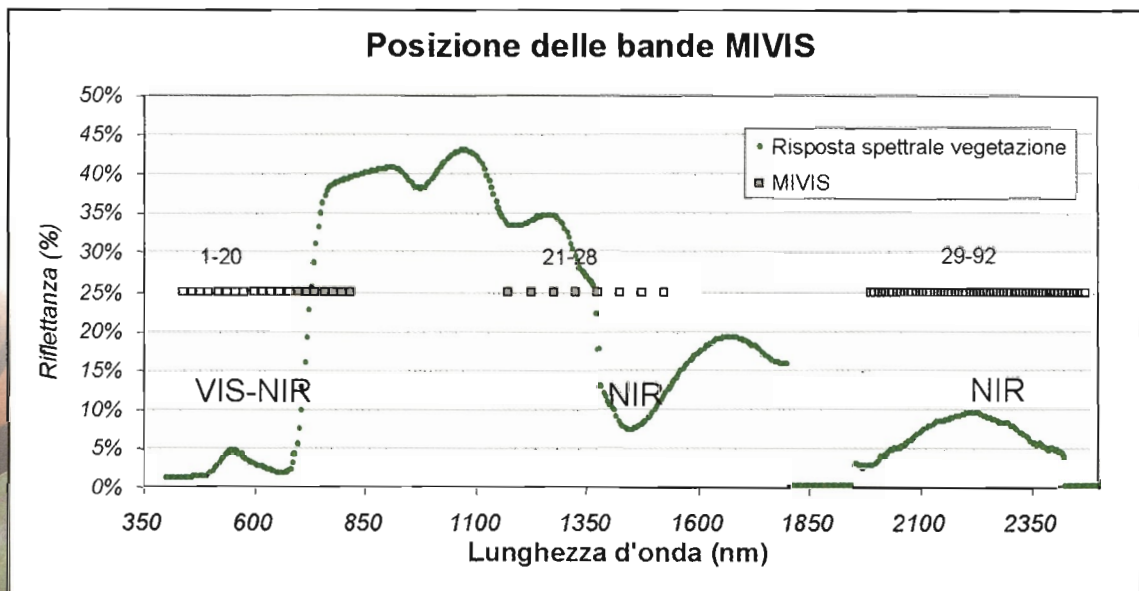


● **Figura B.9** Particolari di Robinia: il tronco, i fiori, le foglie e le spine

2.2 Acquisizione dei dati telerilevati utilizzati per la ripresa MIVIS

Per la classificazione delle specie arboree della Valle del Ticino sono stati utilizzati dati acquisiti dal sensore MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*) del progetto LARA, le cui caratteristiche tecniche sono state descritte nella Scheda di Approfondimento A.

La scelta dello strumento è stata motivata dalla conoscenza delle sue peculiarità, essendo ormai a disposizione della comunità scientifica italiana dal 1991, e dalle caratteristiche spettrali idonee al monitoraggio della vegetazione (Figura 16).



● **Figura 16**
Posizione delle bande MIVIS dei primi tre spettrometri nelle regioni spettrali del visibile e infrarosso vicino (VIS e NIR) rispetto alla firma spettrale della vegetazione

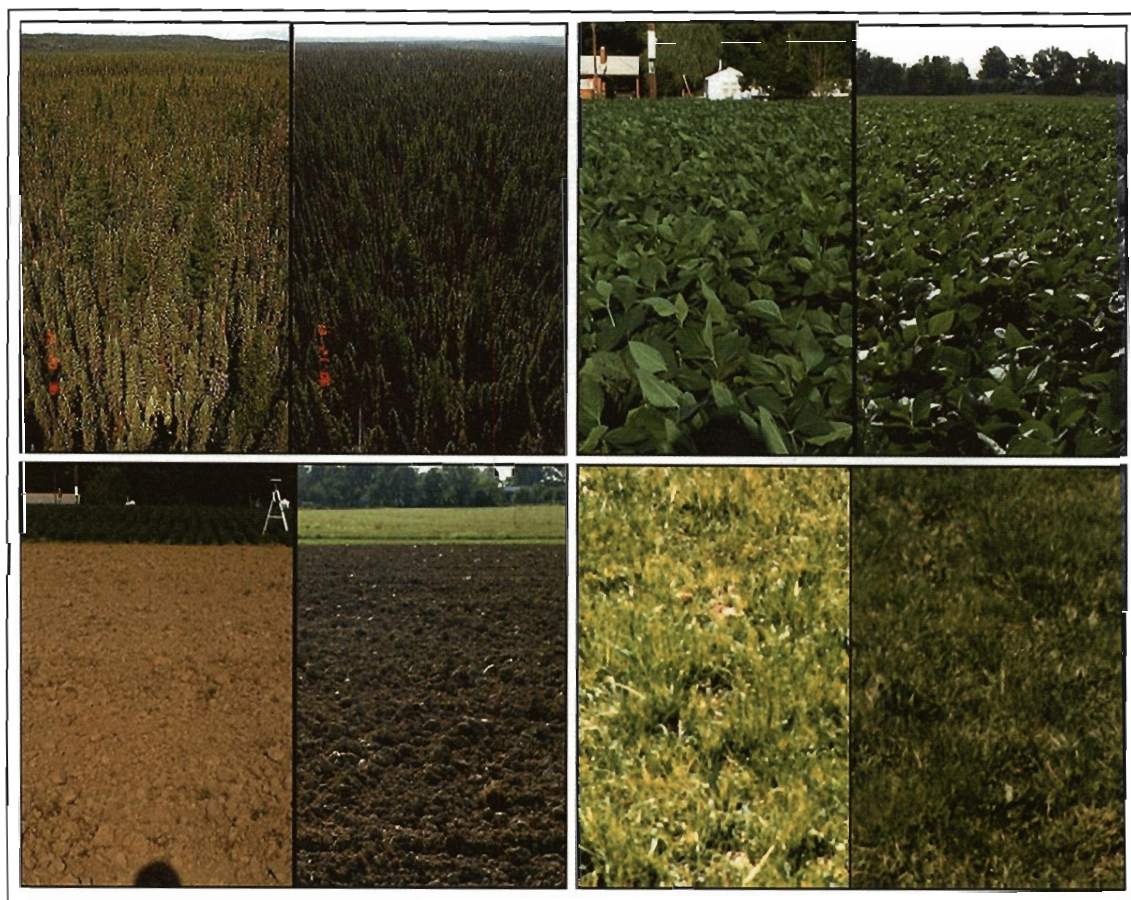
Inoltre la scelta è stata dettata anche dagli esperimenti condotti nel 2001 dal Parco su un data set sperimentale di dati MIVIS (Boschetti et al., 2002). Tali sperimentazioni hanno infatti sottolineato come i dati MIVIS fossero idonei alla mappatura delle specie arboree dei boschi del Parco del Ticino.

Pianificazione del sorvolo

Fase preliminare all'acquisizione dei dati è stata la pianificazione del sorvolo al fine di ricoprire la quasi totalità dei boschi della Valle del Ticino con il minor numero di strisciate, pur garantendo le condizioni di ripresa ottimali. Per pianificare le caratteristiche del volo aereo ci si è avvalsi della consulenza del CNR-IREA di Milano. Un volo aereo ai fini delle riprese da Telerilevamento richiede infatti che venga eseguito uno studio per minimizzare effetti indesiderati sul segnale misurato. L'energia riflessa dalle superfici cambia infatti in funzione della posizione dell'osservatore (il sensore) in relazione a quella della sorgente (il Sole). La risposta spettrale varia notevolmente se la ripresa avviene ad esempio con la sorgente alle spalle dell'osservatore, o in posizione opposta (Figura 17).

Al fine di minimizzare il disturbo dovuto alle condizioni di ripresa e d'illuminazione³,

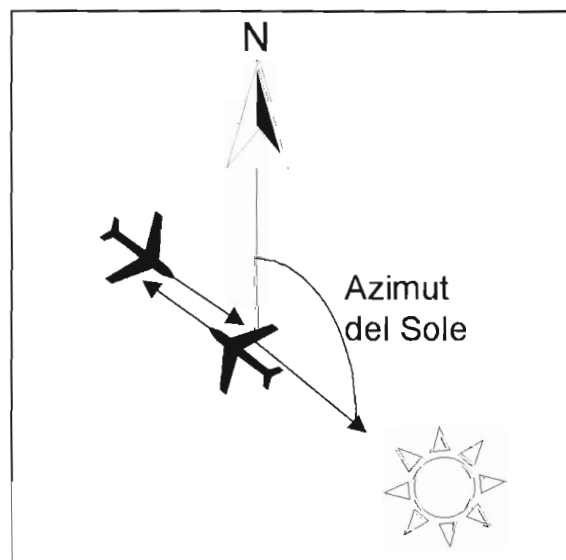
³ Il comportamento anisotropo della radiazione riflessa dalle superfici naturali provoca effetti di natura angolare sugli strumenti a scansione ad ampio abbracciamento, quale è il MIVIS. Tali effetti sono maggiori quando la scansione avviene nel piano del sole dove, in particolari configurazioni geometriche di sole-superficie-sensore si hanno dei picchi di riflessione (hot-spot) non riconoscibili in altre condizioni (es. visione nadirale).



● **Figura 17**
 Un esempio intuitivo dell'influenza delle condizioni di ripresa sulla risposta spettrale delle superfici naturali. In senso orario, a partire dalla prima coppia di foto in alto a sinistra: una foresta di conifere, un campo coltivato a soia, un pascolo alpino e un suolo nudo

l'acquisizione dei dati MIVIS deve rispondere a prestabiliti canoni geometrici. In particolare, è necessario che la scansione sia il più possibile ortogonale alla direzione del sole, ovvero il velivolo deve percorrere le rotte lungo la direttrice solare. Questa

condizione si realizza quando la rotta geografica uguaglia l'azimut del sole, come schematizzato nella figura seguente (Figura 18).

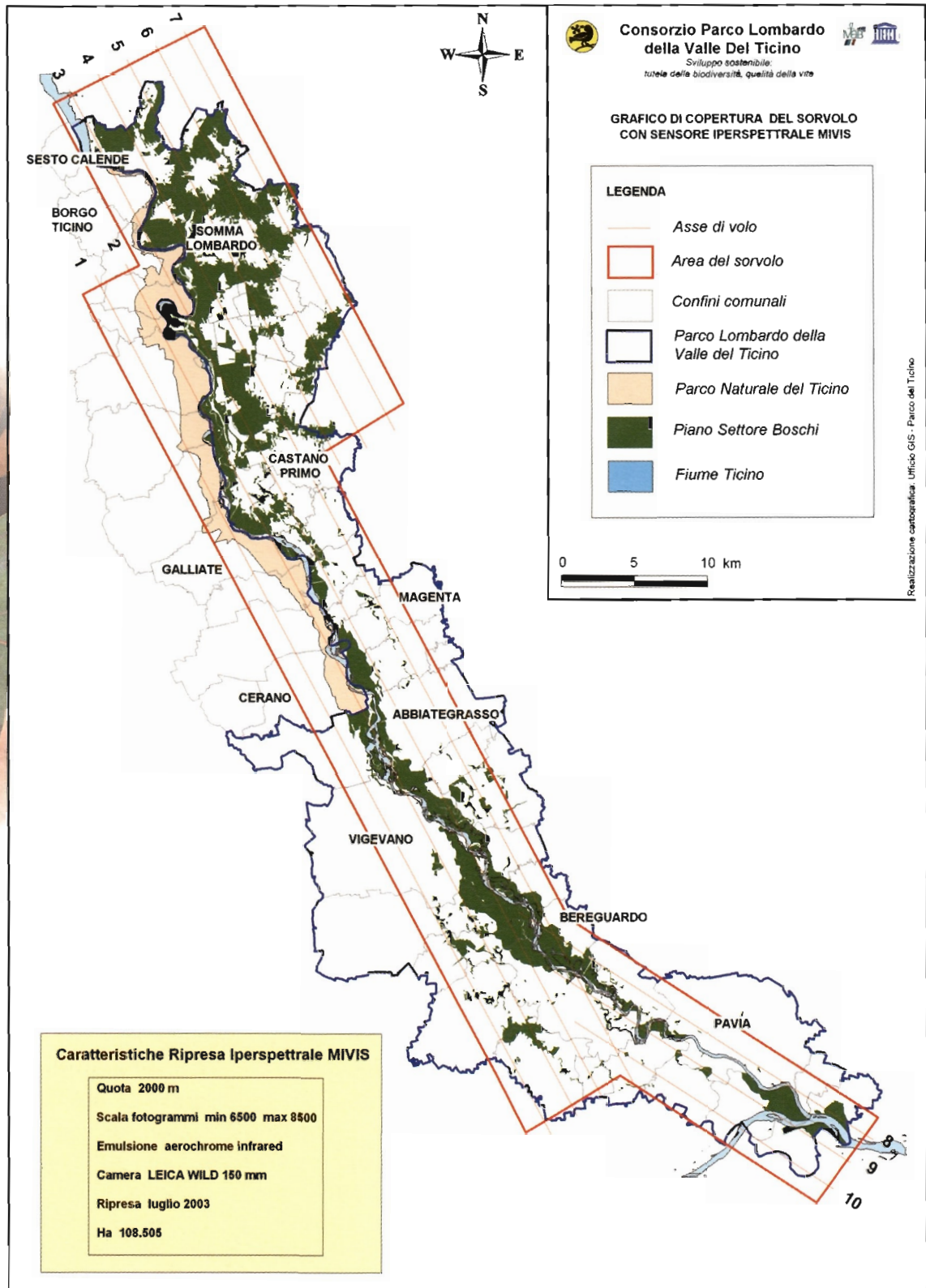


● **Figura 18**
 Rotta geografica e azimut del Sole

Il sorvolo è stato effettuato il 2 luglio 2003 dalla CGR (Compagnia Generale Riprese aeree) ad una quota di 2000 metri circa, che corrispondono ad una risoluzione a terra del *pixel* di 4 metri. In totale sono state riprese 10 strisciate che ricoprono l'intera superficie boschiva del territorio del Parco, come mostrato in Figura 19. Ogni strisciata, a sua volta, è stata suddivisa in un certo numero di sezioni, variabile rispetto alla lunghezza della strisciata stessa, per un totale di 51 sezioni.

2.3 Fasi del pre-processamento

Prima di venire elaborate, le immagini MIVIS devono essere corrette; l'insieme di queste procedure viene chiamato pre-processamento e, in generale, consta di due procedimenti:

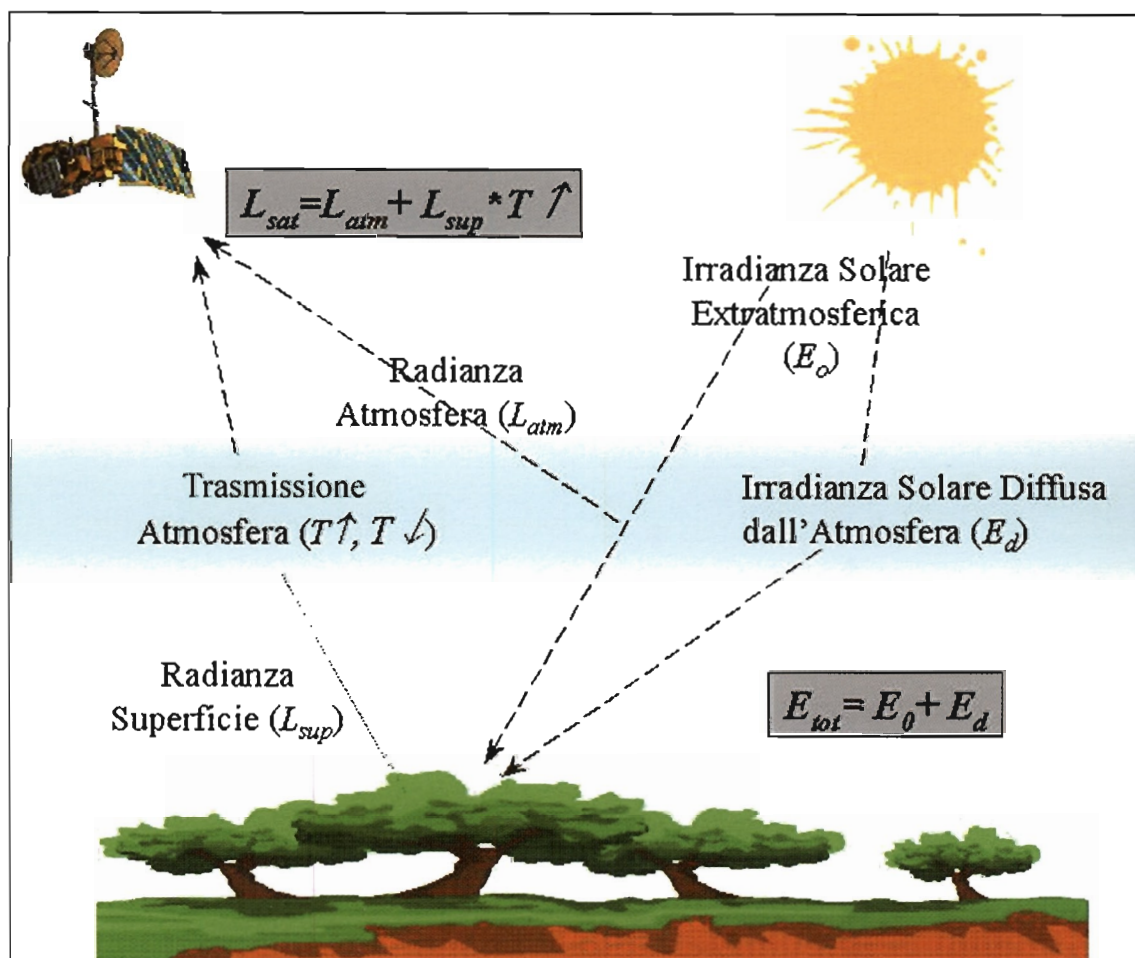


● **Figura 19** Il sorvolo aereo realizzato dalla CGR (Compagnia Generale Ripreseeree) di Parma

- Correzioni atmosferiche, per eliminare gli effetti di disturbo causati dalla presenza dell'atmosfera.
- Correzioni geometriche, per georiferire le immagini e renderle sovrapponibili alla cartografia di riferimento.

Correzione atmosferica

Prima di raggiungere il sensore, la radiazione solare riflessa dalle superfici indagate attraversa l'atmosfera. I gas e gli aerosol che costituiscono l'atmosfera diffondono e assorbono tale radiazione, cambiandone l'intensità e variandone la distribuzione spaziale. In particolare l'effetto atmosferico può causare un disturbo di diversa entità, in funzione di parametri quali la quota di volo, la presenza di aerosol, la geometria del sistema sole-superficie-sensore, o le condizioni atmosferiche durante il rilievo (Figura 20).



● **Figura 20** Interazione dell'atmosfera con la radiazione elettromagnetica

Le correzioni atmosferiche sono state realizzate dal reparto di Milano del CNR-IREA. A tal fine è stata svolta una campagna di misure a terra sincrona al sorvolo aereo finalizzata alla taratura ed alla validazione di un modello di correzione basato sugli output del modello 6S (Tanre et al., 1990).

I parametri misurati al suolo sono:

- Irradianza⁴ solare diretta, per la stima della concentrazione di aerosol presente in atmosfera;

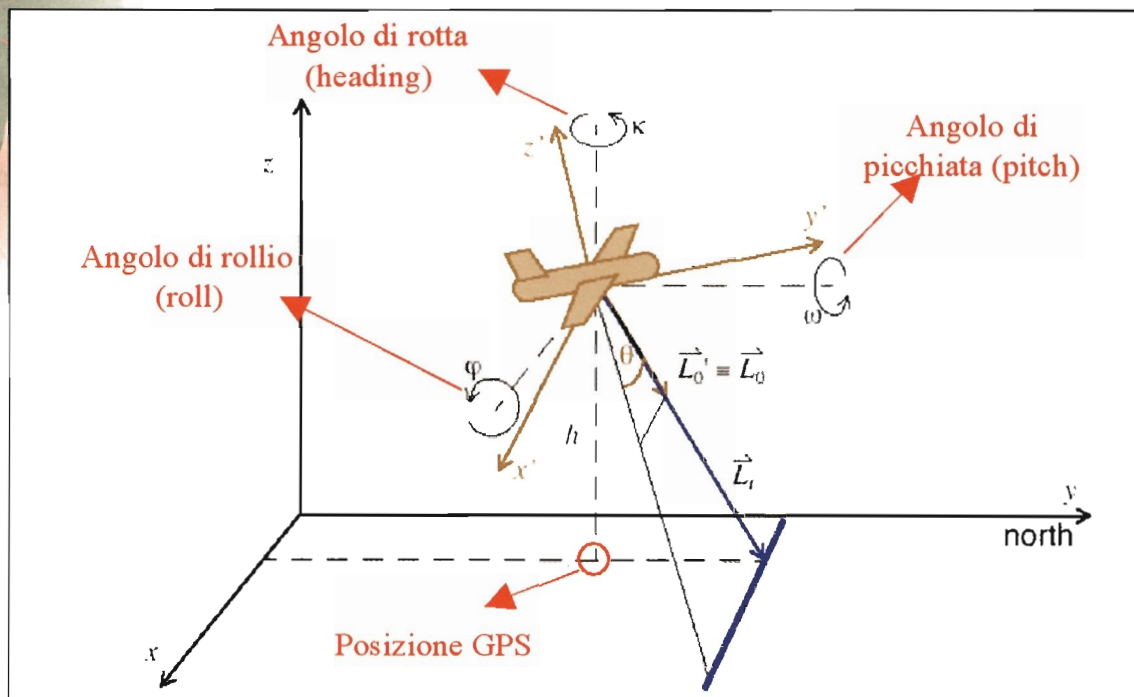
⁴ Irradianza: vedere Glossario.

- Riflettanza⁵ di alcune superfici con caratteristiche idonee alla valutazione delle procedure di correzione atmosferica delle immagini.

Il prodotto conclusivo del CNR è consistito nella realizzazione di un programma che ha permesso di eseguire la correzione atmosferica delle immagini MIVIS in modo automatico. A seguito della correzione si dispone di un dato normalizzato dagli effetti atmosferici che permette di utilizzare le immagini telerilevate secondo un approccio quantitativo e fisicamente basato. La correzione dell'effetto atmosferico non influisce significativamente ai fini della classificazione delle specie, ma per altri tipi di elaborazione delle immagini (ad esempio, la stima quantitativa di parametri biochimici o biofisici) è necessario tenerne conto.

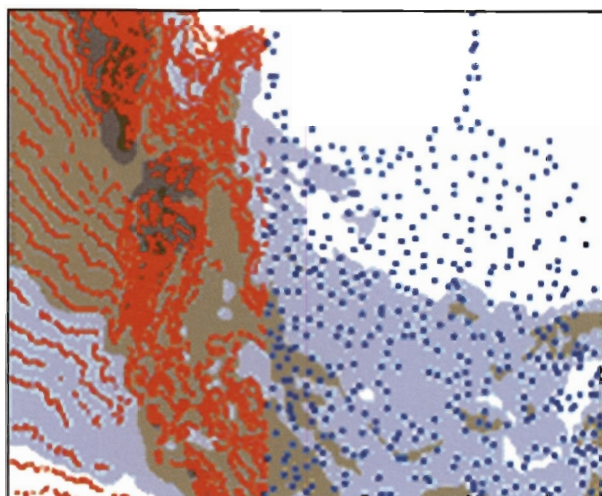
Correzione geometrica

Le immagini relative alle 10 strisciate MIVIS sono state georeferenziate dal gruppo di Telerilevamento del DISAT dell'Università di Milano Bicocca, in collaborazione con il LARA, sezione dell'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR di Roma e con la CGR di Parma, per la definizione dei dati necessari da acquisire durante il sorvolo al fine di una successiva corretta elaborazione. Per la georeferenziazione è stato utilizzato il software PARGE (www.rese.ch/parge/), sviluppato appositamente per immagini telerilevate acquisite da piattaforma aerea. Il processo di georeferenziazione si basa sull'analisi dei dati relativi alla posizione, alla rotta (*heading*) e ai movimenti di rollio (*roll*) e picchiata (*pitch*) dell'aereo, registrati durante l'acquisizione dell'immagine (Figura 21). Queste informazioni, unite alle variazioni di quota presenti, individuate a partire da un modello digitale del terreno (DEM), permettono al software di individuare le coordinate geografiche corrispondenti a ciascun *pixel* dell'immagine.



● **Figura 21**
Parametri di navigazione acquisiti durante il volo e schema del loro significato. (DISAT - Bicocca)

⁵ Riflettanza: vedere Glossario.



● **Figura 22**
Tipologia dei dati digitali utilizzati:
 isoipse e punti quotati. (DISAT - Bicocca)

Generazione del DEM

Per la generazione del DEM (Modello Digitale del Terreno, *Digital Elevation Model*) si sono utilizzate le informazioni digitali, isoipse e punti quotati, ottenibili dalla cartografia vettoriale della Regione Lombardia alla scala 1:10000 (Figura 22).

A partire da questi dati si è poi utilizzato come interpolatore Topogrid (ESRI, 1995; Hutchinson, 1989), appartenente al modulo GRID di Arc/Info che consente di produrre un DEM idrologicamente corretto. E' stata così generata una GRID, ovvero un'immagine raster con cella di risoluzione di 10 metri. Tale dato è

stato successivamente convertito a 4 metri utilizzando un ricampionamento bilineare⁶ per essere messo a registro con le immagini MIVIS. Per quanto riguarda la zona piemontese del territorio indagato, invece, si è utilizzato il DEM della regione Piemonte acquistato direttamente dal Parco, anche in questo caso ricampionato a 4 metri. I due prodotti sono poi stati mosaicati per ricoprire l'intero territorio ripreso.

Ricerca dei punti di controllo

In aggiunta alla riproiezione automatica generata dal programma PARGE, a causa di errori insiti nel rilevamento della posizione dell'aereo e di problemi nella calibrazione dei sensori di misura dei movimenti, è stato necessario individuare manualmente sulle immagini un certo numero di punti di controllo di coordinate note (*GCP, Ground Control Point*), usando come riferimento la Carta Tecnica Regionale 1:10000. Questi punti sono stati utilizzati dal programma per correggere i valori registrati durante il volo, migliorando notevolmente la precisione della georeferenziazione. Per ottenere una buona accuratezza geometrica, è stato necessario individuare un punto di controllo ogni circa 150-200 linee dell'immagine (corrispondenti a circa 600-800 m). Il processo di georeferenziazione è sinteticamente rappresentato nel diagramma in Figura 23.

Accuratezza del risultato

L'accuratezza geometrica ottenuta si è rivelata piuttosto buona, con errori di posizionamento mediamente inferiori ai 3-4 pixel (10-15 metri). In alcuni casi permangono tuttavia errori di posizionamento molto più elevati, che possono raggiungere anche i 50-60 metri. Analizzando i dati di navigazione, si è potuto osservare che le zone interessate da valori di errori RMS⁷ così elevati sono in relazione a movimenti molto ampi e rapidi dell'aereo,

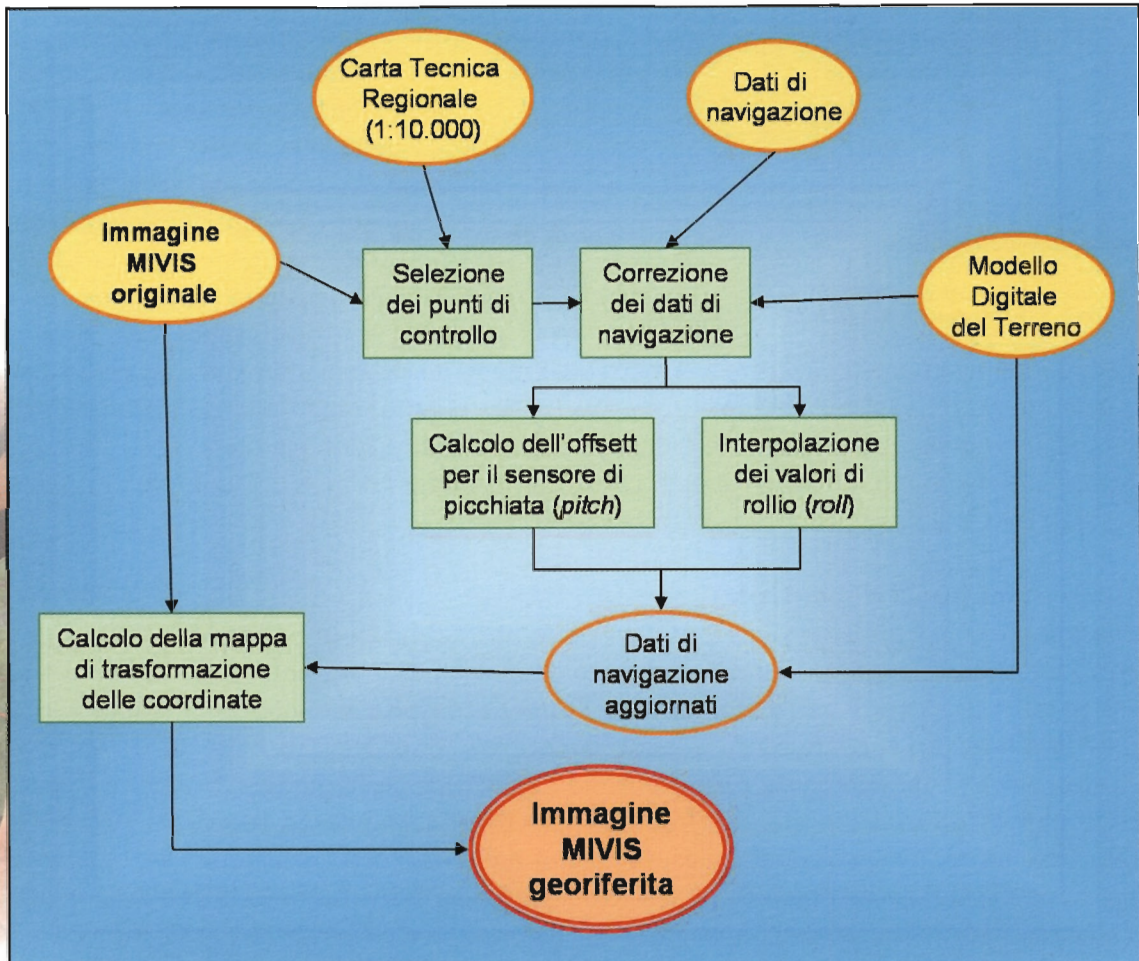
⁶ Ricampionamento bilineare: procedura di interpolazione attraverso la quale si individua il valore del pixel corrispondente alla posizione precisa definita dalla trasformazione. Il nuovo valore DN(X,Y) viene definito mediante un'interpolazione che coinvolge i quattro pixel più vicini alle coordinate ottenute dalla trasformazione geometrica. In particolare si ha:

$$DN(X, Y) = ax + by + cxy + d,$$

Dove $x = X$ -riga, $y = Y$ -colonna, mentre a,b,c,d sono i quattro coefficienti determinati in modo tale che la funzione assuma i valori noti nei quattro pixel coinvolti.

⁷ Le correzioni geometriche sono sempre affette da errore RMS (Root Mean Square Error): esso esprime in genere in pixel la distanza tra il GCP cartografico di riferimento (x_r, y_r) ed il relativo GCP ritrasformato (x_t, y_t).

testimoniati da veloci variazioni nei parametri di navigazione registrati. In questi casi, è probabile che il giroscopio di navigazione non riesca a registrare correttamente le variazioni di assetto, con conseguenti effetti sulla precisione del processo di georeferenziazione. Tali situazioni sono state comunque corrette dalla ricerca aggiuntiva di ulteriori punti di controllo. In Figura 24 è riportato un esempio del risultato finale di sovrapposizione tra una delle strisciate georeferenziate e la Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000.



● **Figura 23** Flow Chart relativa alle fasi di georeferenziazione

Minimizzazione dell'effetto della geometria di ripresa

In Figura 25 è riportata una composizione in colori reali di una porzione della striscia n.2. Si può notare come la parte sinistra dell'immagine appaia maggiormente illuminata rispetto a quella di destra. Questi effetti di disturbo, causati da una variazione della riflettività apparente nella direzione perpendicolare alla direzione di volo, sono dovuti al comportamento anisotropo delle superfici naturali (effetto di BRDF⁸) che determina risposte spettrali diverse per le stesse superfici in funzione della differente geometria di osservazione. A causa di tali disturbi, campioni della stessa specie rilevati in zone diverse dell'immagine, mostrano comportamento statistico differente e potrebbero essere assegnati a tipologie differenti in fase di classificazione. Una corretta classi-

⁸ Il comportamento anisotropo può essere spiegato dalla Funzione di Distribuzione della Riflettanza Bidirezionale (BRDF) che descrive la dipendenza della riflettività della superficie dalle geometrie d'illuminazione e d'osservazione.



● **Figura 24**
Esempio di sovrapposizione tra immagine georiferita
e Carta Tecnica Regionale 1:10000 (in rosso)

ficazione richiederebbe di conseguenza la raccolta di un set di esempi (*training set*) differenziato in funzione della geometria di ripresa, con campioni di ogni specie in ciascuna zona dell'immagine. Tale compito sarebbe tuttavia molto oneroso sia in termini di complessità dell'algoritmo di classificazione, sia di campagna di rilievo a terra.

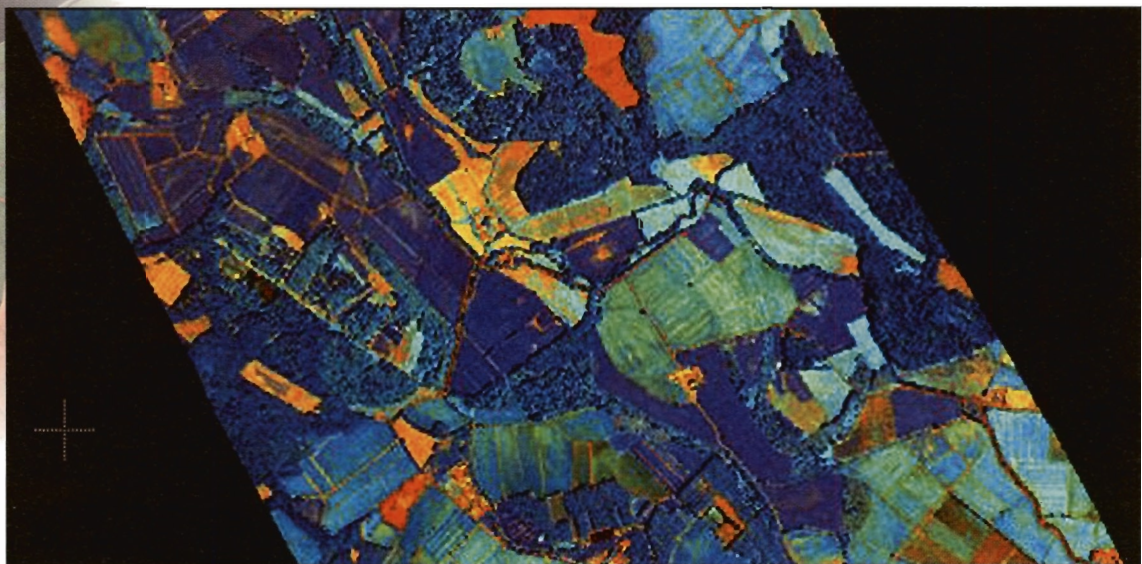
Nel caso in esame non è stato possibile utilizzare una modellazione rigorosa, perchè avrebbe richiesto una conoscenza a priori della natura delle superfici e della composizione dell'atmosfera al momento del volo per le diverse parti dell'immagine. Si è resa quindi obbligata l'adozione di tecniche di minimizzazione.

Ipotizzando che gli effetti di BRDF siano legati soltanto alla geometria di ripresa e non dipendano dalla lunghezza d'onda di ciascuna banda, per minimizzarli senza l'utilizzo di ulteriori dati ancillari è stato necessario normalizzare l'immagine utilizzando un rapporto fra bande secondo un approccio proposto in letteratura (Ferrarini et al., 2001). Questo è possibile utilizzando due approcci:

1. calcolare il rapporto fra bande adiacenti (ciascuna banda viene divisa per la precedente);
2. calcolare il rapporto di ogni banda rispetto ad una banda di riferimento.

Nel primo caso l'alta risoluzione spettrale del sensore fa sì che la variazione di riflettanza fra bande adiacenti sia minima ed in molti casi trascurabile, di conseguenza il rapporto è sempre molto vicino ad 1 ed il contenuto informativo dell'immagine risultante è molto basso.

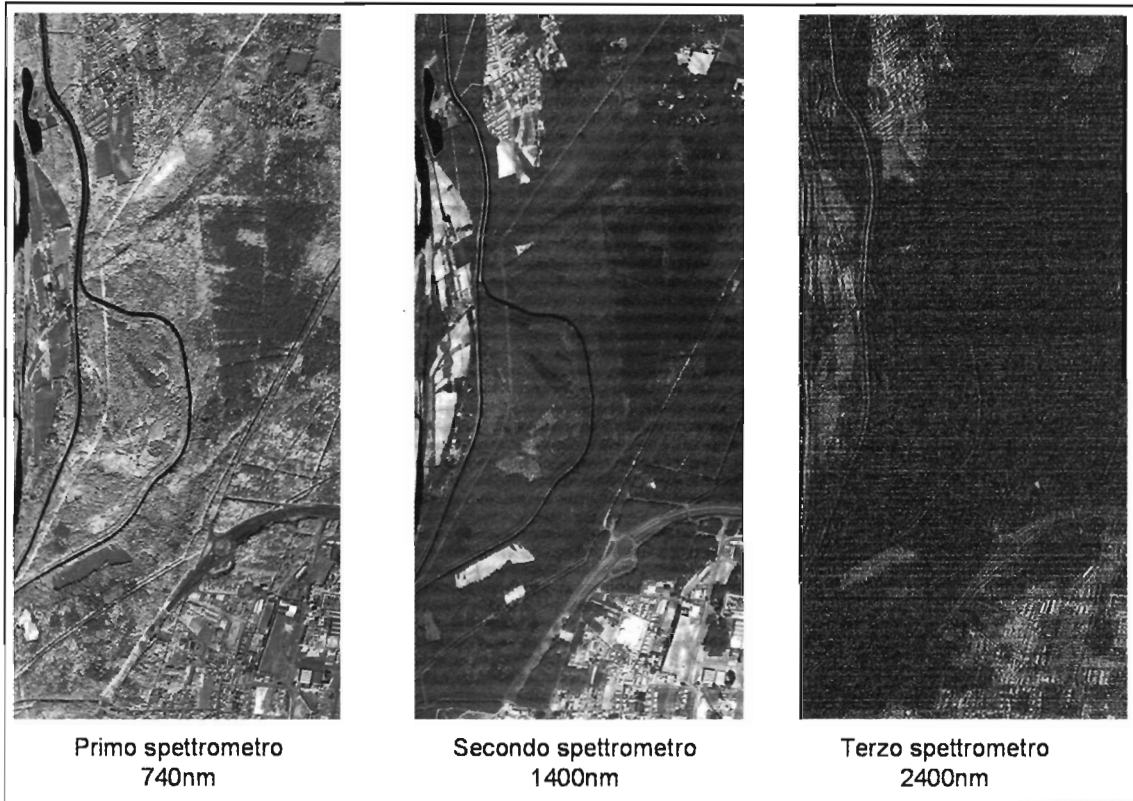
In alternativa, è possibile normalizzare tutte le bande rispetto ad una stessa banda di riferimento. In questo caso l'immagine iperspettrale normalizzata mantiene, a meno di una costante, tutto il contenuto informativo dell'immagine iniziale. Per questo motivo si è scelto di normalizzare l'immagine utilizzando il secondo approccio.



● **Figura 25**
In alto: composizione a colori reali delle bande MIVIS 13,7,3. Si nota l'effetto di BRDF dato dalla geometria di ripresa: il lato destro dell'immagine è considerevolmente più scuro del lato sinistro. In basso, composizione RGB dei rapporti di bande con utilizzo delle bande 12, 14, 16: l'effetto di BRDF appare annullato

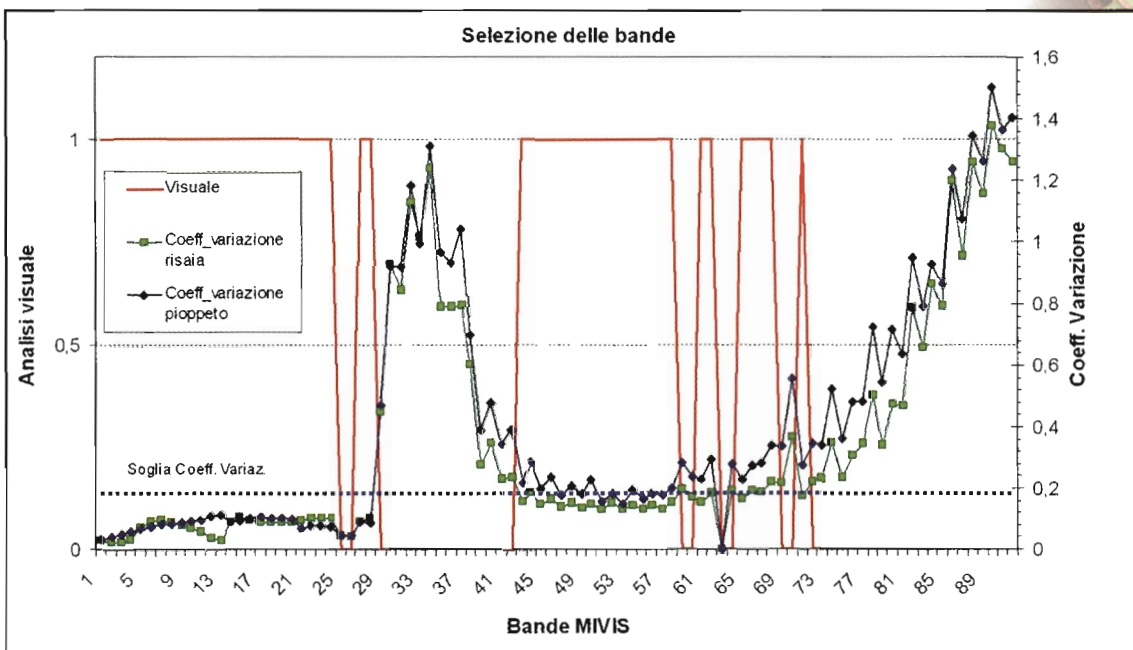
Identificazione delle bande rumorose

Un'ulteriore analisi preliminare è stata la selezione delle bande non rumorose, cioè quelle con la miglior informazione energetica (che mostrano un buon rapporto di segnale-rumore). Poiché i dati iperspettrali forniscono immagini per porzioni dello spettro molto strette ($\sim 10-20$ nm) può accadere che in alcune regioni spettrali il rapporto segnale rumore non sia idoneo al processamento dei dati. Queste bande sono perciò da escludere a priori dall'elaborazione dei dati per fini di classificazione (Figura 26).



● **Figura 26** Esempio di bande MIVIS e relativo rumore per i primi tre spettrometri

Per decidere quali tra le 102 bande considerare nell'elaborazione successiva, l'operatore può condurre un'analisi visiva per valutare il rumore del dato. Ad ogni banda è stata così associata un'etichetta indicante la sua idoneità (valore 1) o non idoneità



● **Figura 27** Analisi del rumore nelle bande MIVIS. La linea rossa rappresenta l'identificazione manuale delle bande idonee (valore 1) e rumorose (valore 0). L'andamento del coefficiente di variazione per le due superfici (linea verde, risaia, e blu, pioppeto) mostra un andamento congruente con quello dell'analisi visiva

(valore 0) per l'impiego nelle successive fasi di elaborazione. A questa analisi è stato affiancato il calcolo del coefficiente di variazione⁹ di due aree vegetate omogenee (una risaia ed un pioppeto). Tale indice può infatti essere un buon indicatore del rapporto segnale-rumore dei dati.

La Figura 27 mostra il risultato dell'analisi numerica paragonato a quello condotto in modo visivo. Come si può vedere i dati di alcune bande hanno un rumore molto alto (corrispondente ad un alto valore del coefficiente) e devono perciò essere escluse.

I risultati dell'analisi sono mostrati in Tabella 2 dove, per ogni spettrometro, vengono identificate le bande non rumorose. Tra le bande idonee del terzo spettrometro sono state scelte solo le dispari in quanto nella modalità di ripresa MIVIS, esse vengono acquisite con una larghezza di banda doppia rispetto alle bande pari. Tale larghezza di bande, come si può notare dal grafico, consente un miglior rapporto segnale-rumore in quanto i dedectors dello scanner possono ricevere complessivamente più energia.

Spettrometro	Bande	Selezione per rumore (soglia $\delta/\mu < 0.2$)	Totale bande
Primo spettrometro	1-20	1-20	20
Secondo spettrometro	21-28	21-24; 27-28 *	6
Terzo spettrometro	29-92	43-45-47-49-51-53-55- 57-59-61-65-67-71**	13
Totale			39

* le bande 25 e 26 nonostante abbiano un valore del coefficiente di variazione molto basso ($\delta/\mu < 0.1$) sono state eliminate perché hanno un segnale bassissimo $\sim 100-200$ watt rispetto ai 1000-2000 delle bande del I spettrometro
 **le bande comprese tra gli intervalli (43 -62; 64-67; 71) hanno un valore del coefficiente di variazione molto basso ($\delta/\mu < 0.2$). La banda 63 ha valori nulli. Di questa selezione si sono considerate solo le bande dispari che nella modalità di ripresa MIVIS acquisiscano con una larghezza di banda doppia rispetto alla bande pari (es. 43 2.104-2.12 larghezza 0.016 μm anziché 42 2.094-2.102 larghezza 0.08)

● **Tabella 2** Analisi del rumore e selezione delle bande idonee

Identificazione delle bande significative per la classificazione: potere discriminante

Per individuare quali bande, tra quelle identificate come non rumorose portino con sé maggior informazione per discriminare le specie arboree di interesse (vedi Tabella 1), è stato calcolato il potere discriminante di ognuna di esse. Questo indice, calcolato secondo la formula di seguito riportata, rappresenta la sommatoria dei pesi che le singole bande hanno nel discriminare le classi. Il peso viene calcolato come la differenza tra le medie dei valori di due classi normalizzata per la radice della somma dei quadrati delle loro varianze.

$$D_x = \frac{2}{(n-1)n} \sum_{j=1}^N \sum_{k=j+1}^N \frac{|\mu_{xj} - \mu_{xk}|}{\sqrt{\sigma_{xj}^2 + \sigma_{xk}^2}}$$

Dove:

μ_{xj} = Valor medio dei valori della banda x associati alla classe j-esima

μ_{xk} = Valor medio dei valori della banda x associati alla classe k-esima

σ_{xj} = Valor medio della varianza dei valori della banda x associati alla classe j-esima

σ_{xk} = Valor medio della varianza dei valori della banda x associati alla classe k-esima

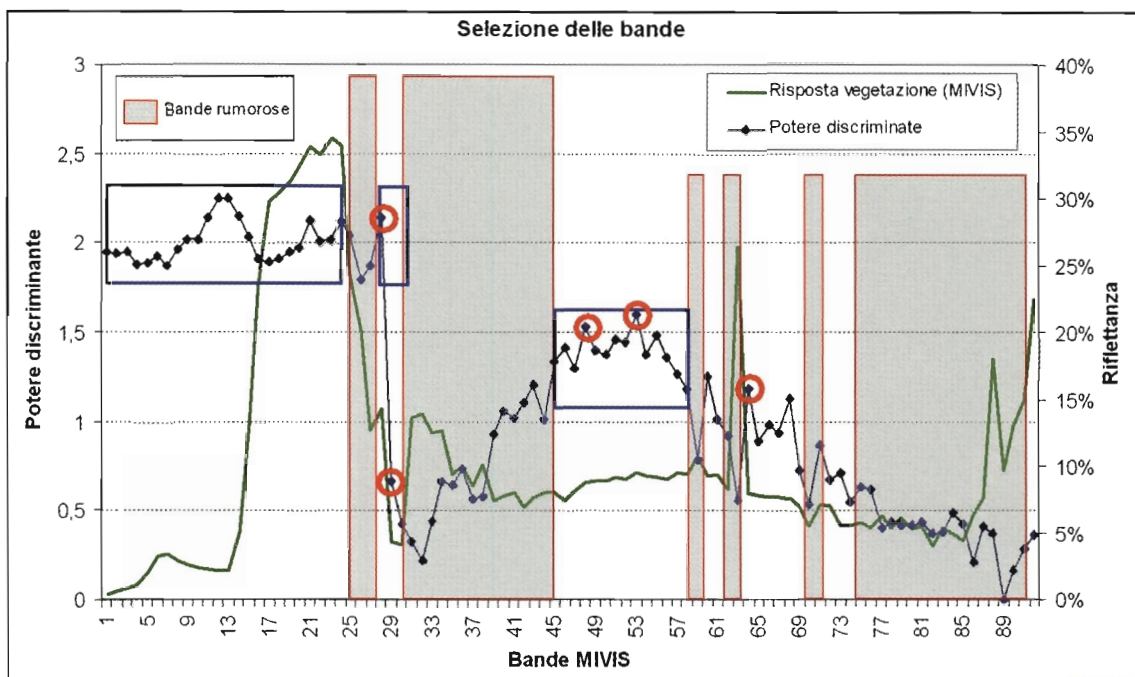
⁹ Coefficiente di variazione: vedere Glossario.

Le statistiche per le singole classi sono state estratte dalle immagini in zone dove la composizione delle specie era nota.

Per comprendere in maniera intuitiva il significato di tale indice si può immaginare che tanto più due classi avranno in una banda valori diversi e tanto più piccola sarà la loro varianza, allora maggiore sarà la possibilità di distinguere queste due classi utilizzando la banda in questione.

Se questa operazione viene condotta ciclicamente su tutte le coppie di classi possibili si otterrà il peso della banda nel discriminare le varie classi.

Il grafico successivo (Figura 28) mostra i risultati dell'analisi del potere discriminante sovrapposti ad una firma spettrale di vegetazione come campionata dal sensore MIVIS (sono state escluse le bande rumorose).



● **Figura 28** Analisi del potere discriminante delle bande MIVIS non soggette a rumore

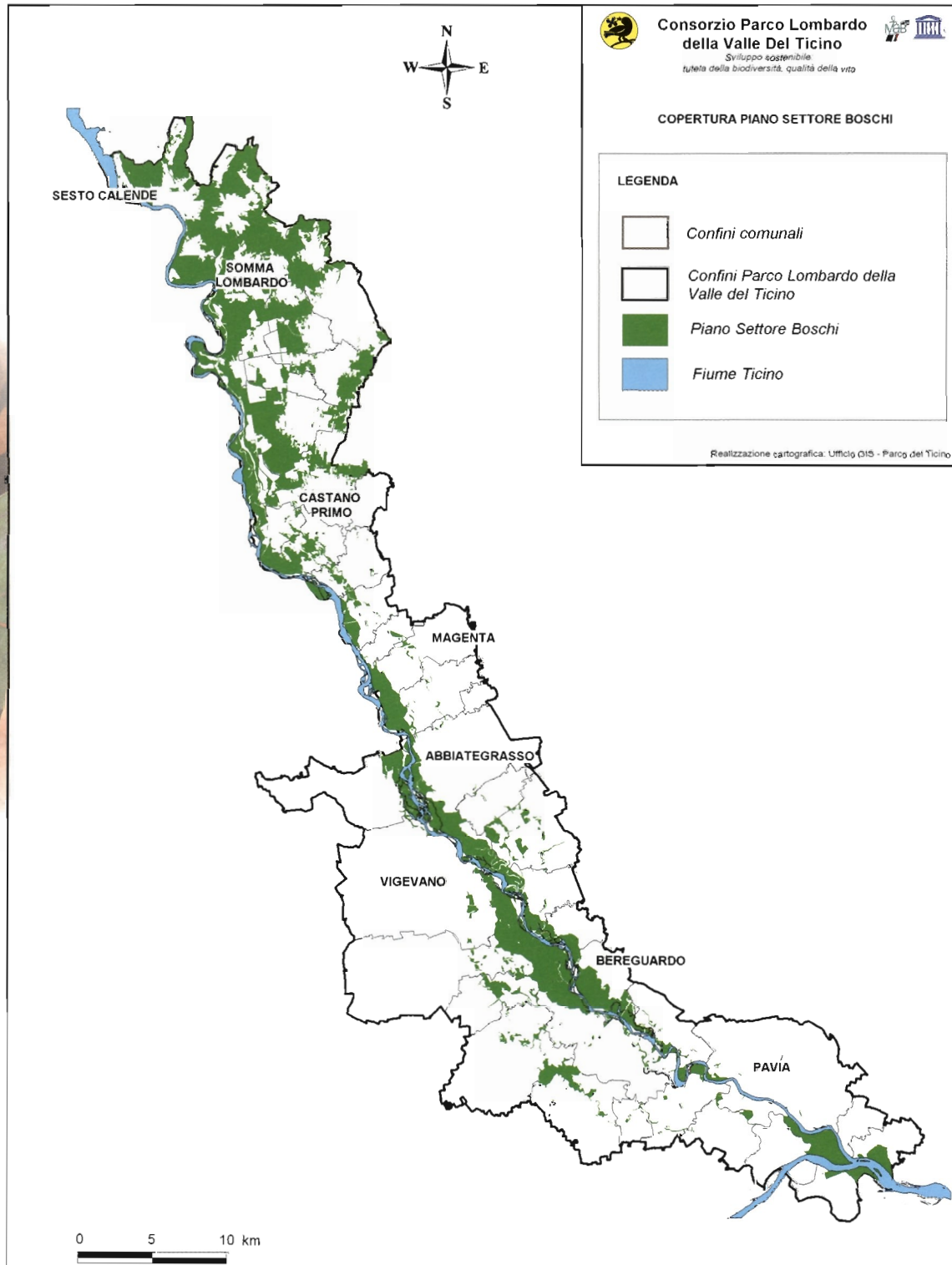
Si nota subito come i valori più alti siano riferiti alle bande del primo spettrometro. In questa regione spettrale (0.43-0.83 μm) ricadono infatti le *features*¹⁰ caratteristiche dell'assorbimento dei pigmenti fotosintetici. Le bande della regione del *red edge*, confine del passaggio tra assorbimento nel rosso e riflessione nell'infrarosso, risultano infatti le più discriminanti in assoluto. Il secondo spettrometro risulta molto rumoroso ma possiede due bande molto significative (27-28) in quanto sono prossime ad una delle *feature* di assorbimento dell'acqua. Altri massimi relativi si hanno nella regione nel medio infrarosso nel terzo spettrometro.

2.4 Ricerca delle verità a terra

Per programmare in modo efficace le campagne di rilievo a terra è stata esaminata la cartografia tematica in possesso del Parco ed implementata, su piattaforma GIS, una banca dati dedicata. Le informazioni che si sono dimostrate utili per lo studio del territorio, finalizzato alla pianificazione delle uscite di campo, sono le seguenti:

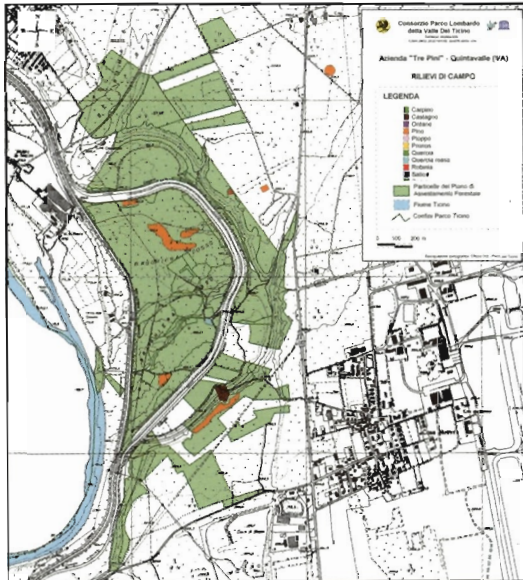
¹⁰ Features: attributi, insieme di caratteristiche.

- Carte del Piano Settore Boschi, approvato con Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia, del 30 agosto 1990, 2° supplemento straordinario al n. 35 (Figura 29);
- Piani di Assestamento Forestale, approvati con delibera della Regione Lombardia inizialmente disponibili solo in forma cartacea e successivamente digitalizzati e inseriti nel SIT del Parco (Figure 30 e 31);

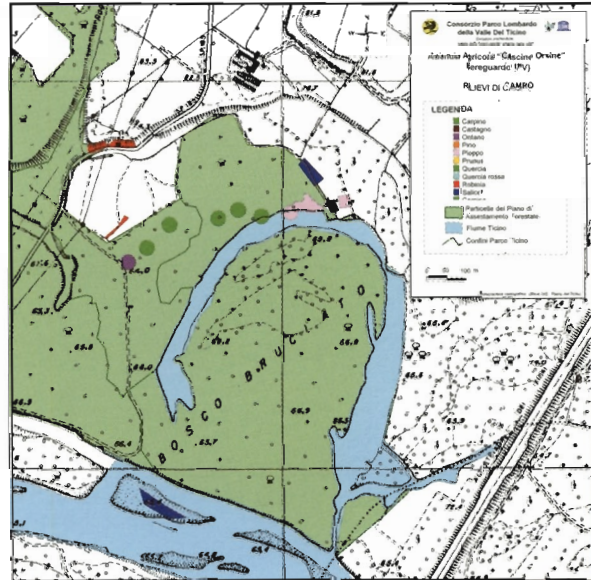


● **Figura 29**
Immagine estratta dal Piano Settore Boschi del Parco del Ticino:
le aree verdi corrispondono alla distribuzione delle aree boscate del Parco

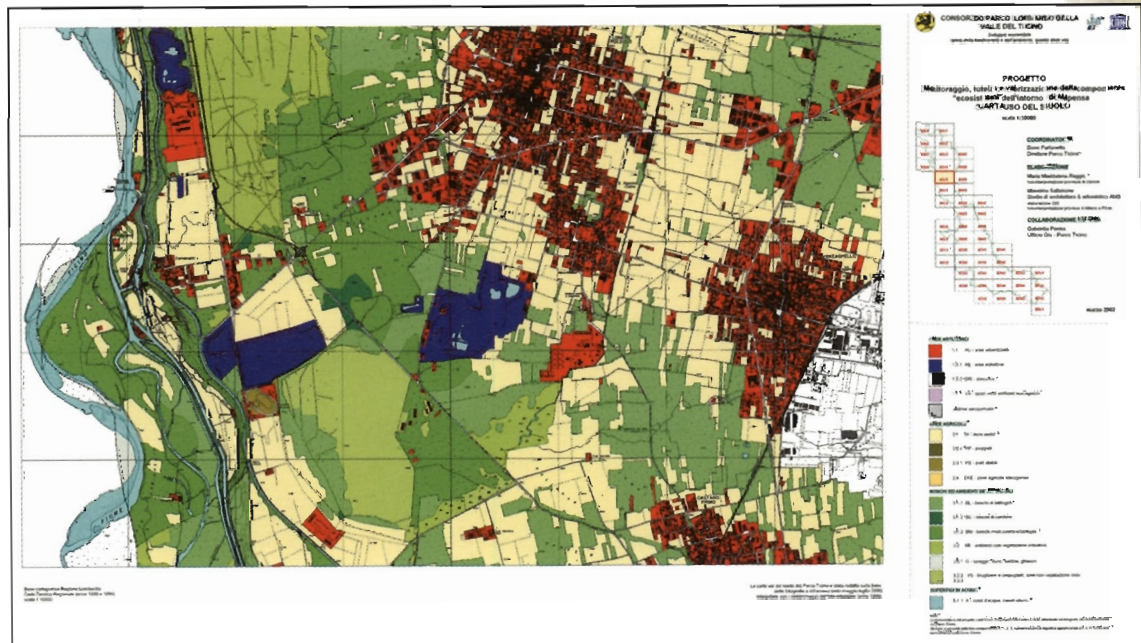
- Carte dell'Ecomosaico estratte dal lavoro sul "Monitoraggio della componente ecosistemi per l'area di Malpensa", pubblicato dal Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino nell'anno 2002 (AA.VV., 2002), e attualmente completato per tutto il territorio del Parco (Furlanetto et al., 2005) (Figura 32);
- Carte dell'Uso del Suolo (Figura 33), prodotte per fotointerpretazione di fotografie ad Infrarosso Falso Colore dell'anno 2000, acquistate dal Parco dalla Compagnia Generale Ripresearee;
- Rilievi GPS specifici;
- Fotointerpretazione delle immagini MIVIS, visualizzate con varie modalità di enfattizzazione.



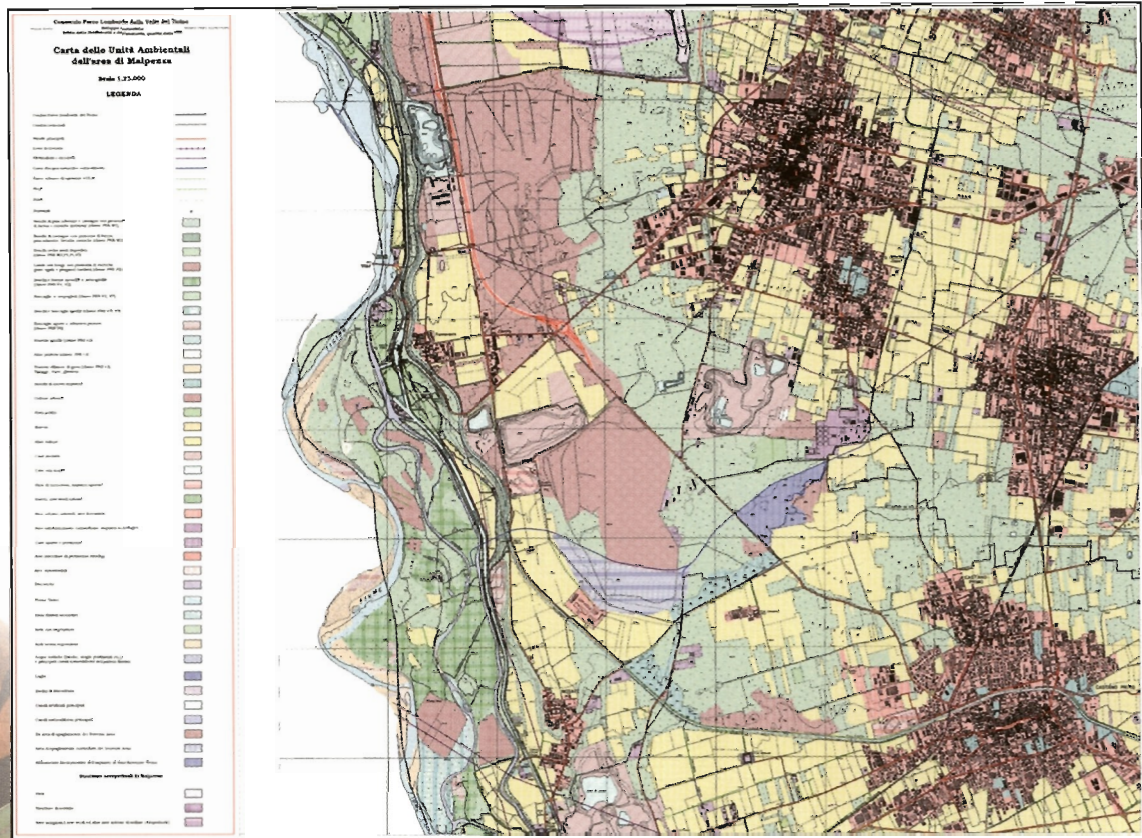
● **Figura 30**
Piano di Assestamento Forestale, dell'Azienda Tre Pini - Quintavalle (VA), con digitalizzazione delle verità a terra idonee individuate durante le uscite di campo



● **Figura 31**
Estratto del Piano di Assestamento Forestale, dell'Azienda Agricola Cascine Orsine (PV), con digitalizzazione delle verità a terra idonee individuate durante le uscite di campo



● **Figura 32** Immagine estratta dall'Ecomosaico del Parco del Ticino, cartografia riferita alla distribuzione delle Unità Ambientali



● **Figura 33** Immagine estratta dall' **Uso del Suolo del Parco del Ticino**, riferita alla **tavola A5c5 della CTR Regione Lombardia**, scala **1:10000**

Dopo aver visionato tutti i dati utili a disposizione, è iniziato il lavoro di ricerca sul territorio di aree campione rappresentative delle singole specie della legenda generale. I dati a terra sono infatti indispensabili per le procedure di classificazione utilizzate in questo lavoro, come verrà spiegato dettagliatamente nel Paragrafo 2.5. Le aree ricercate per ciascuna classe di interesse devono avere caratteristiche precise:

- concentrazione della specie nel piano dominante non inferiore all'80% in un'area di almeno 100 mq;
- copertura delle chiome nel piano dominante non inferiore all'80%.

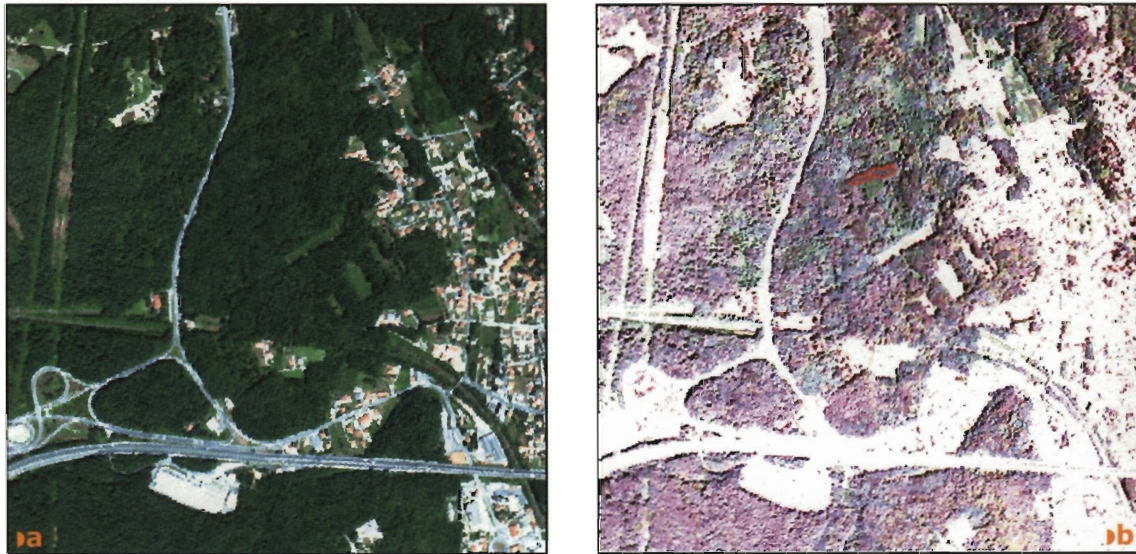
La procedura adottata inizialmente per la ricerca dei dati a terra prevedeva che i tecnici forestali, sulla base della loro conoscenza delle aree boschive della zona e con l'ausilio di un ricevitore GPS Garmin V (vedi Scheda di Approfondimento C), individuassero siti idonei ad essere impiegati in fase di classificazione. I siti dovevano possedere le caratteristiche di purezza, copertura e superficie descritte in precedenza. Tale metodologia operativa è però risultata inadeguata e non sufficiente. Ciò è stato causato principalmente dai seguenti motivi:

- la spiccatissima eterogeneità del patrimonio forestale, che ha reso molto problematica, soprattutto in particolari zone, l'individuazione in purezza di alcune specie arboree;
- la non adeguata strumentazione GPS in dotazione all'Ufficio Boschi del Parco, la cui accuratezza nei rilievi non era compatibile con le esigenze del lavoro.

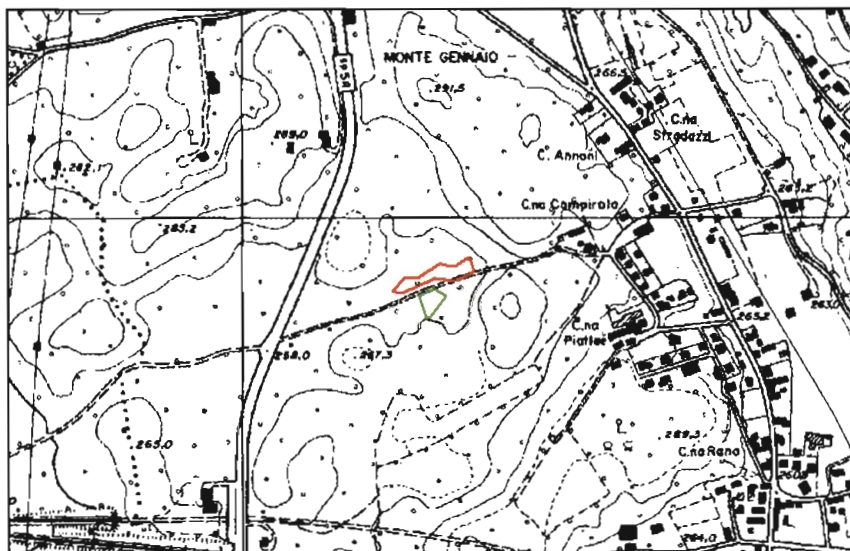
I tecnici perdevano infatti molte ore alla ricerca di un numero adeguato di aree con le caratteristiche richieste in ogni strisciata e i rilievi effettuati spesso erano inutilizzabili a causa della scarsa precisione del ricevitore GPS, che registrava la posizione con errori spesso superiori ai 10m.

L'esperienza nel frattempo maturata dagli esperti forestali e dagli addetti alle elaborazioni dei dati MIVIS, oltre all'acquisizione di un nuovo ricevitore GPS di elevata precisione (Trimble GeoXT, vedi Scheda di Approfondimento C), ha successivamente consentito l'adozione di un nuovo approccio operativo al problema della gestione dei rilievi di campo. Il nuovo metodo ha fornito i risultati attesi, garantendo la necessaria ottimizzazione nell'impiego delle risorse. Le fasi operative che hanno portato all'acquisizione del dato di campo sono le seguenti:

- Il tecnico di Telerilevamento, avvalendosi della propria esperienza nell'impiego dei dati MIVIS per lo studio della vegetazione, ha delimitato, per via fotointerpretativa, aree che sembravano corrispondere ai requisiti necessari per l'impiego di un sito come *training* in fase di classificazione. Tale operazione è stata condotta su composizioni in colori reali o in IR falso colore sulle quali, con opportune tecniche di enfattizzazione (*contrast stretching*), è possibile discriminare diverse specie arboree con una buona accuratezza (Figura 34).



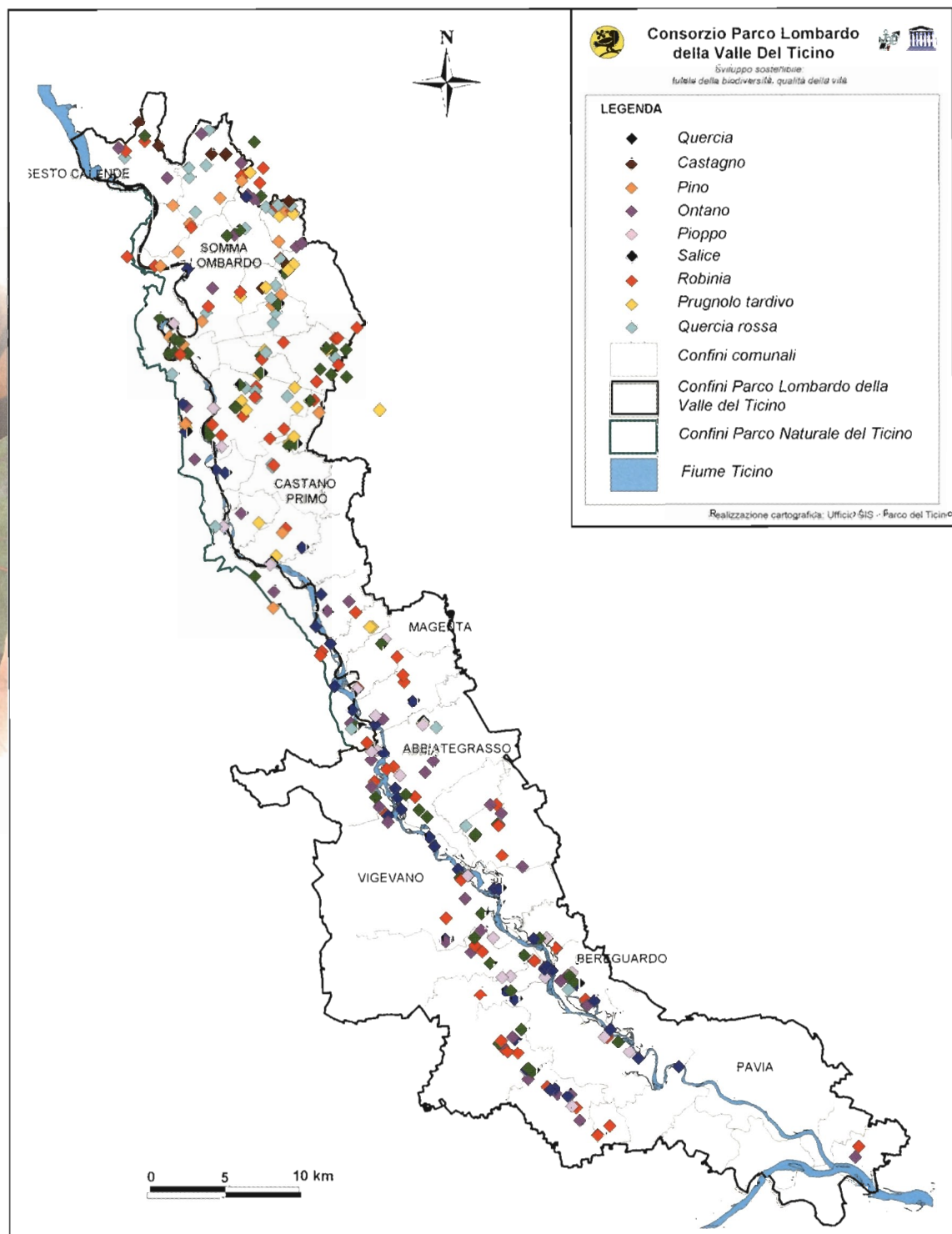
● **Figura 34**
Esempio di immagine a colori reali (a), enfattizzata con opportune tecniche (b), in cui si individuano due aree con caratteristiche di omogeneità (poligoni rosso e verde)



- Le aree individuate per via fotointerpretativa sono state riportate sulla cartografia di riferimento (CTR 1:10000, Figura 35).

● **Figura 35**
Aree individuate per fotointerpretazione, riportate sulla cartografia di riferimento

- Avvalendosi di tale cartografia e con l'ausilio della nuova strumentazione GPS ad alta precisione, i forestali si sono recati presso ciascuna area segnalata e hanno compiuto la propria rilevazione.
- Tali dati sono stati infine comunicati ai tecnici GIS/Telerilevamento ed impiegati nelle operazioni di classificazione. La Figura 36 fornisce una rappresentazione dei siti in corrispondenza dei quali sono stati acquisiti i dati a terra da impiegare in fase di classificazione.

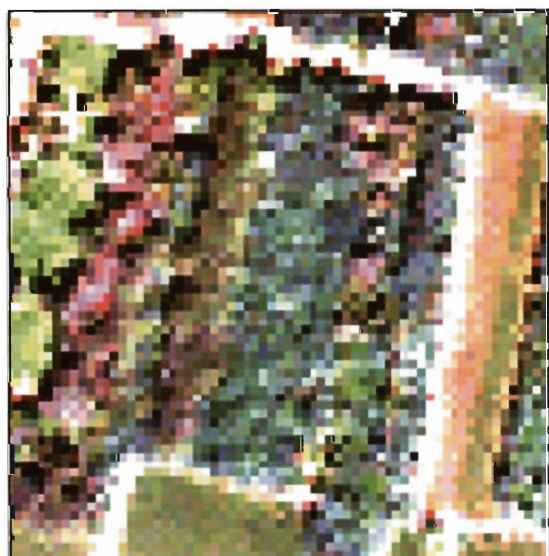


● **Figura 36** Distribuzione spaziale dei rilievi di campo sul territorio del Parco

Le verità a terra campionate sono state utilizzate per elaborare i dati iperspettrali MIVIS (attraverso l'utilizzo del software specifico ENVI) e per creare, successivamente a varie prove di classificazione, le mappe tematiche di interesse.

Durante le prove di classificazione, è emerso che la numerosità e la distribuzione spaziale dei dati di *training* acquisiti con la metodologia appena descritta non era sufficiente. Infatti, a causa della grande estensione dell'area di studio e della forte variabilità delle condizioni ecologiche dei boschi soprattutto lungo l'asse N-S, spesso i dati di *training* sono risultati rappresentativi di un intorno delle condizioni locali in cui sono stati acquisiti e non della generalità di una specie all'interno dell'intero territorio del Parco. Per questo motivo il numero di verità a terra necessario doveva essere ampliato.

Il problema è stato risolto affinando le tecniche di fotointerpretazione degli operatori di Telerilevamento che, grazie all'esperienza maturata, sono stati in grado di interpretare a schermo il dato MIVIS e identificare sulle immagini aree in purezza per le singole specie. Questa operazione ha permesso di infittire per via fotointerpretativa i dati di *training* per ogni specie della legenda identificati al suolo. Si riportano di seguito alcuni esempi:



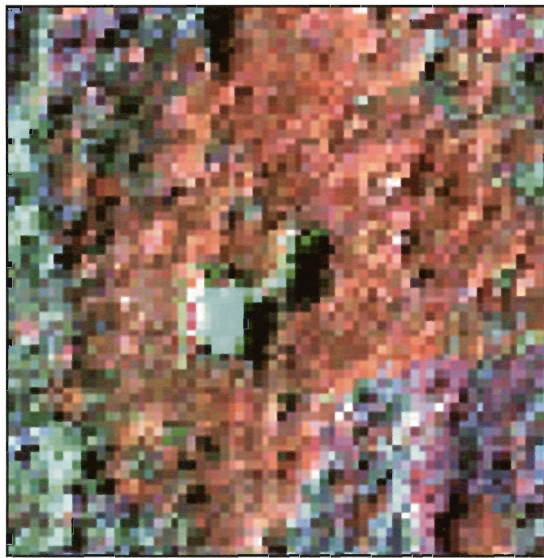
● **Robinia:** su un'immagine contrastata (Figura 37) di una composizione RGB in colori reali, le Robinie tendono ad apparire di colore azzurro, più o meno intenso in funzione dell'età degli alberi, della densità delle chiome e del livello di purezza del sito.

● **Figura 37**
Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a Robinia



● **Prugnolo tardivo:** su un'immagine contrastata (Figura 38) di una composizione RGB in colori reali, il Prugnolo tardivo in purezza risulta di colore verde chiaro con accenni al marrone ed appare per lo più come un tappeto uniforme, a tessitura molto scarsa.

● **Figura 38**
Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a *Prunus serotina*



● Quercia rossa: l'aspetto peculiare di questa specie emerge soprattutto nelle composizioni in falso colore (Figura 39), in cui essa assume un aspetto rosso vivo (tendente talvolta all'arancio, in funzione della densità e delle dimensioni degli alberi) che la contraddistingue dalle altre specie.

● **Figura 39**
Contrast stretching di una composizione in infrarosso falso colore per l'individuazione di aree a Quercia rossa



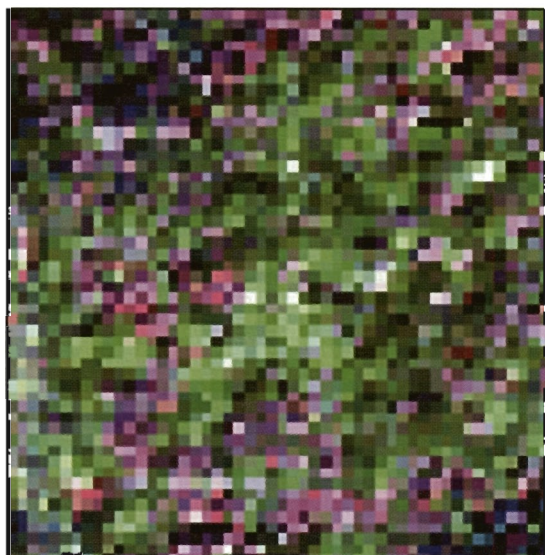
● Farnia: su un'immagine contrastata (Figura 40) di una composizione RGB in colori reali, la Farnia tende ad assumere tinte violacee, con una tessitura più o meno accentuata in funzione delle dimensioni e del numero di chiome.

● **Figura 40**
Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a Farnia



● Ontano: su un'immagine contrastata (Figura 41) di una composizione RGB in colori reali, questa specie risulta di colore verde intenso, con tessitura sempre piuttosto pronunciata.

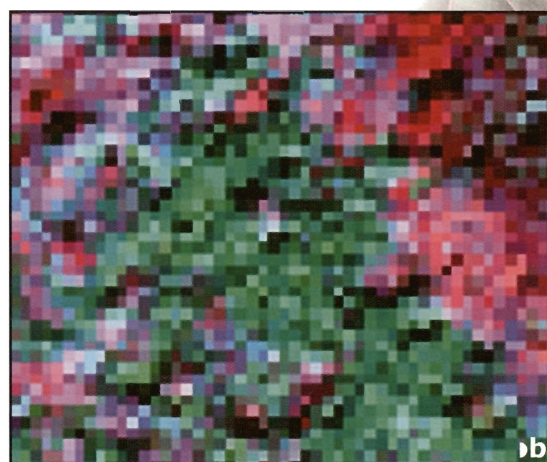
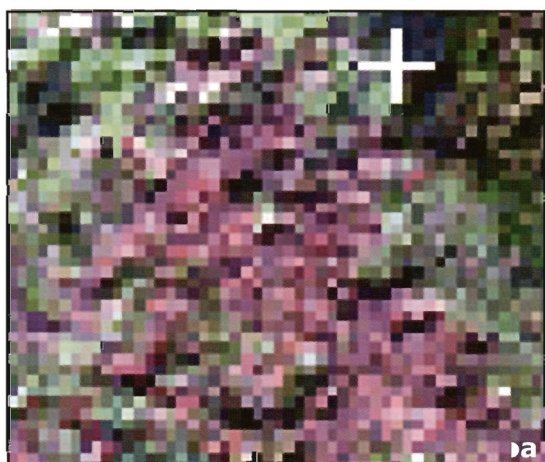
● **Figura 41**
Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a Ontano



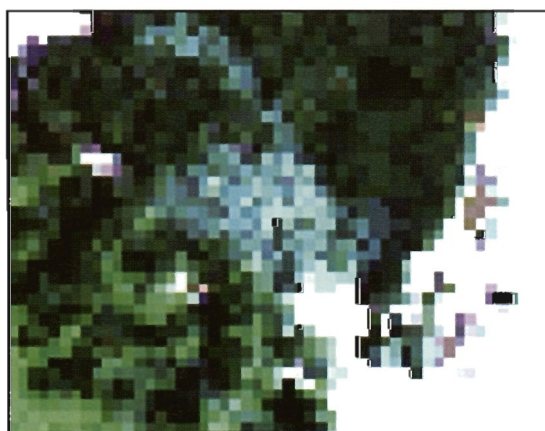
● Castagno: su un'immagine contrastata (Figura 42) di una composizione RGB in colori reali, le aree a Castagno presentano un'alternanza "sale e pepe" di pixel verdi molto chiari ed altri di colore bianco. Il sorvolo è stato infatti realizzato nella stagione di fioritura della specie. Deve inoltre essere sottolineato come il Castagno, nelle aree oggetto di studio, si trovi quasi sempre in associazione con le conifere e, in alcuni casi, con la Farnia.

● **Figura 42**
Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a Castagno

● Pino: si tratta di una specie di facile individuazione per via fotointerpretativa, sia in immagini contrastate di composizioni in colori reali (Figura 43a) che di composizioni in falso colore (Figura 43b). Nelle prime le tipologie di Pino presenti nell'area di studio tendono ad assumere un caratteristico colore rosa, nelle seconde assumono le tonalità del verde.



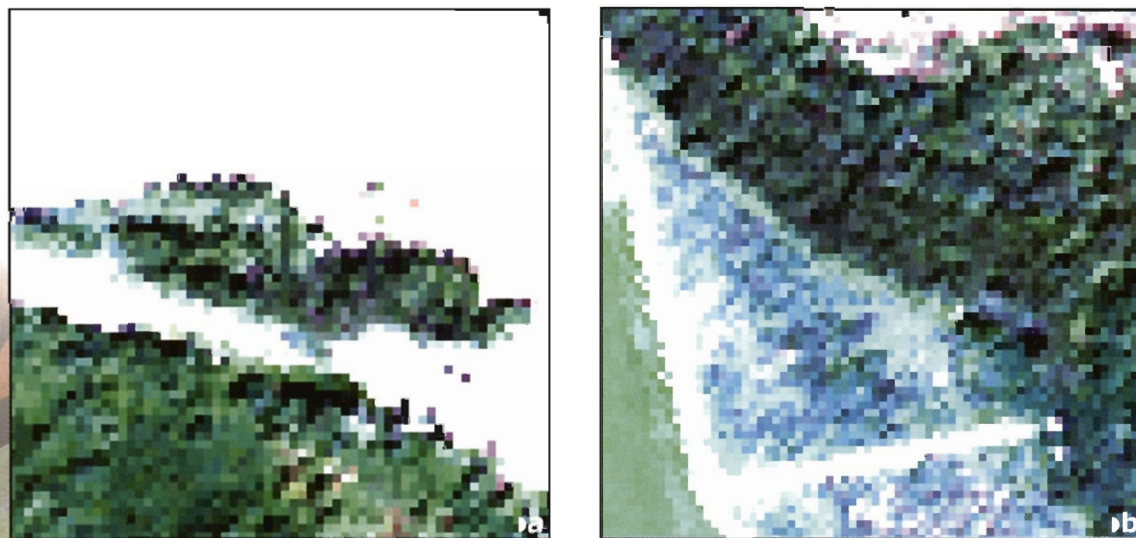
● **Figura 43** Contrast stretching di una composizione in colori reali (a) e in infrarosso falso colore (b) per l'individuazione di aree a Pino



● Salice: su un'immagine contrastata (Figura 44) di una composizione RGB in colori reali, il Salice assume un tipico colore argenteo, che lo distingue in modo molto netto da ogni altra specie indagata, ad eccezione del Pioppo bianco.

● **Figura 44**
Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a Salice

- **Pioppo:** è possibile riconoscerne agevolmente, per via fotointerpretativa, due diverse tipologie:
 - **Pioppo nero:** su un'immagine contrastata (Figura 45a) di una composizione RGB in colori reali, esso appare di colore verde scuro. E' individuabile in modo piuttosto agevole perché all'interno del territorio in esame è per lo più localizzato lungo le aste fluviali, dove si trova frequentemente in associazione con il Salice;
 - **Pioppo bianco:** su un'immagine contrastata (Figura 45b) di una composizione RGB in colori reali, esso assume un caratteristico aspetto bianco. Il comportamento è simile a quello del Salice, che tende però ad assumere tinte argentee.



● **Figura 45** Contrast stretching di una composizione in colori reali per l'individuazione di aree a Pioppo nero (a) e Pioppo bianco (b)

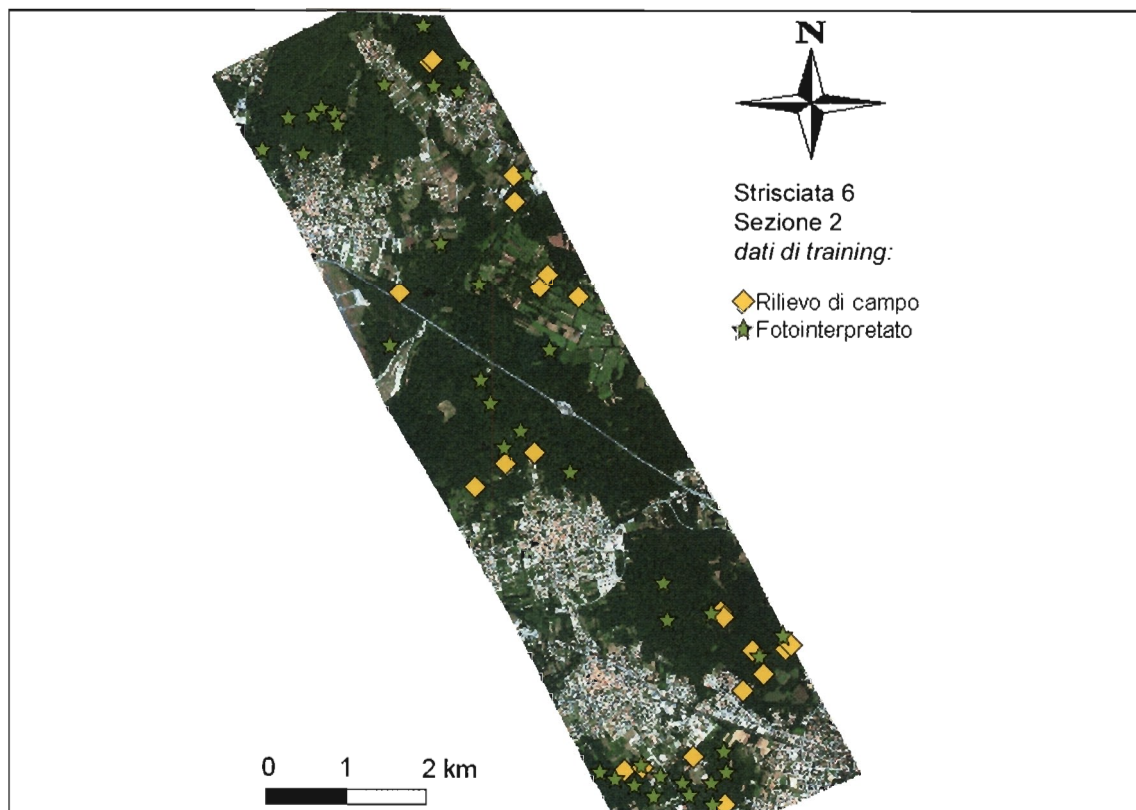
La casistica appena esposta rappresenta il comportamento delle specie indagate in condizioni medie di illuminazione e di ripresa. Discostandosi da tali condizioni, le risposte spettrali di tali tipologie arboree possono allontanarsi molto dal comportamento sopra descritto e trarre in inganno il fotointerprete. Esistono poi una serie di casi in cui, pur riconoscendo al suolo una situazione di omogeneità, non si è in grado di determinare la specie presente. È per questo che è stata condotta una validazione dei risultati ottenuti per fotointerpretazione; un numero rappresentativo di aree individuate con questa tecnica è stato così visionato dai forestali per attestare la bontà del metodo.

Il controllo del dato fotointerpretato è fondamentale per due motivi principali:

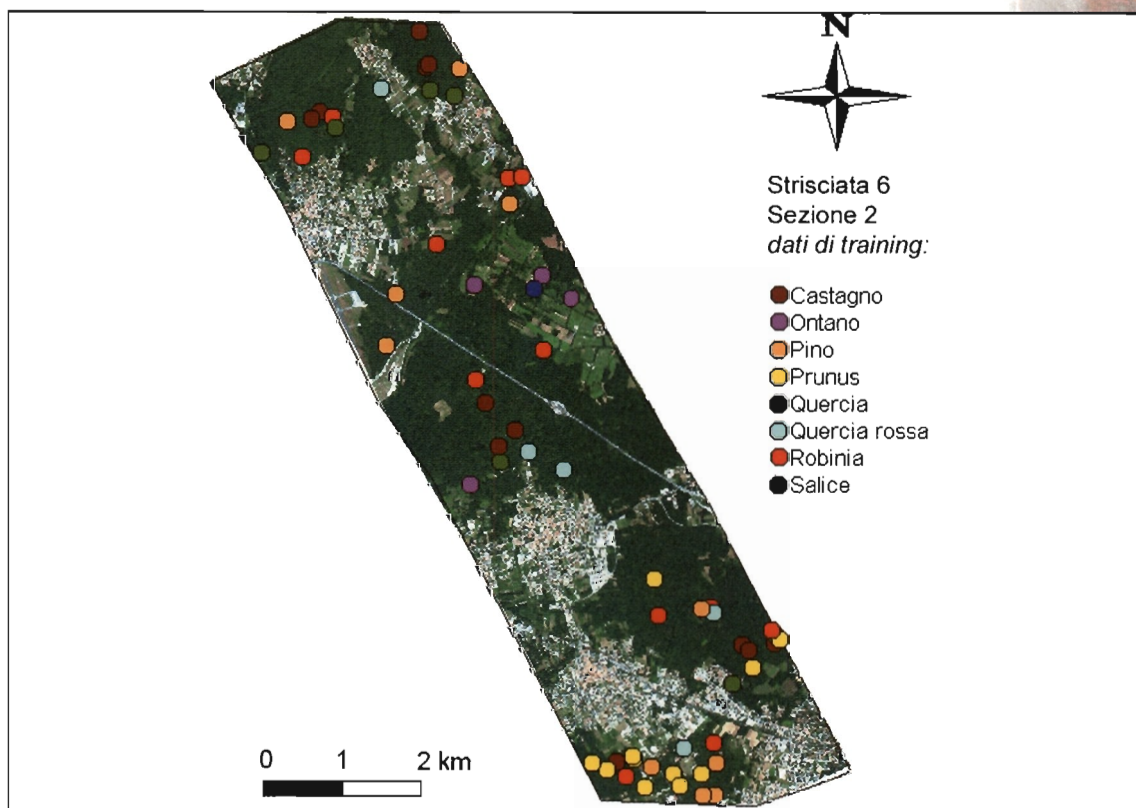
- si evitano successivi errori di misclassificazione, dovuti all'errata interpretazione del dato di *training*;
- si migliora la valutazione dell'accuratezza (vedi Capitolo 4), realizzata esclusivamente per via fotointerpretativa.

In Figura 46 sono rappresentati a titolo di esempio tutti i punti di *training* utilizzati per la classificazione di una sezione della strisciata numero 6, sia quelli rilevati in campo, che quelli ottenuti per fotointerpretazione. In Figura 47 sono invece rappresentati i dati di *training* della stessa sezione divisi per classe.

Il grafico in Figura 48 rappresenta la numerosità dei dati a terra (totali, fotointerpretati e rilevati in campo) per ogni strisciata. I grafici delle Figure da 49 a 57 rappresentano per ogni strisciata la distribuzione dei *training* (totali e fotointerpretati) di ciascuna specie forestale mappata. La strisciata numero 10 è risultata scarsamente coperta da aree boscate e per questo motivo non è stata utilizzata per l'acquisizione dei dati a terra.

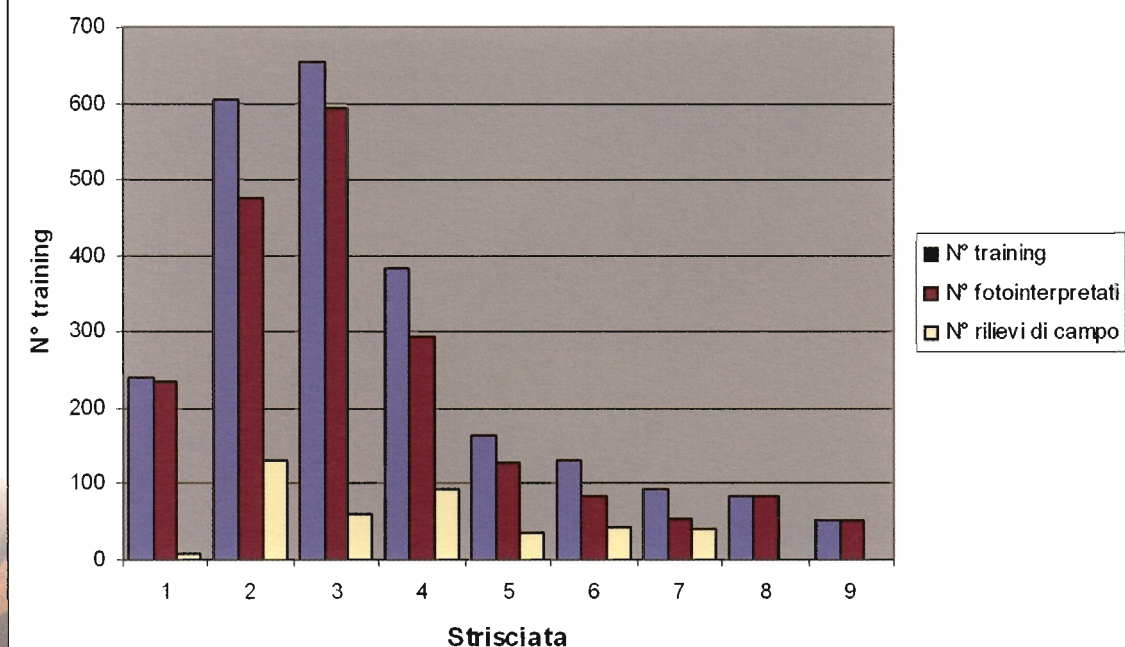


● **Figura 46**
Distribuzione dei dati di *training* della sezione 2 della striscia 6, distinti in rilievi di campo e fotointerpretati



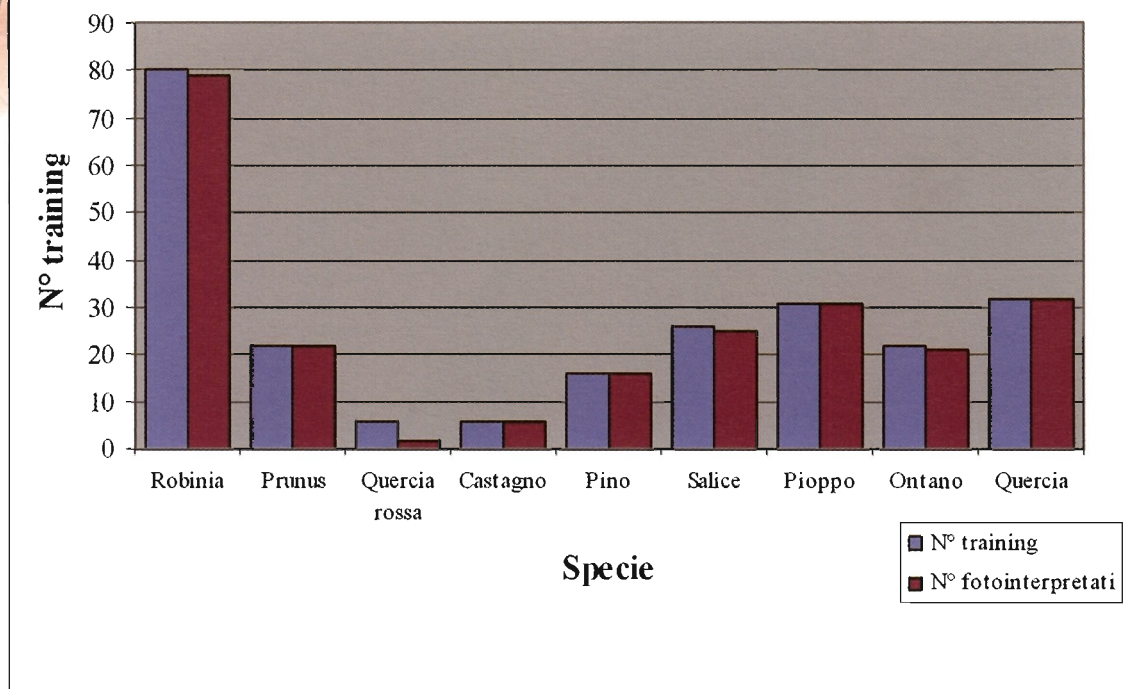
● **Figura 47**
Distribuzione dei dati di *training* della sezione 2 della striscia 6, divisi per classe di appartenenza

Numerosità training

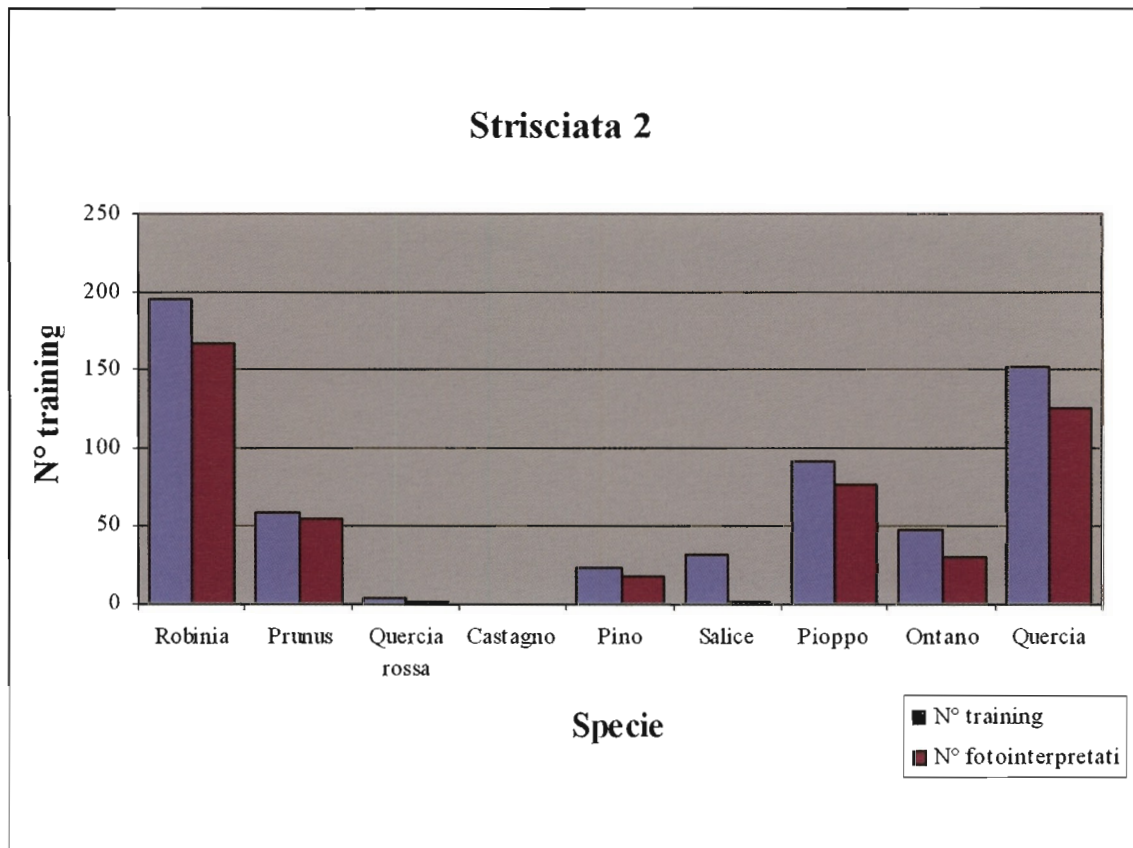


● Figura 48 Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione

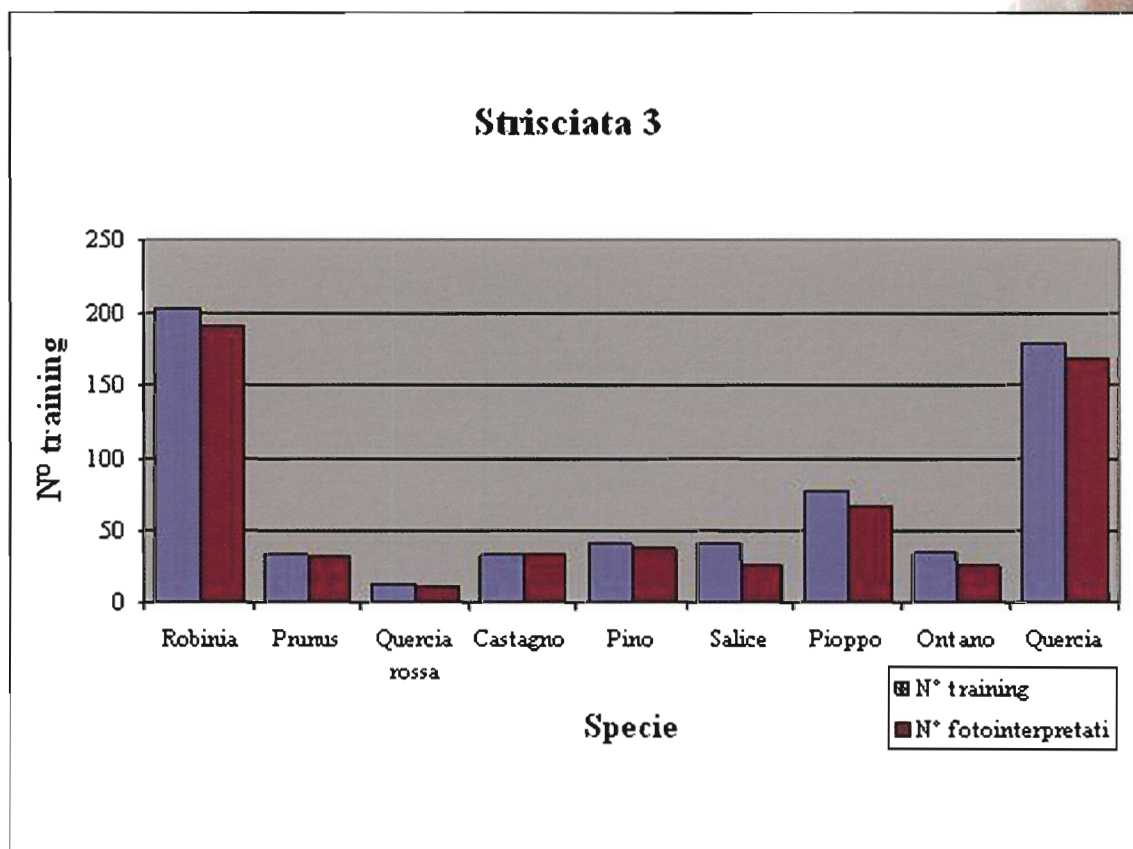
Striscia 1



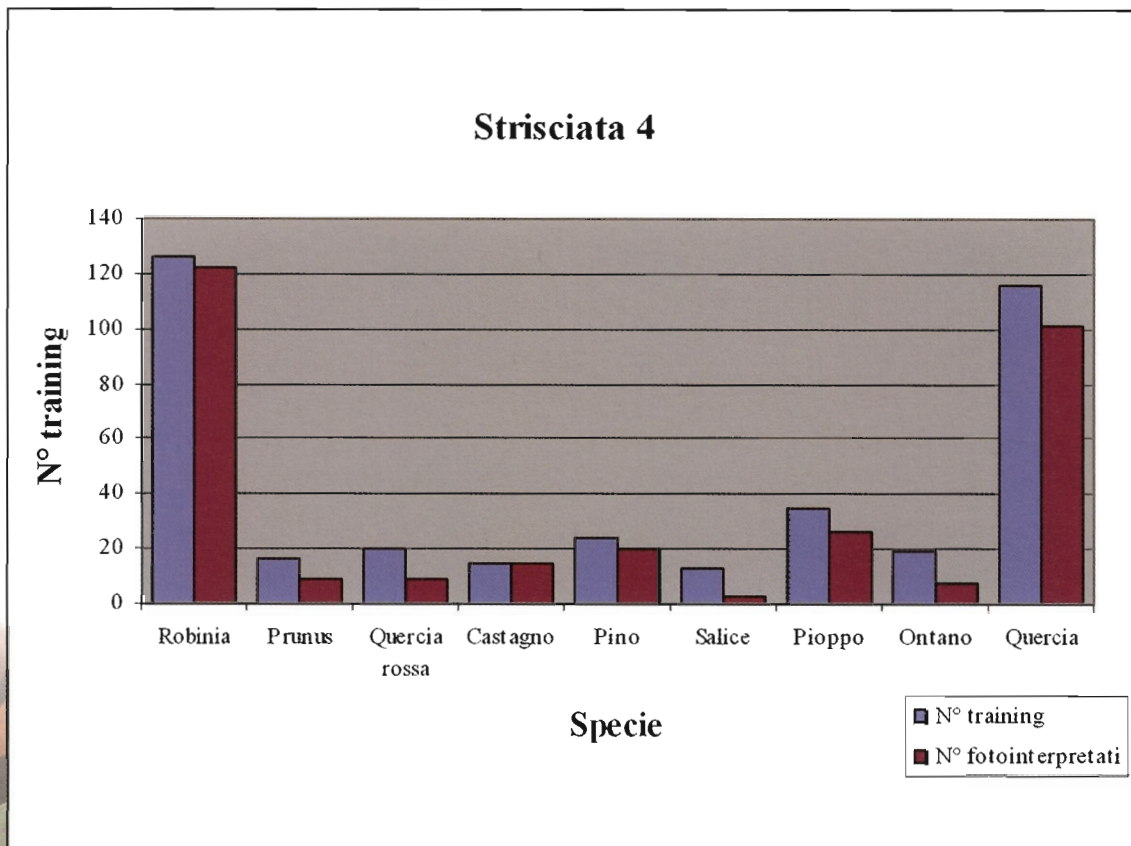
● Figura 49 Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della striscia n.1



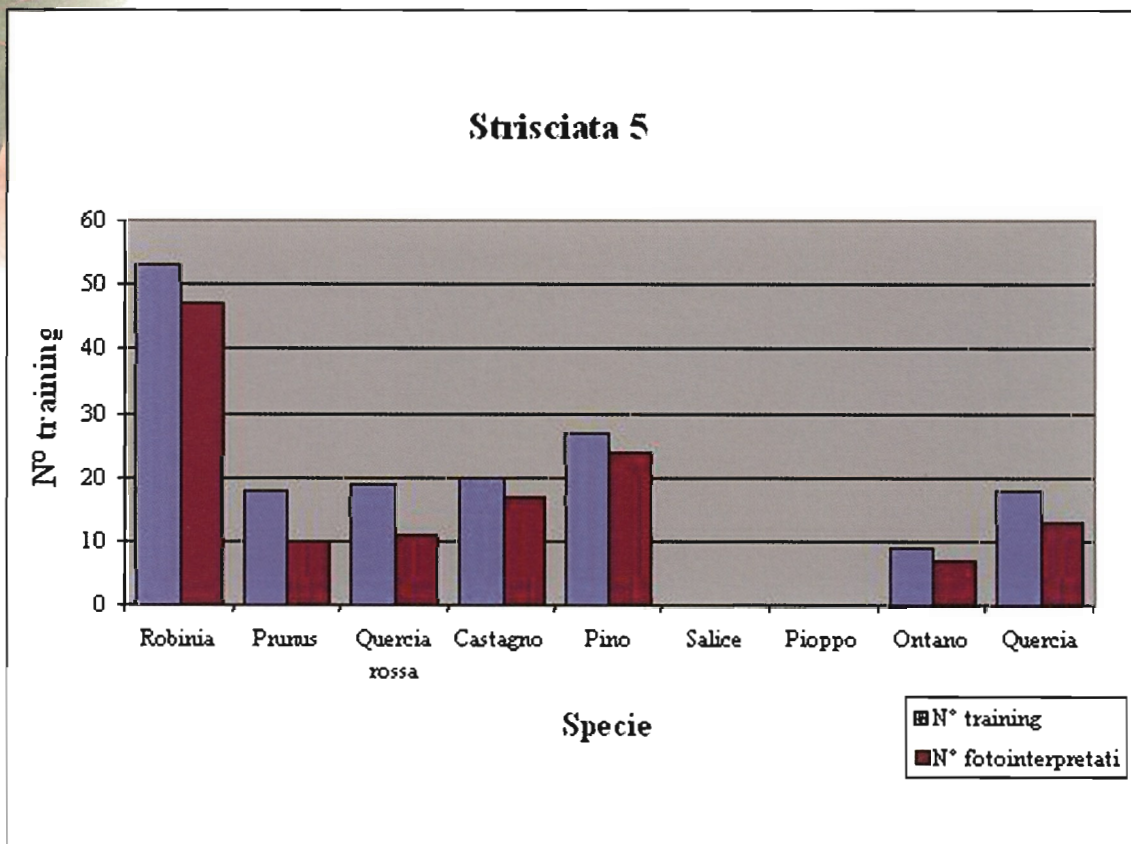
● **Figura 50** Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.2



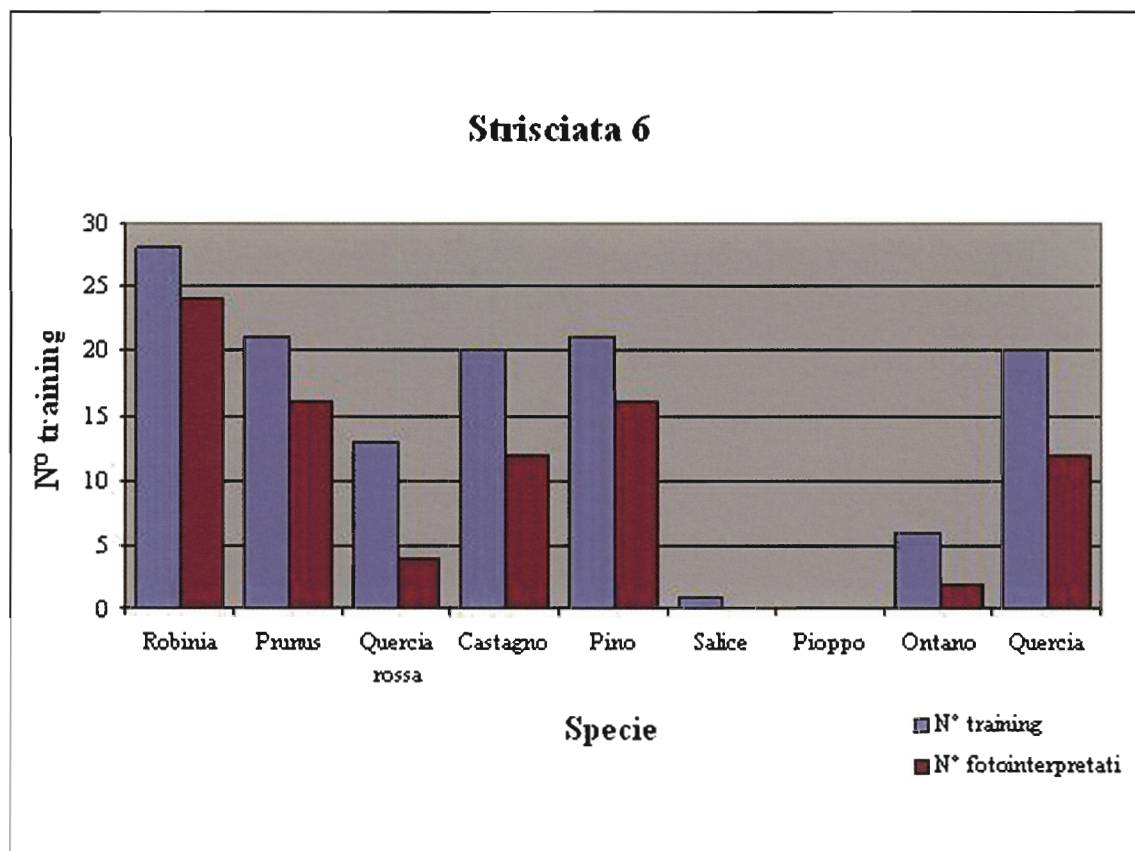
● **Figura 51** Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.3



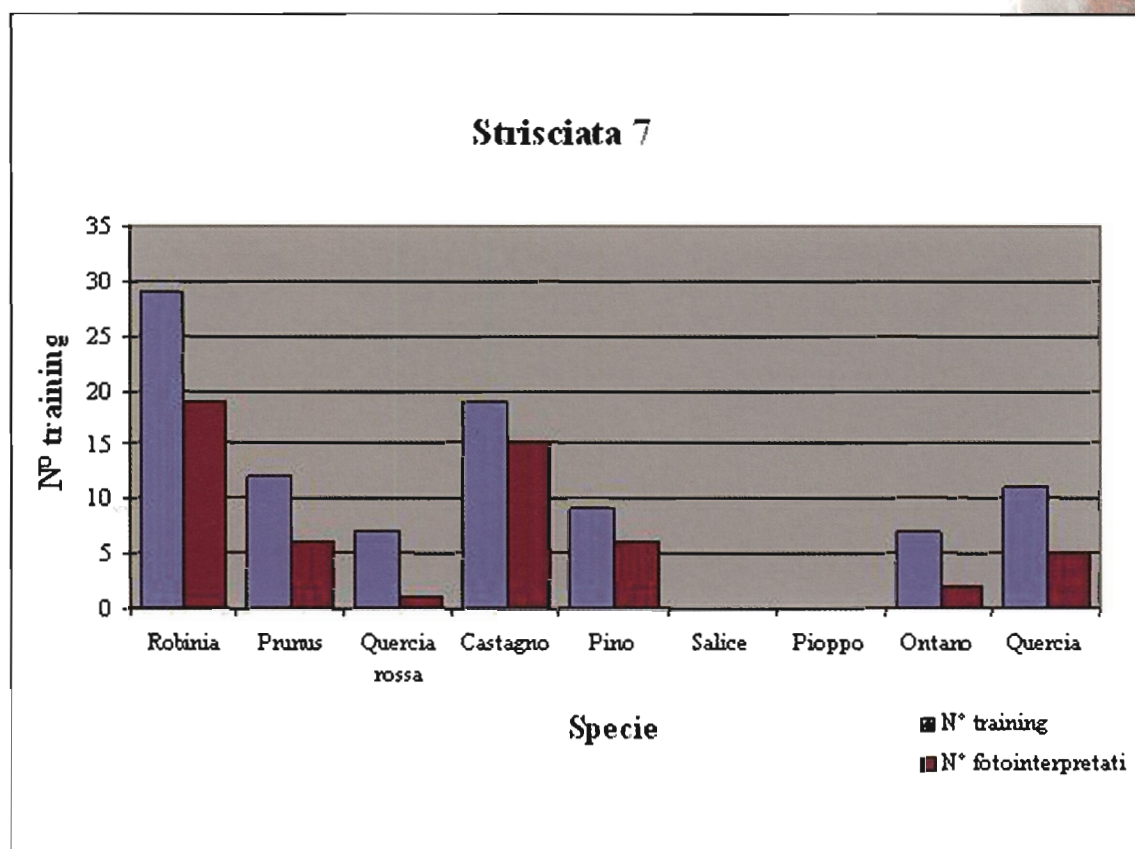
● **Figura 52** Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.4



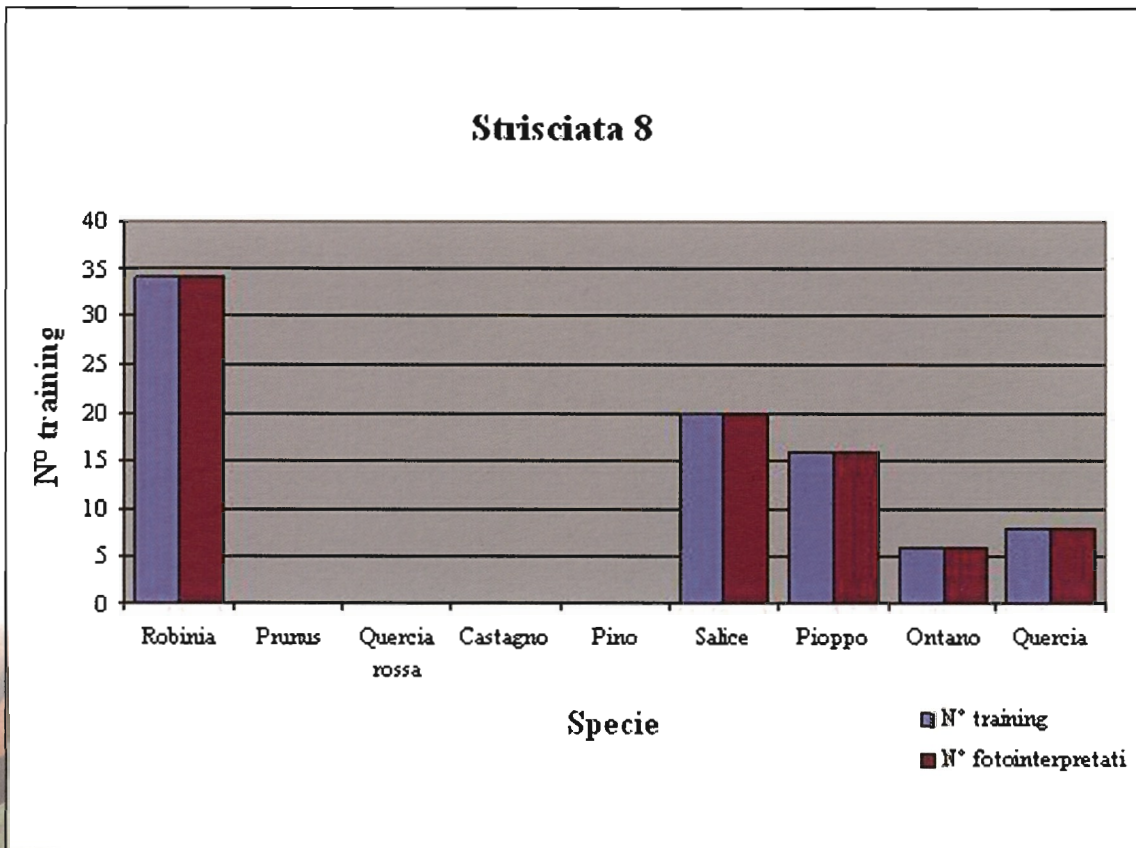
● **Figura 53** Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.5



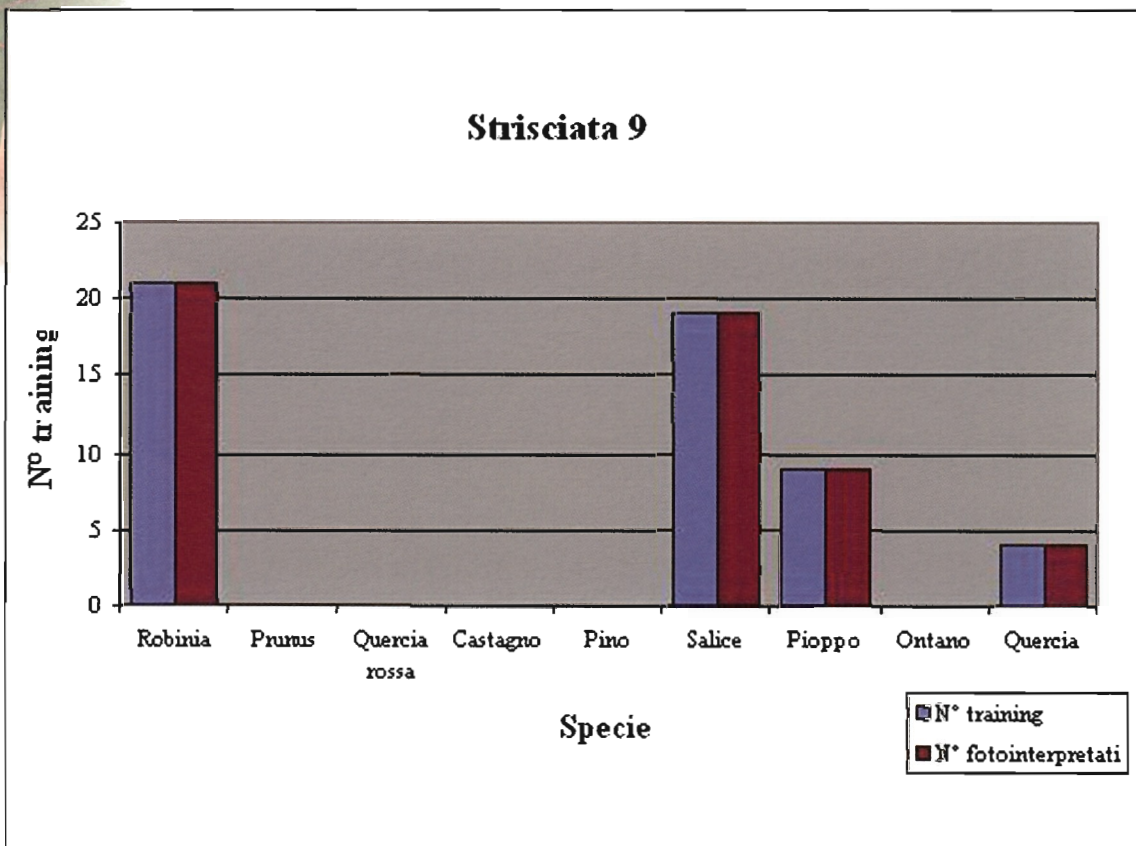
● **Figura 54** Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.6



● **Figura 55** Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.7



● Figura 56 Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.8



● Figura 57 Numerosità dei dati di *training* utilizzati per la classificazione della strisciata n.9

Scheda di approfondimento C: GPS

Il GPS (Global Positioning System, o Sistema Globale di Posizionamento) è un sistema basato su una costellazione di 24 satelliti che orbitano intorno alla terra ad una quota di circa 20200 km. Essi utilizzano una tecnologia in grado di fornire la posizione planimetrica ed altimetrica di un qualunque punto della superficie del pianeta.

Per rilevare la posizione il GPS calcola le distanze tra il punto e un certo numero di satelliti (almeno 4, di posizione nota), utilizzando a questo scopo il tempo di percorrenza di un radio messaggio emesso dai satelliti e captato da un ricevitore posto sul punto di cui si vuole determinare la posizione. L'uso di ricevitori GPS in questo lavoro ha reso immediato l'inserimento dei dati di campionamento in piani informativi all'interno del SIT del Parco, basato sulla Cartografia Tecnica Regionale CTR.

Il modello inizialmente usato per i rilievi è il ricevitore Garmin V (Figura C.1a), che possiede una precisione inferiore ai 15 m, non sufficiente ad identificare con esattezza le aree marcate. Per questo motivo le prime aree di *training* sono state individuate a poca distanza da punti identificabili sulla cartografia di riferimento (CTR). Successivamente è stato possibile ovviare a questo problema utilizzando il ricevitore Trimble GeoXT, che ha una precisione di rilievo inferiore al metro (Figura C.1b).



● **Figura C.1**
Ricevitori GPS Garmin V (a)
e Trimble GeoXT (b)

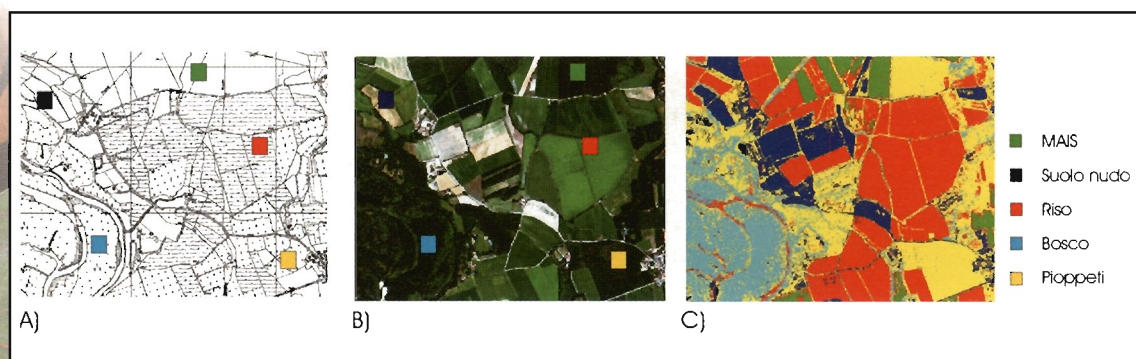


2.5 Elaborazione dei dati

La classificazione automatica

L'analisi numerica di immagini del territorio ha come scopo la descrizione della scena osservata in termini quantitativi, attraverso un prodotto che è detto mappa tematica. L'operazione di classificazione automatica dei dati è un processo di analisi che porta al riconoscimento di modelli di comportamento spettrale a partire da un numero di esempi per le diverse classi in esame.

Vengono così definite una serie di regole da applicare successivamente all'intera immagine; in pratica i *pixel* vengono raggruppati nelle varie classi in base al loro grado di similarità o di associazione con gli elementi delle varie categorie. In questo modo la mappa tematica ottenuta mediante il processo di classificazione è costituita da un insieme di elementi (*pixel*) ai quali è associata, oltre all'informazione di tipo spaziale, anche un'informazione che non è più semplicemente spettrale, ma di tipo semantico che specifica un attributo relativo ad un particolare tema di interesse, detto classe o categoria (Figura 58).



● **Figura 58** Dalla scena del territorio ripresa nelle immagini telerilevate alla mappa tematica

Le fasi di una classificazione

Le tradizionali tecniche di classificazione sono divise in due categorie a seconda che il metodo preveda o meno una fase preliminare, in cui è richiesta la conoscenza di verità al suolo:

- Classificazioni non guidate (*unsupervised*), in cui i *pixel* vengono raggruppati secondo regole predefinite solamente in base ai valori di riflettanza;
- Classificazioni guidate (*supervised*), basate sulla conoscenza di aree campione (*training sample*) rappresentative delle classi di superfici, note e localizzate sull'immagine.

Qualunque sia il tipo di algoritmo scelto, il processo di classificazione può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

- Fase di addestramento (*training*): si selezionano una serie di *pixel* rappresentativi di ciascuna classe di interesse che vengono forniti al classificatore come input per permettere la costruzione delle regole di decisione sulla cui base riconoscere gli elementi di una classe da quelli di un'altra. Questa fase è assente nelle classificazioni *unsupervised*.
- Fase di assegnamento (*allocation*): si assegna un'etichetta relativa ad una classe tematica di interesse secondo le regole di decisione definite in precedenza.
- Valutazione (*testing*): fase in cui si verifica la capacità del classificatore.

Scelta del classificatore

La scelta di un classificatore rispetto ad un'altro è motivata dalle caratteristiche dei dati, dalle finalità del lavoro, dalla tipologia e dalle caratteristiche della risposta spettrale delle classi in legenda e dalla possibilità di fornire, per tipologia e numerosità, un sufficiente numero di *training* all'algoritmo.

Precedenti lavori di classificazione di dati MIVIS in ambito forestale, mostrano l'utilizzo di classificatori quali il *Maximum Likelihood* (MLH) (Bianchi, 1999, Cavalli 2001 Salvatori et al., 2003), gli alberi decisionali (Ferrarini et al., 2001), le reti neurali (Ferrarini et al., 2001; Binagli et al., 2004) o il *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Salvatori et al., 2003) applicato negli studi preliminari condotti dal Parco del Ticino (Boschetti et al., 2002).

L'algoritmo di classificazione SAM discrimina i *pixel* delle immagini telerilevate in funzione del loro comportamento spettrale e associa ogni *pixel* dell'immagine alle diverse classi di legenda sulla base del grado di somiglianza fra la firma spettrale del *pixel* in questione e quella degli spettri di riferimento delle categorie tematiche da individuare. Per l'applicazione di questo algoritmo di classificazione è quindi necessaria la creazione di una libreria spettrale, che raccoglie gli spettri di riferimento di tutte le classi oggetto di indagine.

Il classificatore di massima verosimiglianza (vedi Scheda di Approfondimento D), utilizzato invece nel presente studio, opera assegnando ciascun *pixel* alla classe per cui è maggiore la probabilità condizionale di appartenenza. Essa è definita come la probabilità che, selezionando un *pixel* X della scena, esso appartenga ad una determinata classe C.

In un recente lavoro di comparazione (Salvatori et al., 2003) vengono confrontati i due classificatori MLH e SAM in diverse condizioni di ripresa; entrambi i classificatori sono apparsi idonei anche se tra i due il MLH è risultato migliore. Un interessante lavoro apparso sulla Rivista Italiana di Telerilevamento (Ferrarini et al., 2001), mostra però come vi possano essere condizioni in cui non sono rispettati gli assunti di validità per classificatori statistici quali il MLH. Nel lavoro l'autore indica perciò come alternativa un modello neurale e ne compara le performance con il SAM come classificatore idoneo in quelle condizioni. Ferrarini ricorda come il *Maximum Likelihood* esiga che le classi da identificare posseggano una distribuzione dei dati di tipo normale (Foody, 1995), che l'analisi del discriminante richiede l'omogeneità delle matrici di varianza-covarianza per le varie classi (Dillon, 1984) e una dimensione del campione adeguato al numero di bande utilizzate (Jensen, 1996). Infine una comparazione sistematica dei diversi classificatori è stata effettuata nel recente lavoro di Binagli et al. (2004). I risultati mostrano che in condizioni ottimali il MLH è il migliore classificatore mentre il SAM fornisce performance inferiori agli altri metodi ma non risente di un training set minimale. In queste condizioni, ovvero in presenza di pochi esempi a disposizione per il classificatore (*minimal training*), il MLH diviene inefficace e i metodi alternativi proposti basati sulle reti neurali possono essere un'ottima alternativa per mantenere un'alta accuratezza delle mappe prodotte.

Nelle fasi preliminari del lavoro sono stati testati i due tipi di algoritmi di classificazione *supervised* appena descritti, il SAM e il MLH. L'algoritmo che ha fornito i risultati qualitativamente migliori e che è stato usato per l'elaborazione finale dei dati, è il classificatore di Massima Verosimiglianza.

Scheda di approfondimento D

Basi statistiche del classificatore di massima verosimiglianza⁽¹¹⁾

La classificazione automatica di un'immagine, cioè il processo di decisione per l'assegnazione di un *pixel* a una classe, è un processo di inferenza statistica con associata una certa probabilità di errore. Appare logico richiedere che le decisioni di assegnare un *pixel* ad una classe o ad un'altra siano prese secondo un criterio che minimizzi l'errore su una grande popolazione di dati, quali i *pixel* di una immagine (una modesta immagine di 500 x 500 *pixel* costituisce una popolazione di ben 250.000 osservazioni!). Nei problemi decisionali, quali appunto possono essere considerati i problemi di classificazione automatica, si è interessati all'individuazione della migliore ipotesi h all'interno di un insieme H di ipotesi plausibili che si presentano ($h \in H$) date un certo numero di osservazioni D . L'ipotesi migliore o più verosimile, o, detta in termini statistici, l'ipotesi più probabile a posteriori, può essere determinata usando il teorema di Bayes. Esso si basa sull'assunzione che le quantità in gioco siano governate da combinazioni probabilistiche diverse e che si possano prendere decisioni o compiere scelte ottimali ragionando congiuntamente su queste probabilità p e sui dati osservati, secondo la relazione:

$$\max_{h \in H} p(h|D) = \max_{h \in H} \frac{p(D|h)p(h)}{p(D)} \quad \text{Teorema di Bayes}$$

dove:

- $p(h|D)$ = probabilità a posteriori,
- $p(D|h)$ = probabilità condizionale,
- $p(h)$ = probabilità a priori,
- $p(D)$ = fattore di normalizzazione.

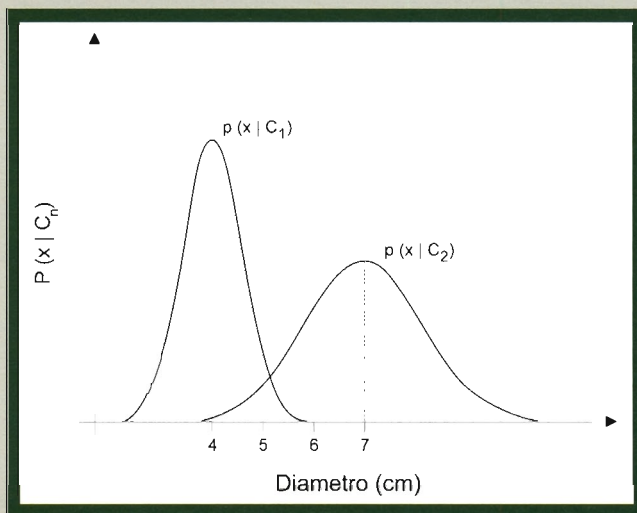
Per meglio comprendere il significato di questa relazione, si consideri, ad esempio, un sistema automatico che debba selezionare fra due tipi di frutta, albicocche e mele, che scorrono su un nastro trasportatore sulla base del loro diametro. Formalizzando si ha a che fare con un problema di decisione a due classi, albicocche e mele, e una proprietà, il diametro, che viene indicato come la caratteristica x .

Si supponga di conoscere la funzione di distribuzione di probabilità (fdp) delle misure del diametro delle albicocche e che sia approssimativamente una gaussiana o normale, con tipica forma a campana, con media pari a 4 cm e deviazione standard di 8 mm. Se non si conosce la fdp delle mele è possibile, mediante la misura del diametro di un certo numero di mele e la costruzione del relativo istogramma di frequenza, considerare tale istogramma come una stima della corrispondente fdp. I termini di frontiera, collocati all'intersezione delle due funzioni di distribuzione, rappresentano i vari gradi di possibilità di errore nel processo di classificazione.

¹¹ Testo tratto da "Telea Appunti e spunti di Telerilevamento, elementi di telerilevamento per gli insegnanti delle scuole medie e i responsabili CREA della Regione Lombardia"; Ed. CNR e Regione Lombardia, a cura di Eugenio Zilioli, 2000.

Si definiscono tre tipi di probabilità, a seconda delle premesse e delle condizioni:

1. *Probabilità a priori*. Se si conosce che generalmente il nastro trasporta un numero di albicocche doppio delle mele, si può affermare che le due classi hanno probabilità a priori $p(C_1)=2/3$ e $p(C_2)=1/3$. Esse rappresentano la nostra conoscenza circa un oggetto prima che venga eseguita alcuna misura su di esso. Queste relazioni dicono semplicemente che se si prende un oggetto senza misurarlo, è due volte più facile o, meglio, più verosimile che sia albicocca (classe C_1) piuttosto che mela (classe C_2).
2. *Probabilità condizionali*. Indichiamo con probabilità condizionale del diametro delle albicocche l'espressione $p(x|C_1)$ che indica la probabilità che il diametro valga x , dato che l'oggetto appartiene alla classe C_1 . Analogamente si ha $p(x|C_2)$ per la classe delle mele (Figura C.1).



● **Figura D.1**
Distribuzioni di probabilità condizionali delle due classi di frutta: le albicocche (C_1) e le mele (C_2)

3. *Probabilità a posteriori e Teorema di Bayes*. Prima di eseguire una misura del diametro di un oggetto, la nostra conoscenza si limita alla sua probabilità a priori, $2/3$ o $1/3$. Dopo la misura, dovremmo essere in grado di usare tale osservazione assieme alle probabilità condizionali per migliorare la nostra conoscenza sull'appartenenza a una classe. Nota la misura del diametro, la cosiddetta probabilità a posteriori che l'oggetto selezionato, e di cui si conosce la misura x , appartenga alla classe C_i è data del teorema di Bayes:

$$p(C_i|x) = \frac{p(x|C_i)p(C_i)}{p(x)}$$

dove il termine a denominatore è solamente un fattore di normalizzazione richiesto affinché la somma di tutte le probabilità a posteriori sia uguale a 1. Nel nostro caso, considerando due sole classi, si avrà:

$$p(x) = \sum_{i=1}^2 p(x|C_i)p(C_i)$$

Il teorema di Bayes ci permette quindi di calcolare la probabilità che un oggetto misurato appartenga a una certa classe, sulla base delle probabilità a priori di appartenenza ad una classe, alle distribuzioni di probabilità condizionali e alla misura x .

L'applicazione del teorema di Bayes produce un'informazione sulla base della quale possiamo decidere di assegnare ogni oggetto alla classe più verosimile o più probabile. Nel nostro esempio, ad un oggetto viene assegnata l'etichetta "albicocca" (classe C_1) se

$$p(C_1|x) \geq p(C_2|x)$$

e l'etichetta "mela" altrimenti.

Sostituendo quest'ultima nel teorema di Bayes ed eliminando il denominatore comune si ottiene:

$$p(C_1|x)p(C_1) \geq p(C_2|x)p(C_2)$$

come condizione per assegnare alla classe C1 un oggetto con diametro x.

Un classificatore che si basa su questa regola di decisione è detto classificatore a massima verosimiglianza.

Se invece di eseguire su un oggetto una singola misura, il diametro, noi consideriamo altre caratteristiche da misurare quali ad esempio il peso, il colore ecc., o, in generale, se misuriamo k caratteristiche diverse, quali le k bande spettrali di un'immagine, abbiamo un vettore di misure $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ e ogni *pixel* corrisponde ad un punto nello spazio a k dimensioni delle caratteristiche.

Si supponga anche che non ci siano solo due classi, ma più in generale ci siano m classi. Sotto queste condizioni, preso un *pixel* con associato un vettore x di misure radiometriche $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ la probabilità a posteriori che esso appartenga alla classe Ci è data da:

$$p(C_i|x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_k|C_i)p(C_i)}{\sum_{i=1}^m p(x_1, x_2, \dots, x_k|C_i)p(C_i)}$$

o in modo sintetico:

$$P(C_i|x) = \frac{P(x|C_i)P(C_i)}{p(x)}$$

dove:

- $p(C_i|x)$ = probabilità a posteriori
- $p(x|C_i)$ = probabilità condizionale delle classi Ci o fdp
- $p(C_i)$ = probabilità a priori
- $p(x)$ = fattore di normalizzazione

Bande utilizzate

In accordo con la letteratura scientifica sulla classificazione iperspettrale, e da quanto emerso dall'analisi del potere discriminante (*feature selection*, vedi Paragrafo 2.3), le bande nella regione del *red edge* si sono rivelate particolarmente adatte alla discriminazione fra le diverse specie arboree (Zarco and Miller, 1999). Di conseguenza si è scelto di utilizzare, come ingresso del classificatore a massima verosimiglianza, le bande 12, 14, 16, normalizzate rispetto alla banda 3 (blu). Tale metodo di classificazione, pur utilizzando un numero limitato di bande MIVIS, ne sfrutta appieno l'alta risoluzione spettrale, che permette di discriminare la riflettanza delle diverse specie arboree in una regione spettrale molto limitata ed altamente discriminante

La Figura 59 permette di vedere come, nelle bande utilizzate, il contrasto fra le diverse specie arboree sia molto evidente.



● **Figura 59**
Variazione del segnale ed enfattizzazione del contrasto nelle bande normalizzate nella zona del *red edge*: da sinistra, banda 12, banda 14, e banda 16. Le tre bande sono state normalizzate rispetto alla banda 3 (blu). Le tre bande, posizionate nella regione del '*red edge*', permettono di discriminare le diverse specie arboree

2.6 Procedura di creazione delle mappe

Prima di procedere con l'elaborazione delle immagini è stato necessario suddividere le strisciate in sezioni. Questo accorgimento è stato adottato a causa delle dimensioni di ciascuna strisciata geometricamente corretta, variabili tra i 2,3 e i 9 Gigabyte ciascuna, per un totale di circa 50 Gigabyte.

Fase I: Classificazione automatica

Per ciascuna sezione è stata seguita la seguente procedura:



● **Figura 60** Area rilevata nel corso di un rilievo di campo e poi identificata sull'immagine MIVIS

- Sovrapposizione, sulle immagini tele-rilevate, dei dati geografici relativi alle verità a terra per l'individuazione delle specie in purezza, ricavate dai rilievi di campo e per fotointerpretazione, come descritto nel Paragrafo 2.4 (Figura 60). È importante precisare che i *training* utilizzati sono quelli che ricadono all'interno della sezione considerata e che quindi meglio rappresentano le caratteristiche locali di vegetazione, di ripresa, e di illuminazione.



● **Figura 61** Identificazione dei *pixel* da utilizzare nell'algoritmo di classificazione

● Identificazione, all'interno dell'area in purezza, di un set di *pixel* che rappresenta in modo appropriato il comportamento spettrale tipico della specie arborea (Figura 61).

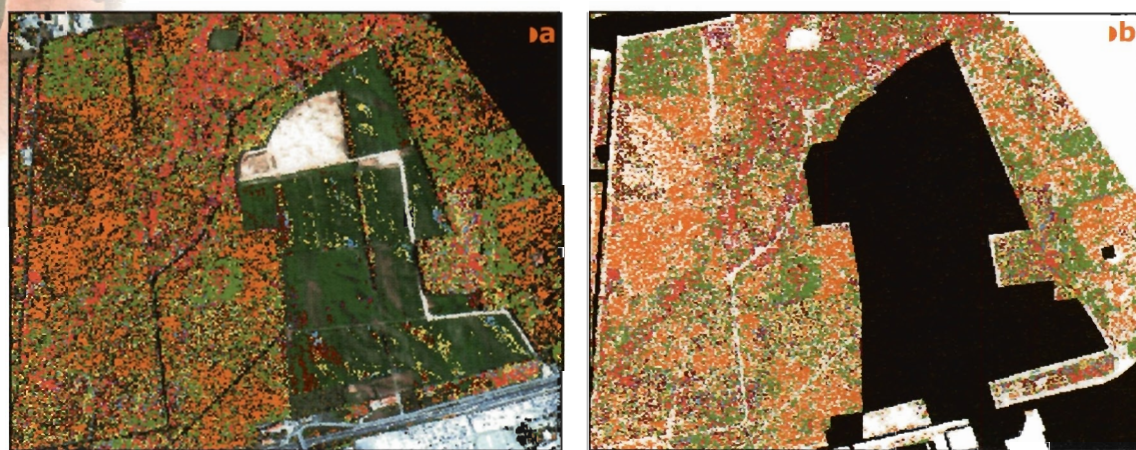
È di fondamentale importanza identificare aree in chioma ed evitare di scegliere *pixel* in ombra o zone a scarsa copertura vegetale, che potrebbero essere influenzate dal sottobosco o dal suolo nudo sottostante. A tale scopo sono state utilizzate tecniche di enfattizzazione analoghe a quelle utilizzate durante la fase di fotointerpretazione dei dati.

● Applicazione dell'algoritmo di classificazione *Maximum Likelihood* sulle immagini telerilevate (vedi Paragrafo 2.5), utilizzando i *pixel* di *training* identificati.

Fase II: Post-classificazione

In questa fase si sono seguite operazioni GIS volte al perfezionamento della mappa e all'eliminazione di alcuni errori. In particolare:

● È stata applicata una maschera alle immagini classificate per eliminare dalla mappa le aree non ricoperte da vegetazione naturale, ma assegnate ad una classe dall'algoritmo classificatore (ad esempio pioppeti da impianto, aree ricoperte da arbusti, ecc...). Per identificare le sole aree a vegetazione naturale è stata utilizzata la Carta d'Uso del Suolo (Figura 62).



● **Figura 62** Applicazione delle maschere sulle immagini. (a) Classificazione non mascherata (sono stati assegnati ad una classe anche alcuni *pixel* di prato). (b) Classificazione mascherata

● È stato necessario correggere manualmente locali fenomeni di misclassificazione, particolarmente evidenti per le specie Salice e Pino:

● a causa della struttura arborea caratterizzata da fogliame rado e dalla loro abituale presenza su zone di greto e isole fluviali, i Salici assumono un comportamento spettrale spesso difficilmente discriminabile da quello delle superfici erbacee;

- i Pini sono invece caratterizzati da una bassa riflettanza nell’Infrarosso che può determinare una misclassificazione con aree a vegetazione in ombra o zone scarsamente vegetate, come le radure xerofile che caratterizzano alcune zone del territorio del Parco.

Per ovviare a questi inconvenienti è stato necessario ricorrere ad alcune operazioni di post-classificazione su piattaforma GIS. Si sono, in un primo momento, individuate le zone a potenziale presenza delle due specie e sono stati poi eliminati tutti i *pixel* a Salice o Pino che ricadevano al di fuori delle aree ad idoneità così delimitate e che, con buona probabilità, potevano essere considerati errori dovuti a rumore.

Fase III: Mosaicatura delle immagini

Dopo aver prodotto e corretto le classificazioni per ogni singola sezione, sono state mosaicate utilizzando il programma ENVI. In un primo momento si sono formate le singole strisciate, in seguito si è prodotta un’unica mappa comprensiva di tutto il territorio ripreso.

Le strisciate, corrispondenti alle linee di volo, non sono perfettamente adiacenti, ma si sovrappongono parzialmente una sull’altra. Nelle zone di sovrapposizione si hanno quindi due immagini che riprendono la stessa scena con geometrie di ripresa e di illuminazione diverse e questo può causare delle leggere differenze tra le due classificazioni (Figura 63).

È necessario scegliere una delle due, determinando una netta linea di confine tra le strisciate. Per determinare questa linea si è adottata la seguente procedura:

- Confronto degli angoli con cui è stata ripresa la scena dalle due immagini, attraverso il programma ENVI. Si è determinata una linea (più o meno marcata) che dividesse la zona di sovrapposizione in base al miglior angolo di ripresa delle due strisciate.



● **Figura 63**
Esempio di una scena ripresa da angolazioni diverse (strisciata 3 a sinistra, strisciata 4 a destra): si osservano evidenti variazioni legate alla geometria di ripresa

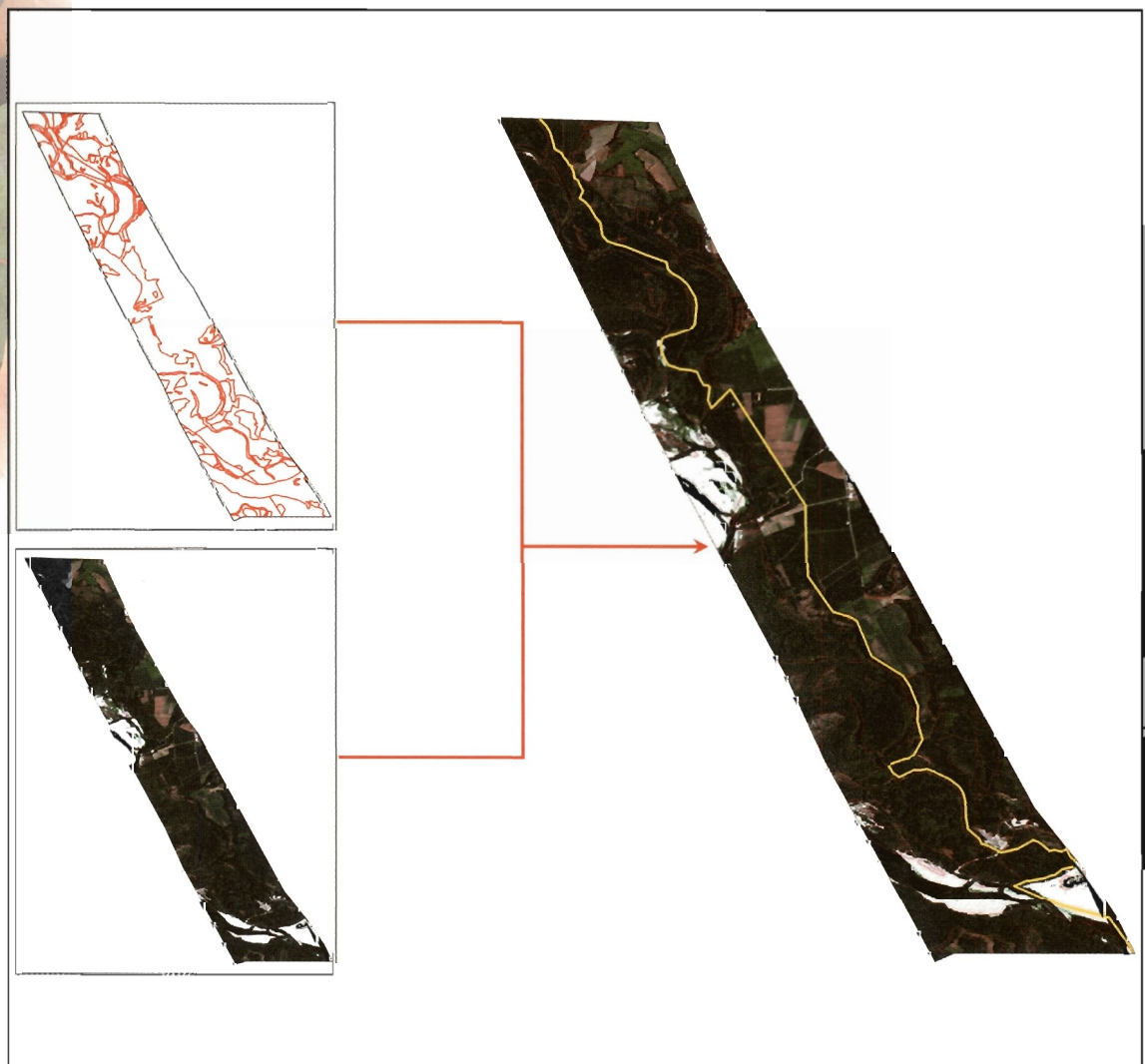
- Analisi GIS dei poligoni della Carta d'Uso del Suolo. Utilizzando la sola linea dei migliori angoli di ripresa si corre il rischio di tagliare in modo netto alcune aree di bosco omogenee. Anche se in queste aree gli angoli di ripresa ottimali appartengono a strisciate diverse, è preferibile assegnare l'intera zona a una sola delle due classificazioni. In questo modo si evitano discontinuità in aree con caratteristiche omogenee. La linea di confine tra strisciate deve tenere conto di queste caratteristiche e, per questo, si è integrata la linea degli angoli con l'andamento dei poligoni rappresentati nella Carta d'Uso del Suolo, che individuano particelle uniche di bosco (Figura 64).

Il risultato finale della procedura di mosaicatura è la mappa delle specie scelte in legenda generale di tutto il territorio del Parco Ticino.

Fase IV: Accorpamento delle specie

Come è stato spiegato nel Paragrafo 2.1, si è scelto eseguire alcuni accorpamenti tra le specie. In particolare si sono unite:

- le specie esotiche Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa, a formare la classe delle "Latifoglie esotiche infestanti";
- le specie Quercia e Carpino, a formare la classe "Querco - Carpineto"

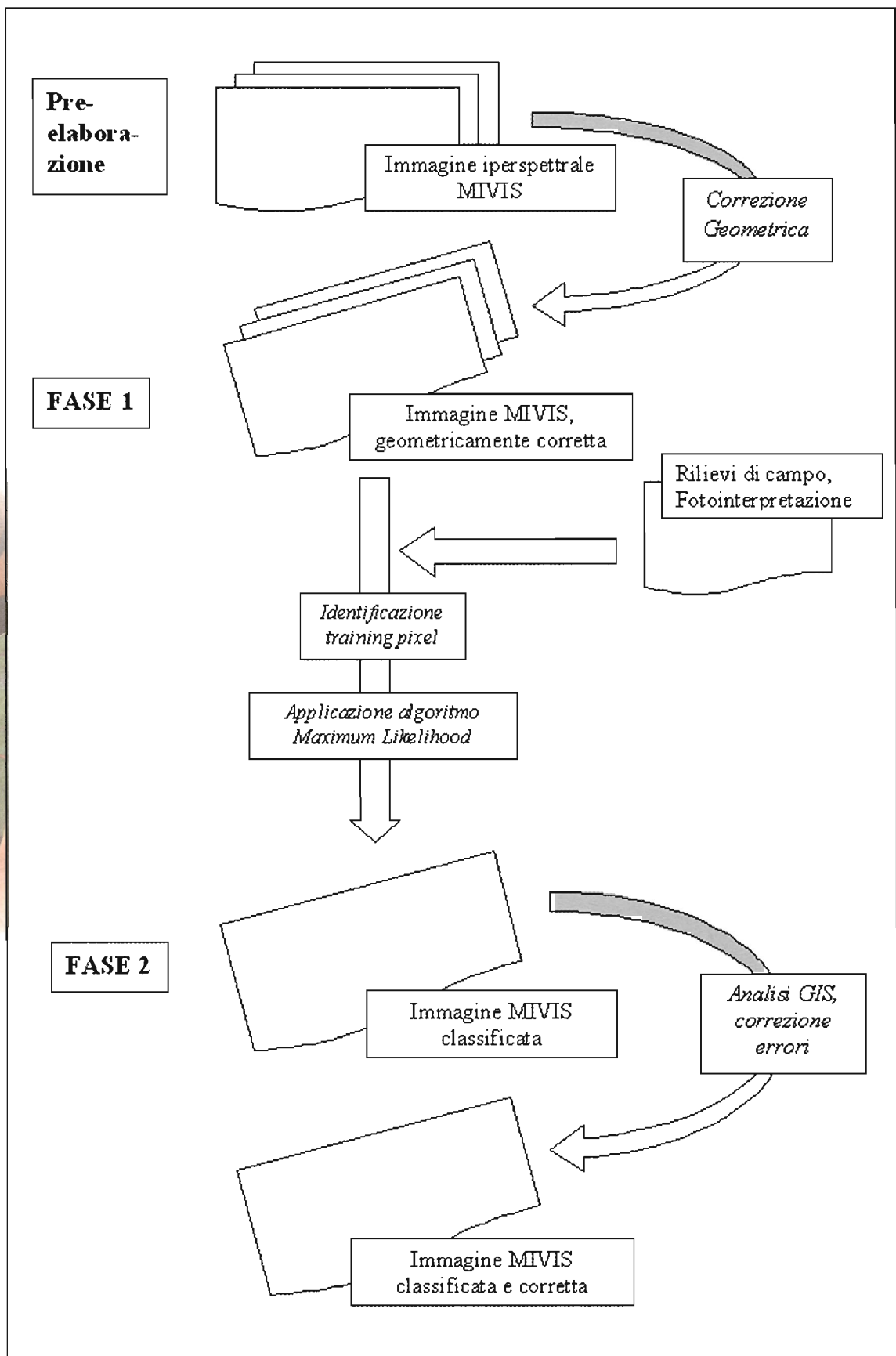


● **Figura 64** Individuazione della linea di confine tra due sezioni delle strisciate 3 e 4

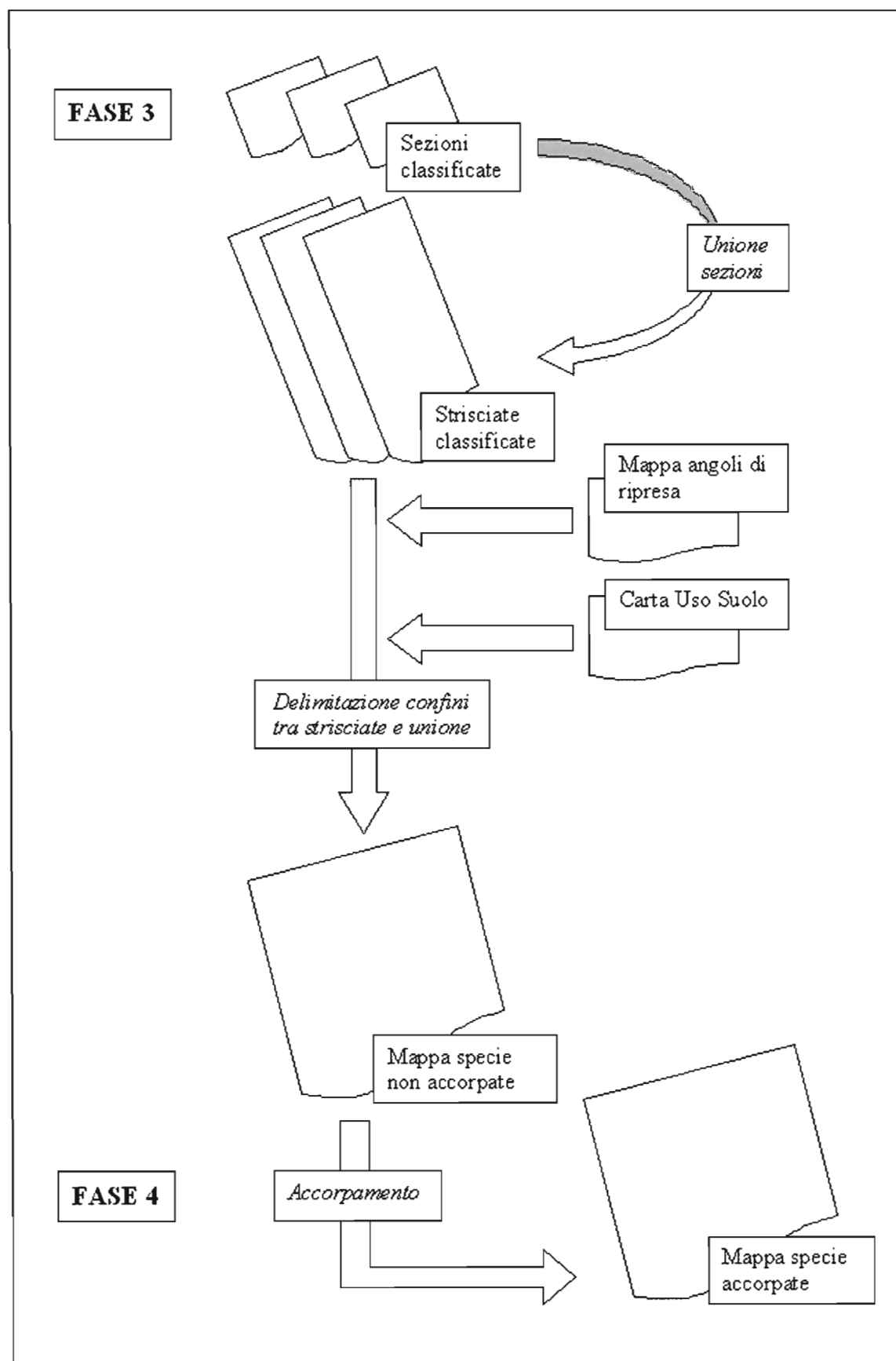
Si ricorda che tale accorgimento è stato adottato per meglio identificare e differenziare, alla scala prescelta per la restituzione cartografica delle mappe finali (1:25000), le zone di maggior degrado ambientale, invase dalle latifoglie esotiche infestanti (Prugnolo tardivo, Quercia rossa e Robinia), da quelle specie che rappresentano la massima espressione della fitocenosi dei boschi del Parco (Quercia - Carpineto, Boschi di Conifere e Castagno, Boschi di Pioppo, Saliceti e Ontaneti).

I diagrammi nelle Figure 65 e 66 rappresentano schematicamente le fasi appena descritte.





● **Figura 65**
 Rappresentazione grafica della procedura di classificazione delle immagini,
 dalla pre-elaborazione alla fase 2



● **Figura 66**
 Rappresentazione grafica delle fasi 3 e 4 della procedura di classificazione delle immagini

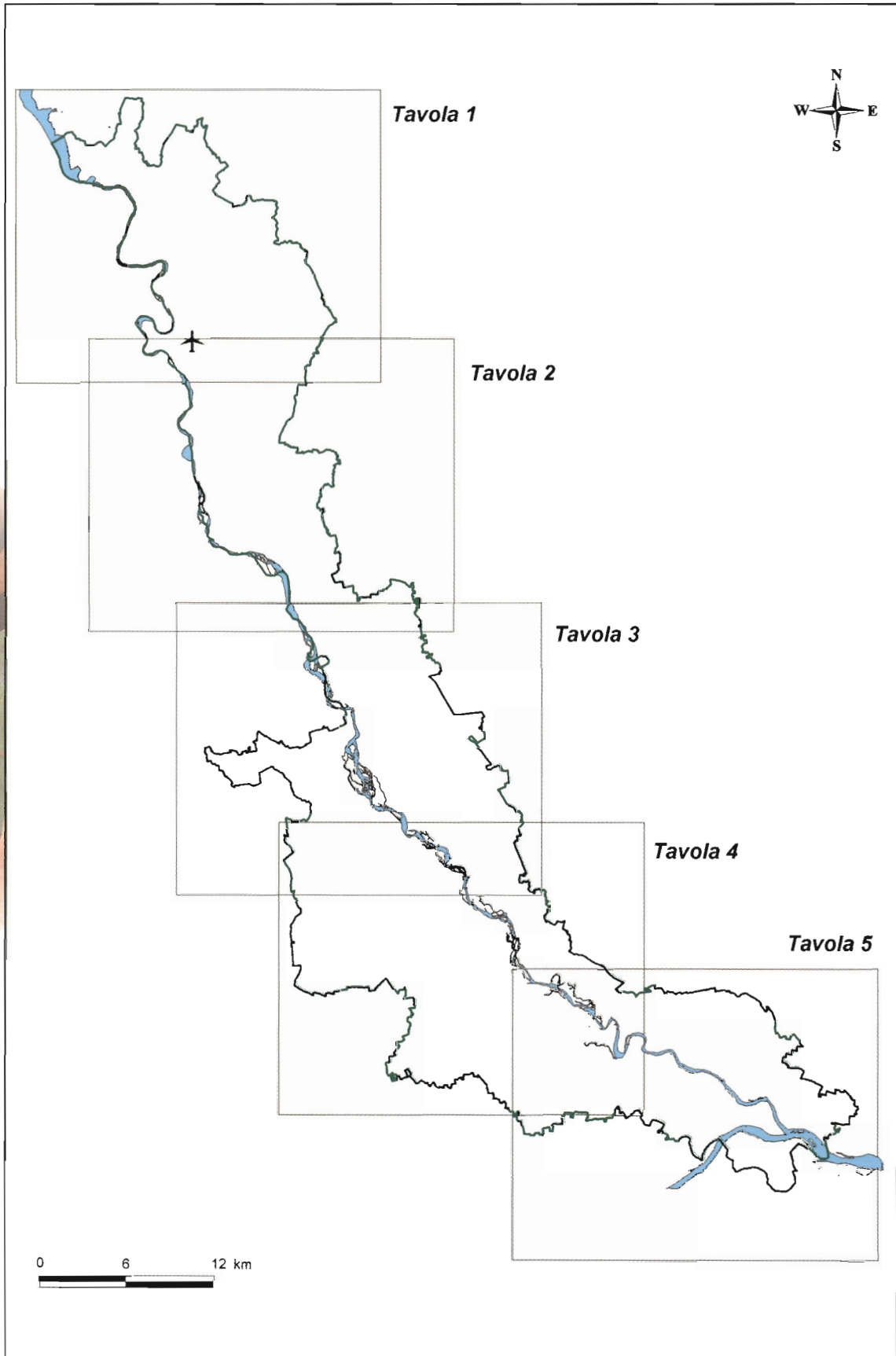


● Capitolo 3 Risultati

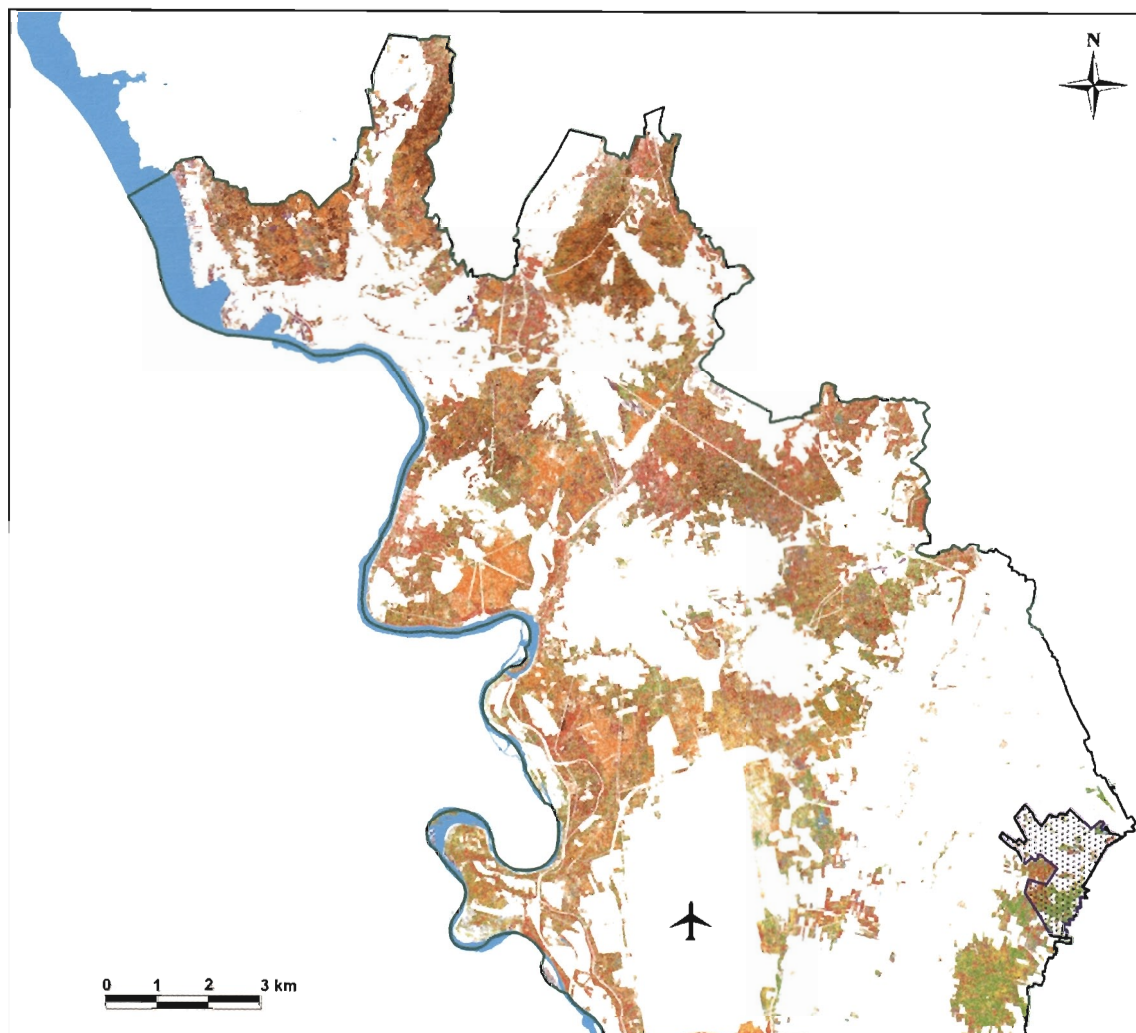
3.1 Distribuzione delle classi nel territorio del Parco Lombardo del Ticino

Per meglio illustrare la distribuzione spaziale delle classi oggetto di analisi, l'area di studio è stata suddivisa in 5 macro aree (Figura 67). Per ciascuna zona viene di seguito riportata un'analisi relativa alla distribuzione delle diverse classi di specie arboree.

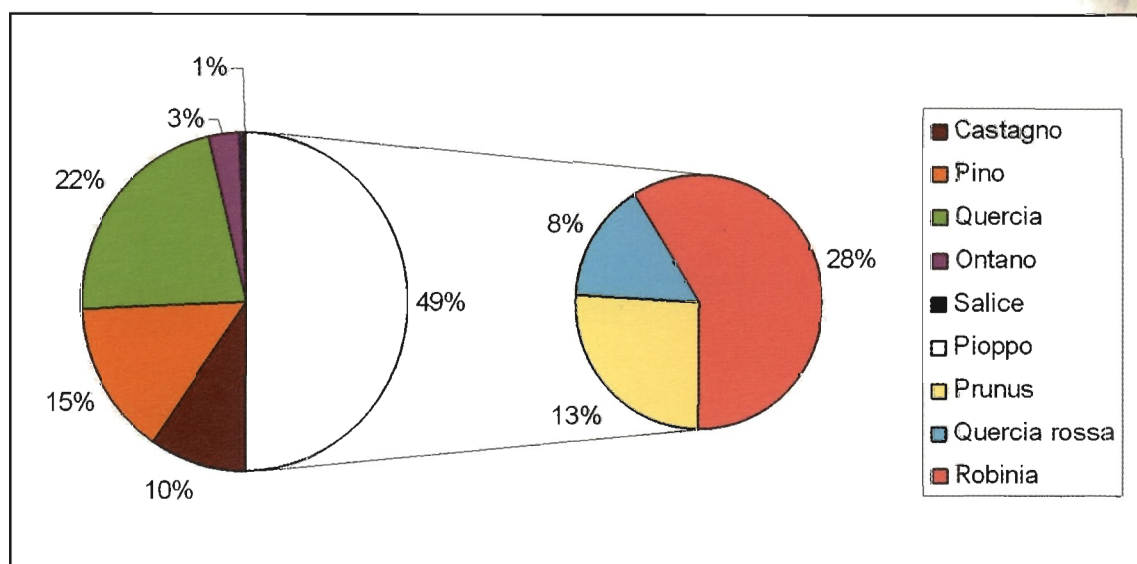




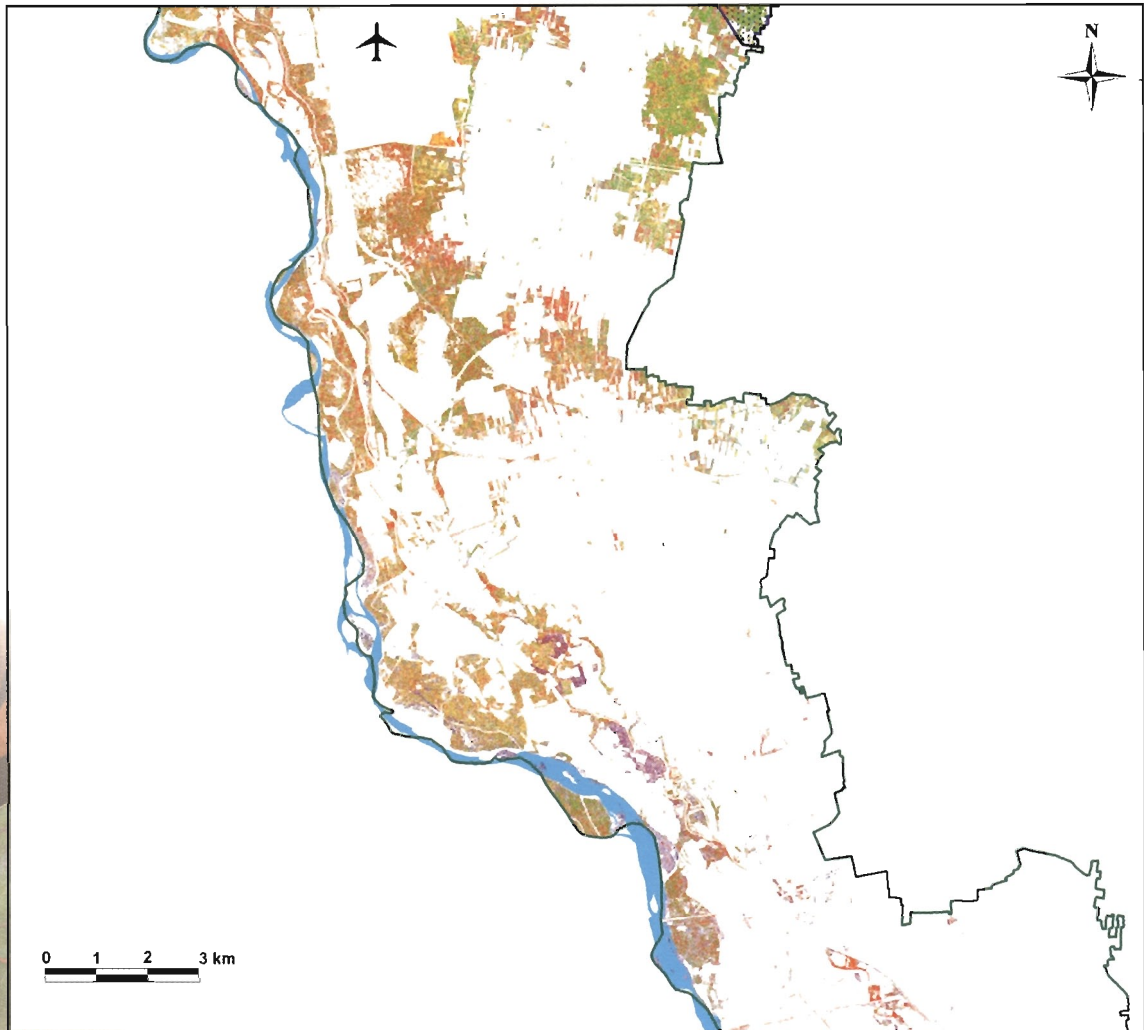
● **Figura 67**
 Il territorio del Parco è stato suddiviso in 5 zone rispetto alle quali vengono riportati i risultati delle classificazioni



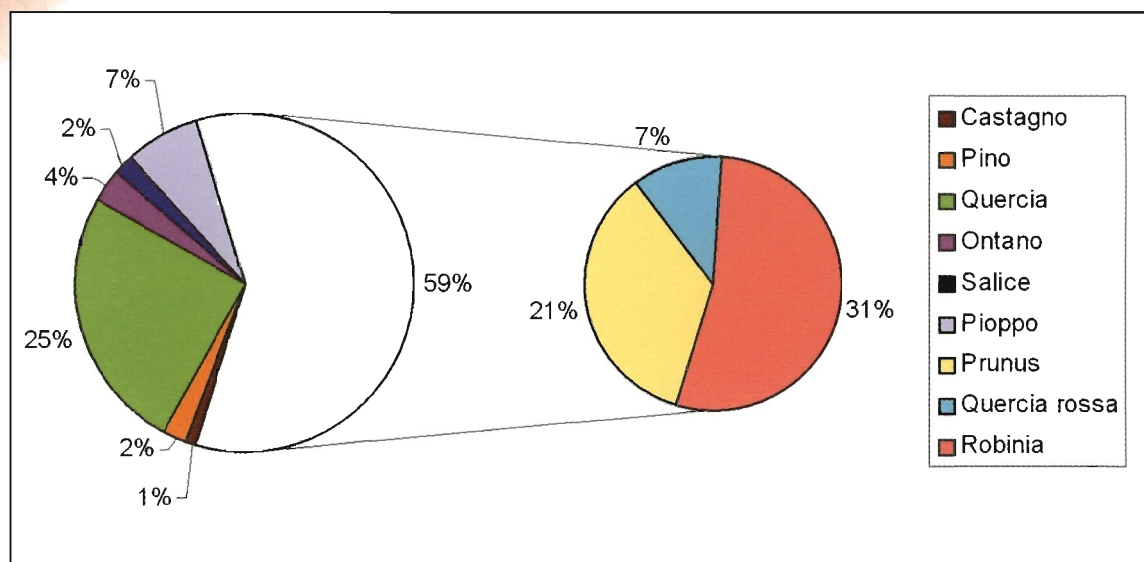
● **Figura 68**
Distribuzione delle specie arboree nella Tavola 1 (zona nord del Parco)



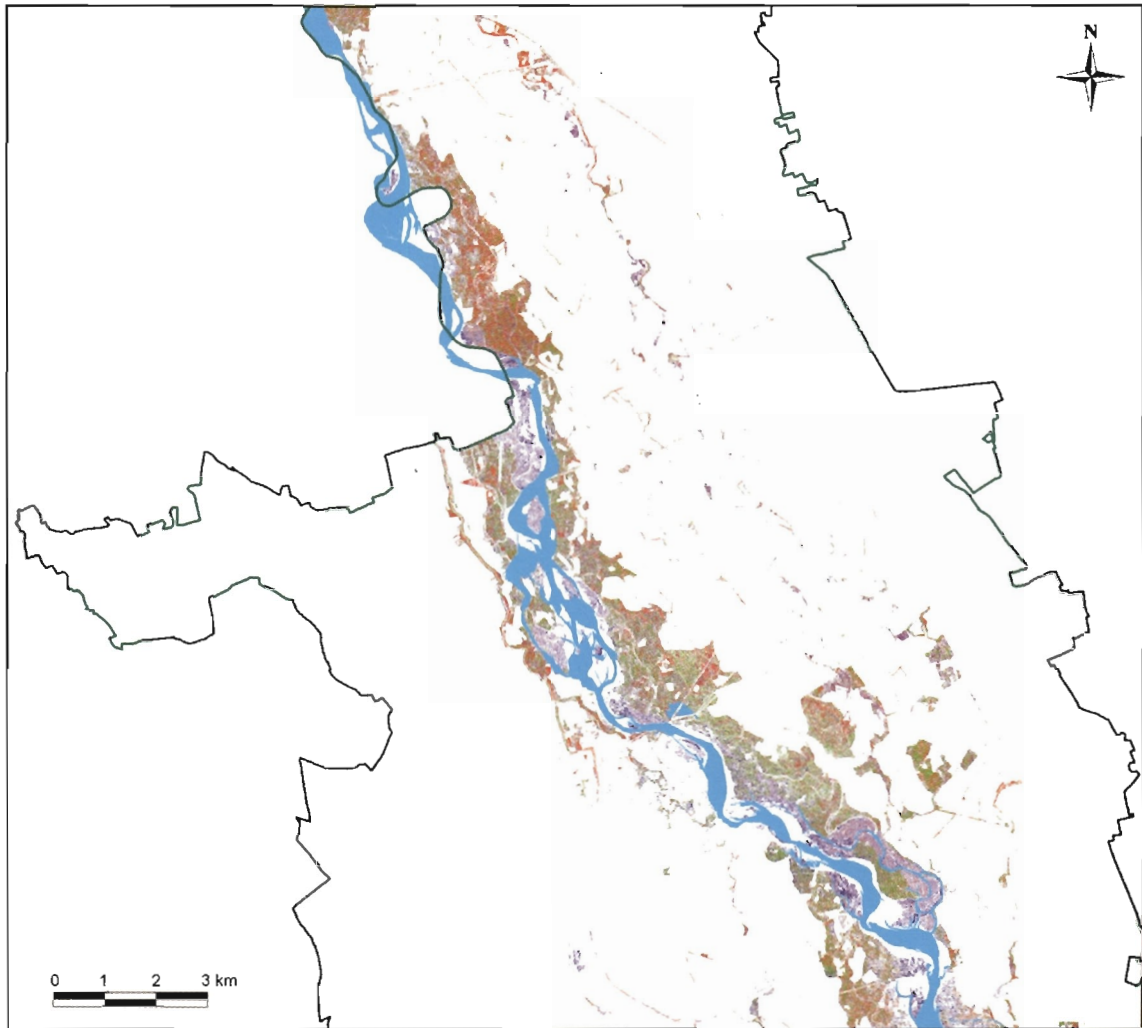
● **Figura 69**
Grafico della distribuzione percentuale delle specie arboree della Tavola 1. Nel grafico di sinistra è rappresentata la distribuzione delle specie tenendo accorpate le latifoglie esotiche (colore bianco); il grafico di destra rappresenta il contributo percentuale di ciascuna classe di latifoglie esotiche (Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa)



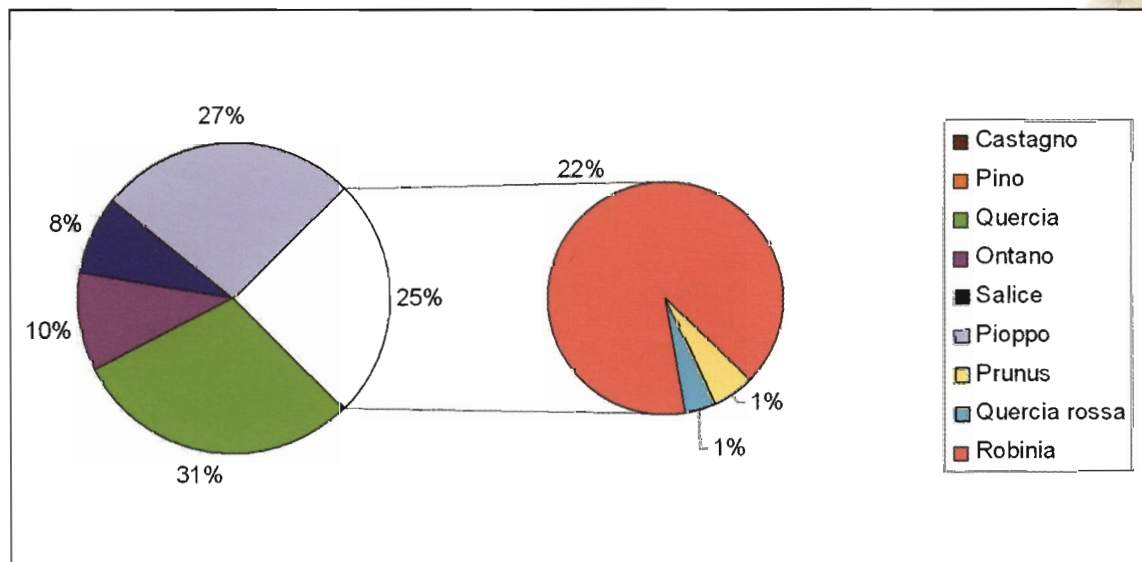
● **Figura 70**
Distribuzione delle specie arboree nella Tavola 2 (zona centro-nord del Parco)



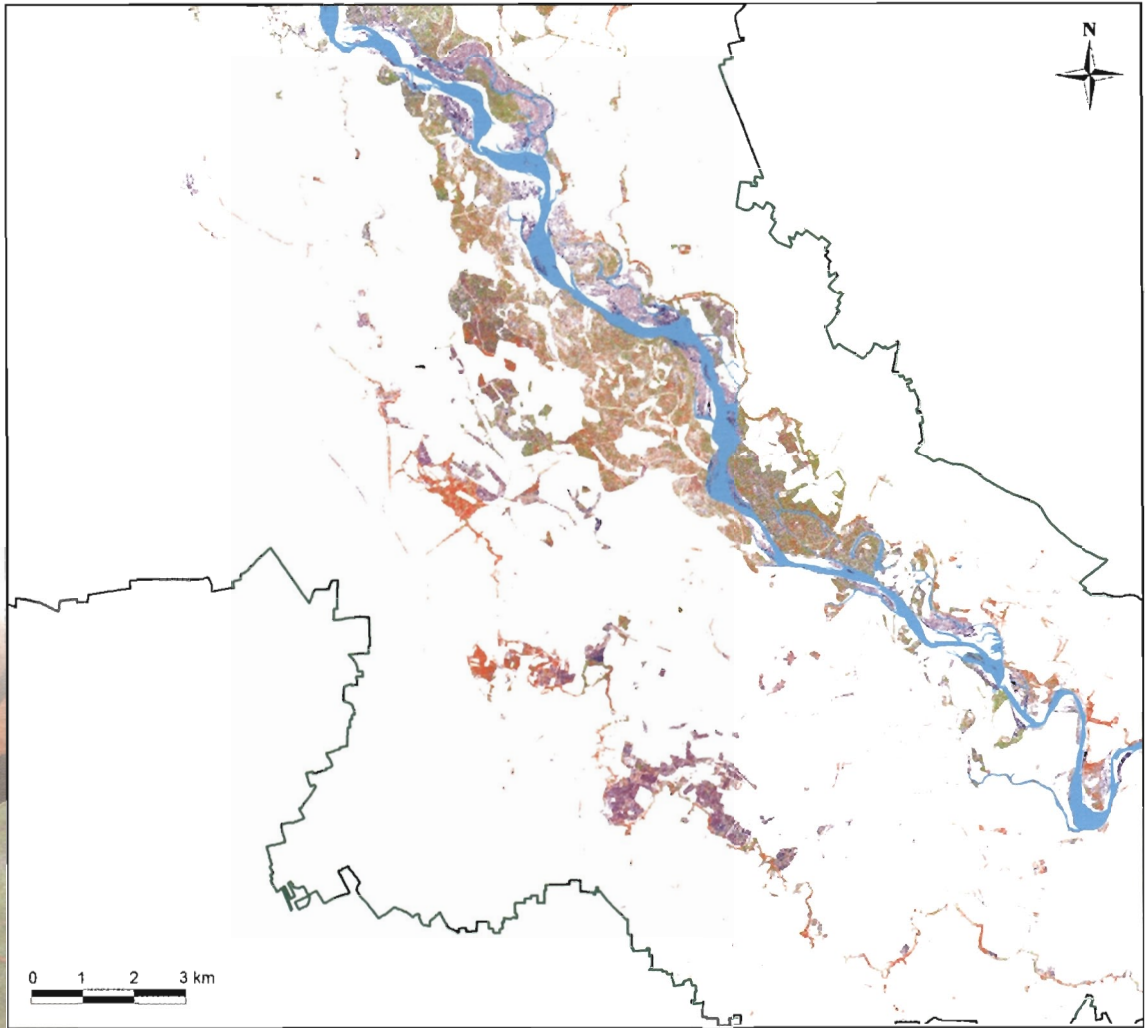
● **Figura 71**
Grafico della distribuzione percentuale delle specie arboree della Tavola 2. Nel grafico di sinistra è rappresentata la distribuzione delle specie tenendo accorpate le latifoglie esotiche (colore bianco); il grafico di destra rappresenta il contributo percentuale di ciascuna classe di latifoglie esotiche (Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa)



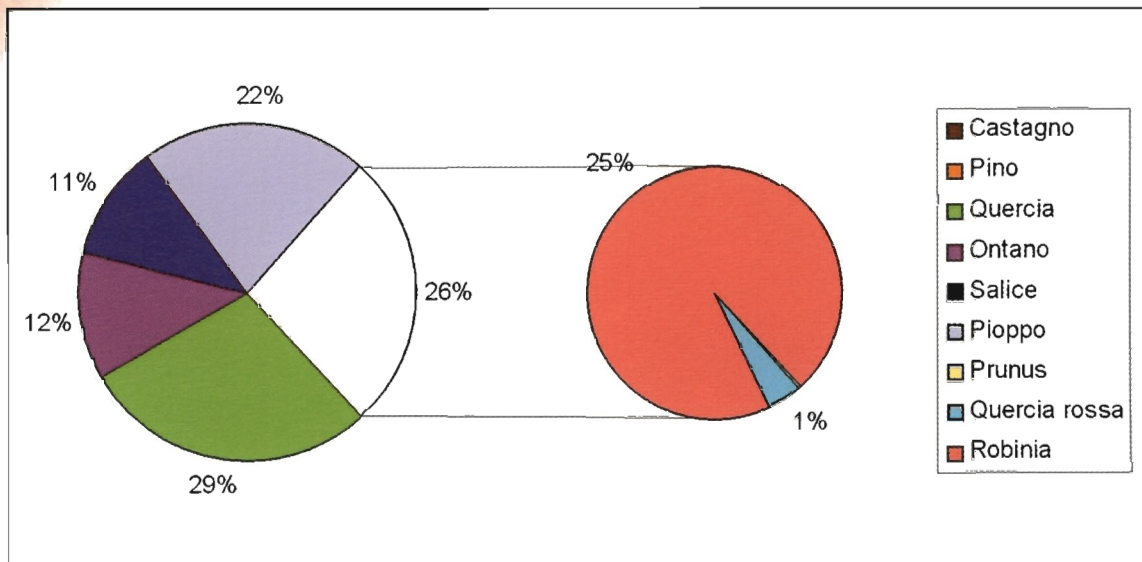
● **Figura 72**
Distribuzione delle specie arboree nella Tavola 3 (zona centro del Parco)



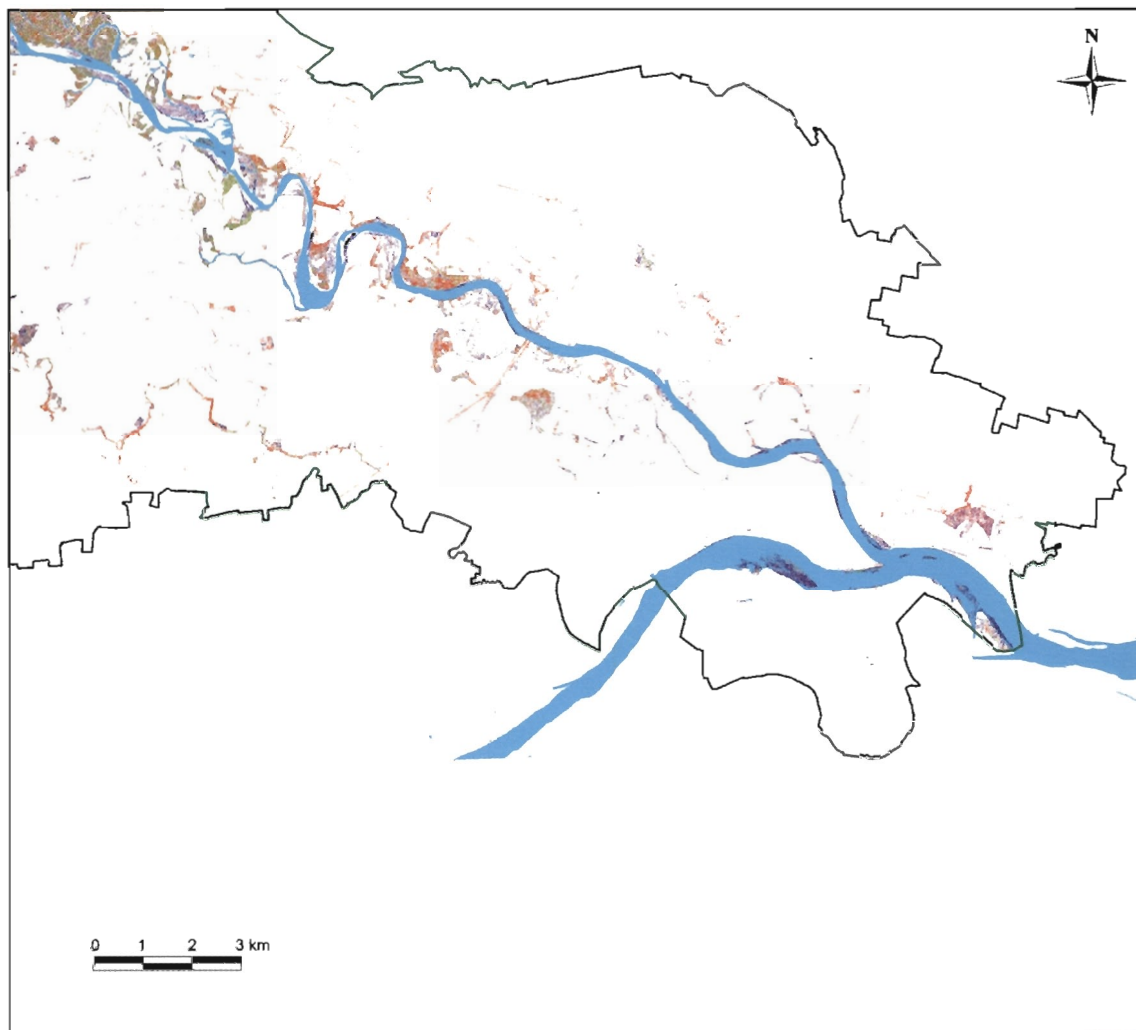
● **Figura 73**
Grafico della distribuzione percentuale delle specie arboree della Tavola 3. Nel grafico di sinistra è rappresentata la distribuzione delle specie tenendo accorpate le latifoglie esotiche (colore bianco); il grafico di destra rappresenta il contributo percentuale di ciascuna classe di latifoglie esotiche (Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa)



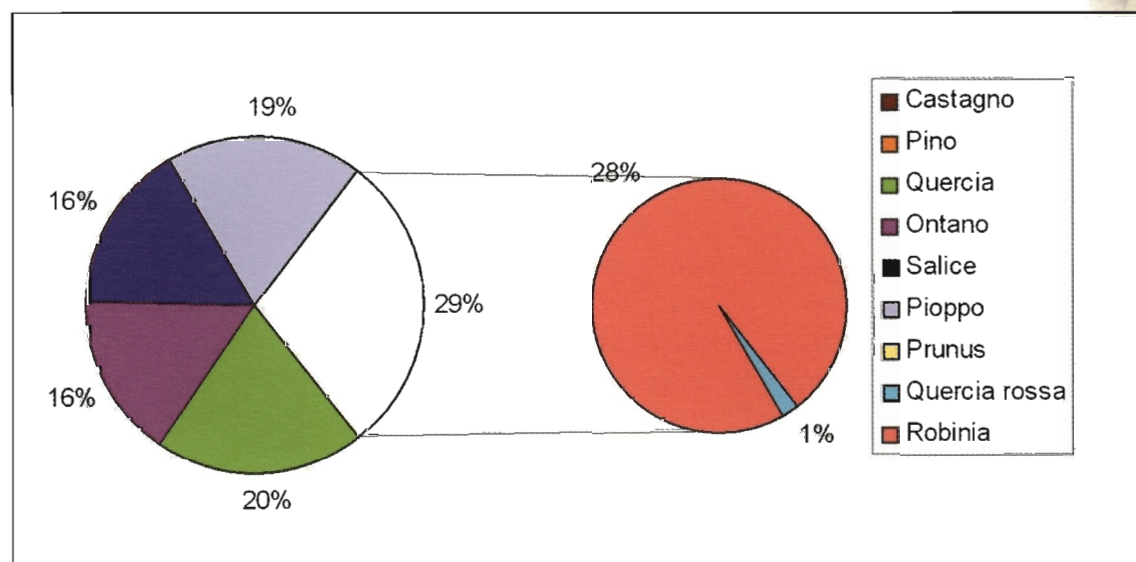
● **Figura 74**
Distribuzione delle specie arboree nella Tavola 4 (zona sud del Parco)



● **Figura 75**
Grafico della distribuzione percentuale delle specie arboree della Tavola 4. Nel grafico di sinistra è rappresentata la distribuzione delle specie tenendo accorpate le latifoglie esotiche (colore bianco); il grafico di destra rappresenta il contributo percentuale di ciascuna classe di latifoglie esotiche (Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa)



● **Figura 76**
Distribuzione delle specie arboree nella Tavola 5 (zona sud del Parco)



● **Figura 77**
Grafico della distribuzione percentuale delle specie arboree della Tavola 5. Nel grafico di sinistra è rappresentata la distribuzione delle specie tenendo accorpate le latifoglie esotiche (colore bianco); il grafico di destra rappresenta il contributo percentuale di ciascuna classe di latifoglie esotiche (Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa)

- Tavola 1, zona nord (Figure 68 e 69): prevalgono le latifoglie esotiche infestanti, in particolare le specie Robinia e Prugnolo tardivo. C'è una buona presenza di Conifere e Castagni, che si localizzano in prossimità delle colline moreniche e del Quercio - Carpineto. La distanza dall'asta fluviale limita, invece, la diffusione delle specie a carattere igrofilo. Salici e boschi di Pioppo sono praticamente assenti, mentre l'Ontano è presente in piccola percentuale. In questa tavola compare un'area (delimitata in Figura 68 da una linea blu) in cui si potrebbero riscontrare errori di misclassificazione dovuti a disturbi atmosferici presenti al momento del sorvolo del sensore.
- Tavola 2, zona centro-nord (Figure 70 e 71): anche in questa sezione si ha un'alta percentuale di latifoglie esotiche infestanti, in particolare di Robinia e Prugnolo tardivo. I boschi di Conifere e Castagno diminuiscono considerevolmente, mentre resta buona la presenza del Quercio - Carpineto. Aumentano le specie a carattere igrofilo, soprattutto in prossimità dell'asta fluviale.
- Tavola 3, zona centro (Figure 72 e 73): scompaiono i boschi di Castagno e Conifere. Diminuisce la percentuale di latifoglie esotiche, costituite prevalentemente da Robinia e aumentano le specie igrofile: Pioppo, Ontano e Salice, che si localizzano lungo il corso del fiume. Il Quercio - Carpineto è sempre presente con una buona percentuale.
- Tavola 4, zona sud (Figure 74 e 75): la composizione dei boschi è del tutto simile a quella della Tavola 3, con la differenza che si osserva la scomparsa del Prugnolo tardivo tra le latifoglie esotiche.
- Tavola 5, zona sud (Figure 76 e 77): in questa zona diminuisce la presenza dei boschi che mantengono una composizione simile a quella delle due tavole precedenti. Si osserva una sensibile diminuzione del Quercio - Carpineto a vantaggio delle specie a carattere igrofilo, Pioppo, Salice e Ontano.

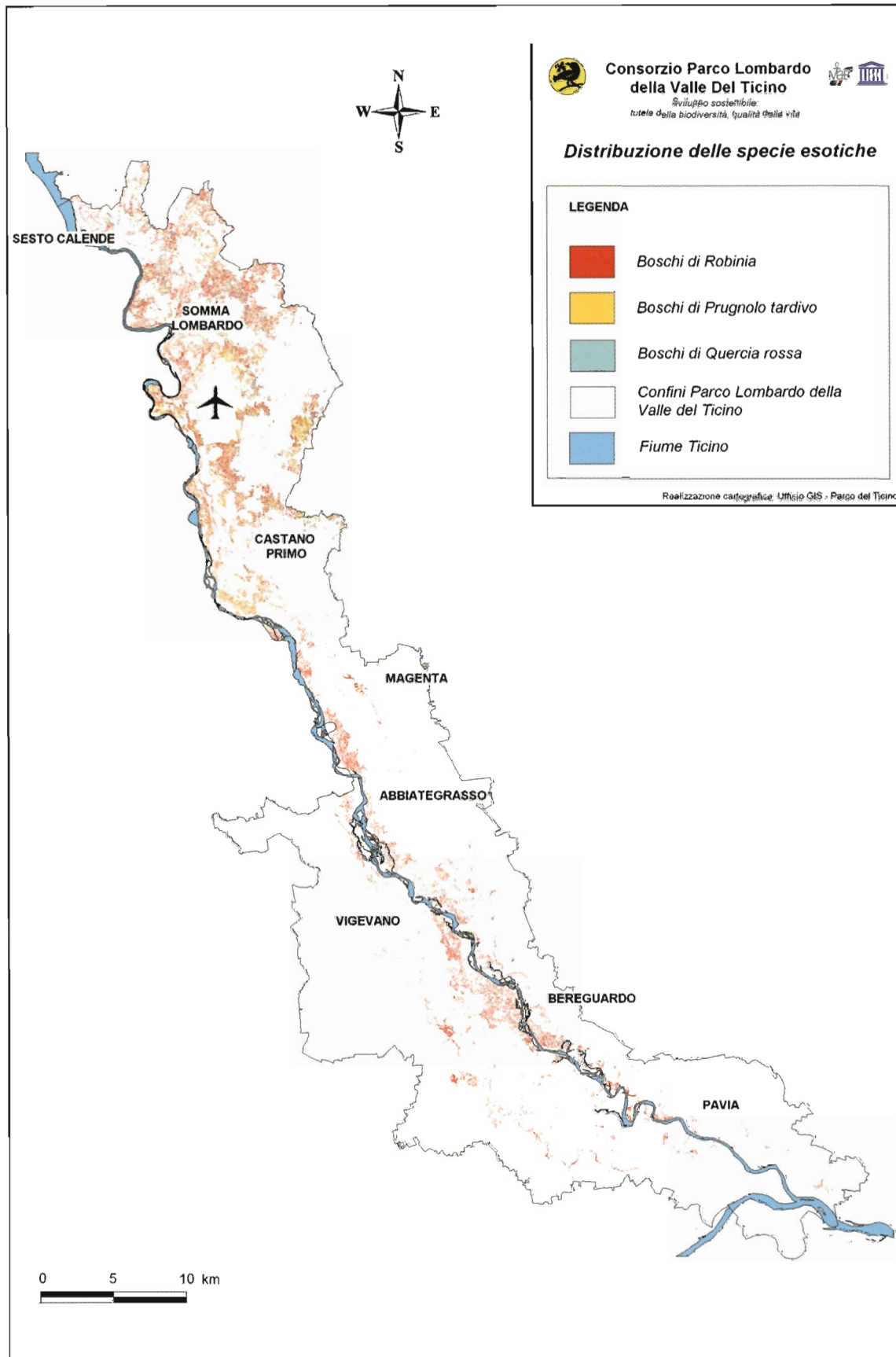
Nelle figure successive viene rappresentata la distribuzione delle singole classi arboree su tutto il territorio del Parco.

In particolare:

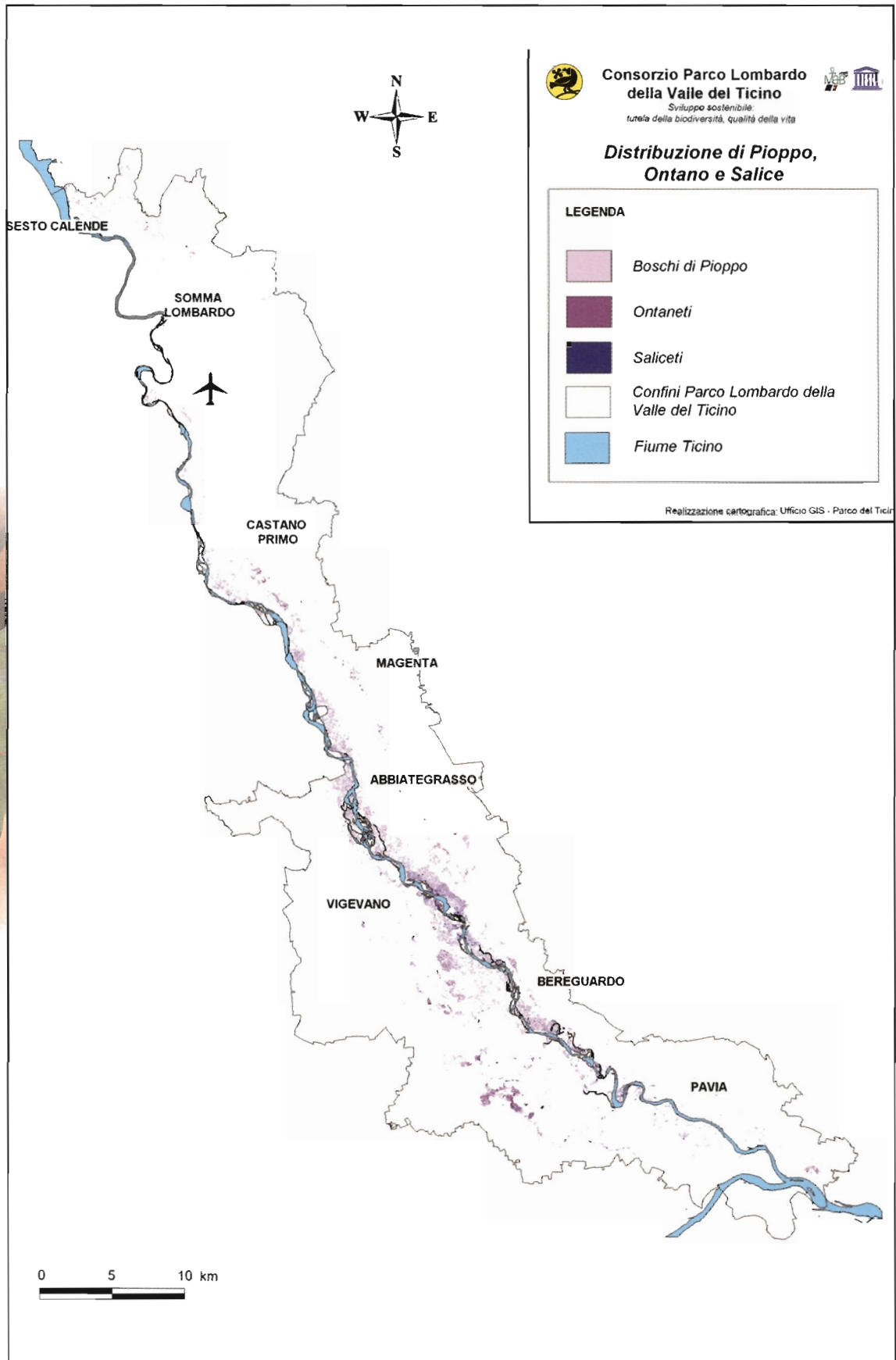
- La Figura 78 rappresenta la distribuzione spaziale delle tre specie di latifoglie esotiche infestanti, Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa.
- In Figura 79 è rappresentata la distribuzione delle specie a carattere igrofilo, Salice, Pioppo e Ontano.
- In Figura 80 è rappresentata la distribuzione dei boschi di Castagno e Conifere
- In Figura 81 sono infine rappresentati i boschi di Quercia e Carpino.

Le mappe generate sono in buon accordo con la distribuzione ecologica potenziale delle classi arboree indagate. In particolare vale la pena sottolineare:

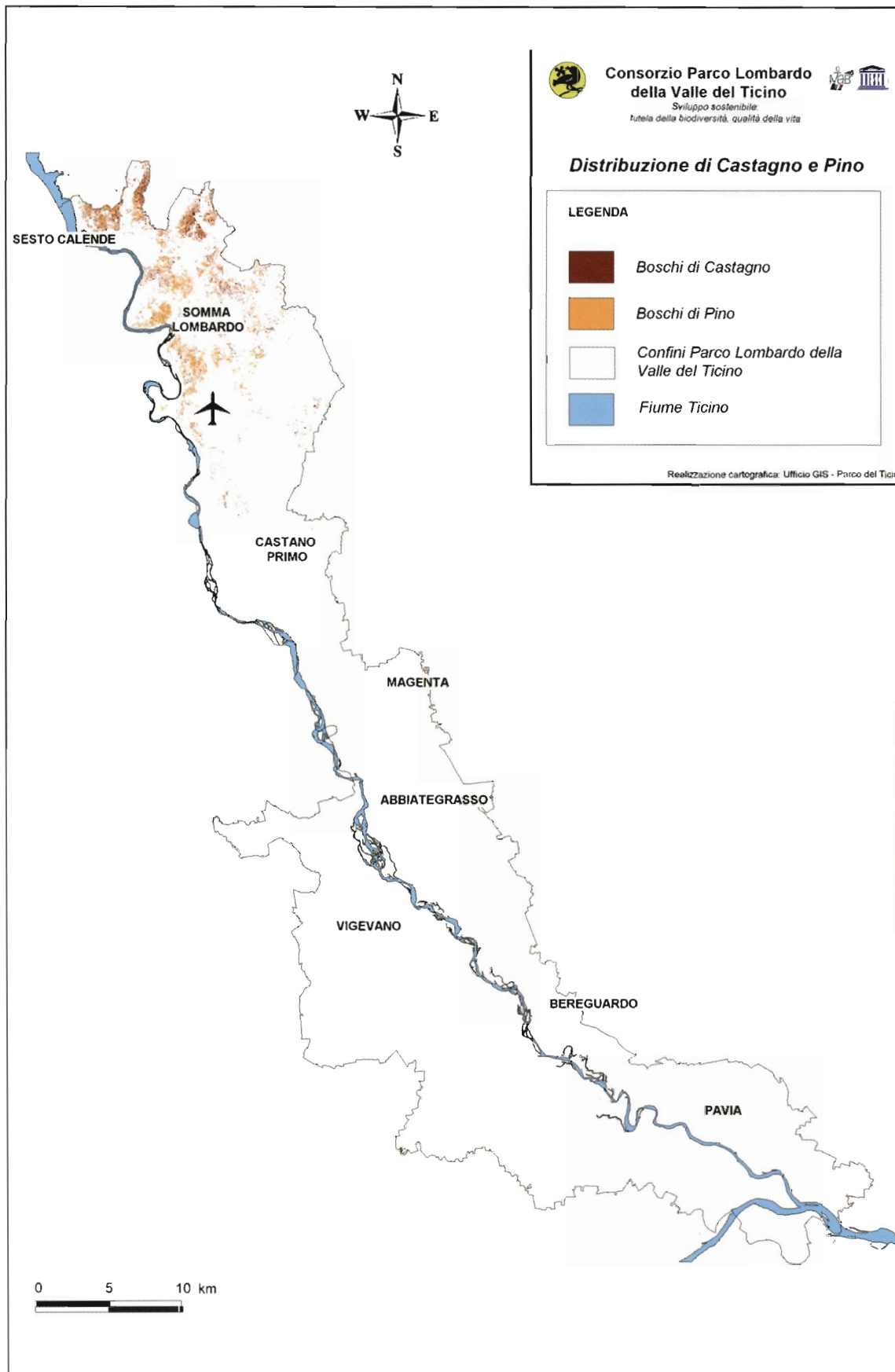
- che le mappe prodotte evidenziano la presenza delle specie esotiche nelle aree a maggiore impatto antropico (nei dintorni di centri abitati, in prossimità di strade o ferrovie);
- che Salici, Ontani e boschi di Pioppo tendono a localizzarsi nelle zone più prossime all'asta fluviale, ai canali ed all'interno delle zone umide;
- che il Quercio - Carpineto tende a localizzarsi in aree mesofile e mesoigrofile ad elevata naturalità, affette da limitato impatto antropico;
- che la presenza di boschi di Conifere e Castagno si limita alle colline moreniche della zona nord del Parco.



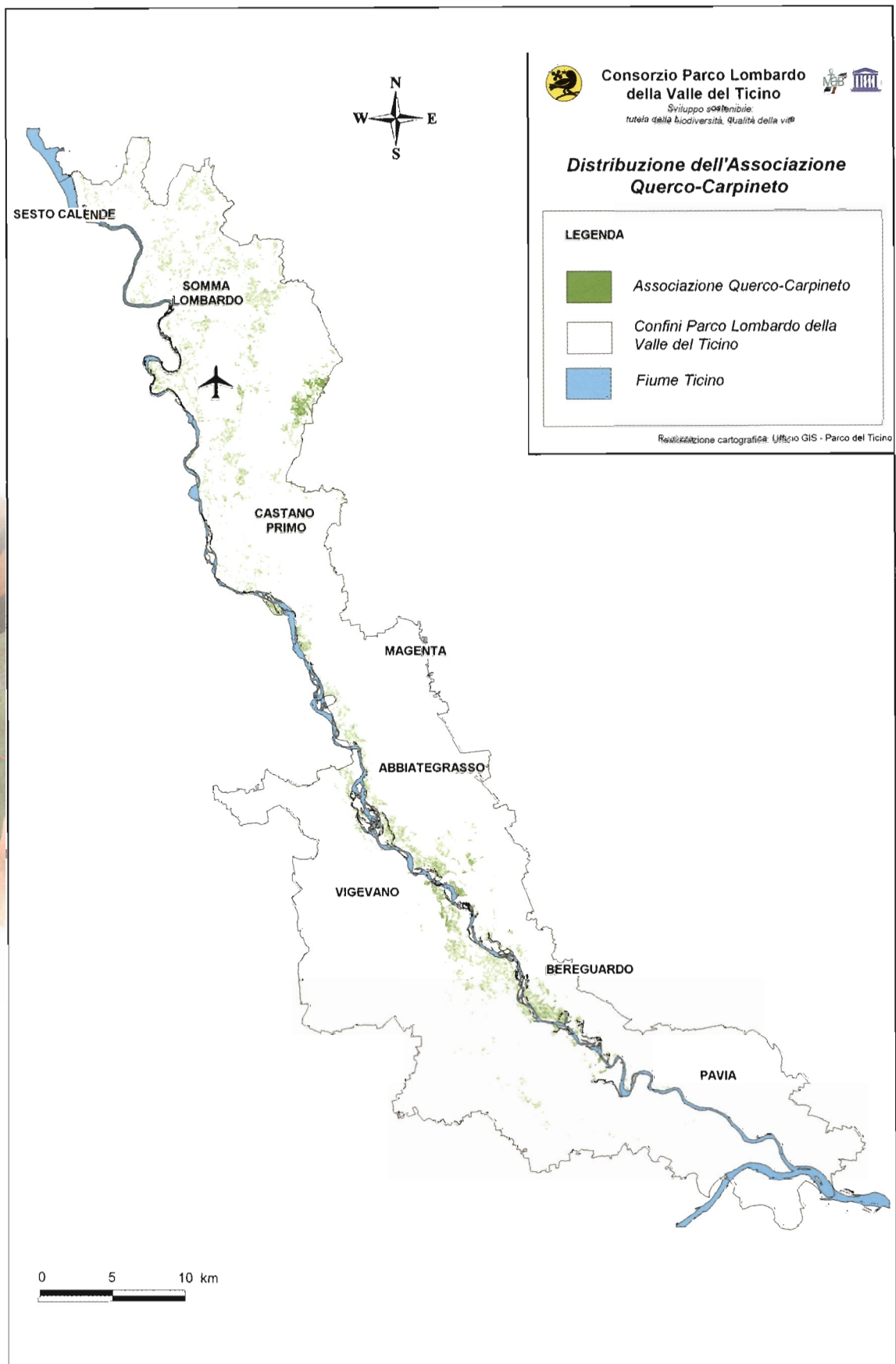
● **Figura 78**
Distribuzione spaziale delle latifoglie esotiche infestanti: Robinia, Prunolo tardivo e Quercia rossa



● **Figura 79**
 Distribuzione spaziale delle specie a carattere igrofilo: boschi di Pioppo, Saliceti e Ontaneti



● **Figura 80**
Distribuzione spaziale dei boschi di Conifere e Castagno



● **Figura 81**
Distribuzione spaziale dell' Associazione Quercus-Carpinus

Le considerazioni fatte a carattere generale trovano inoltre conferma a livello locale, come descritto negli esempi successivi. Si sono considerate tre aree localizzate in punti differenti del territorio del Parco:

1. una zona a nord, situata in prossimità delle colline moreniche;
2. una zona centro-settentrionale, caratterizzata da una forte presenza di aree urbanizzate e dalla vicinanza dell'aeroporto di Malpensa;
3. una zona centrale, localizzata in prossimità dell'asta fluviale.

1. Colline moreniche a nord

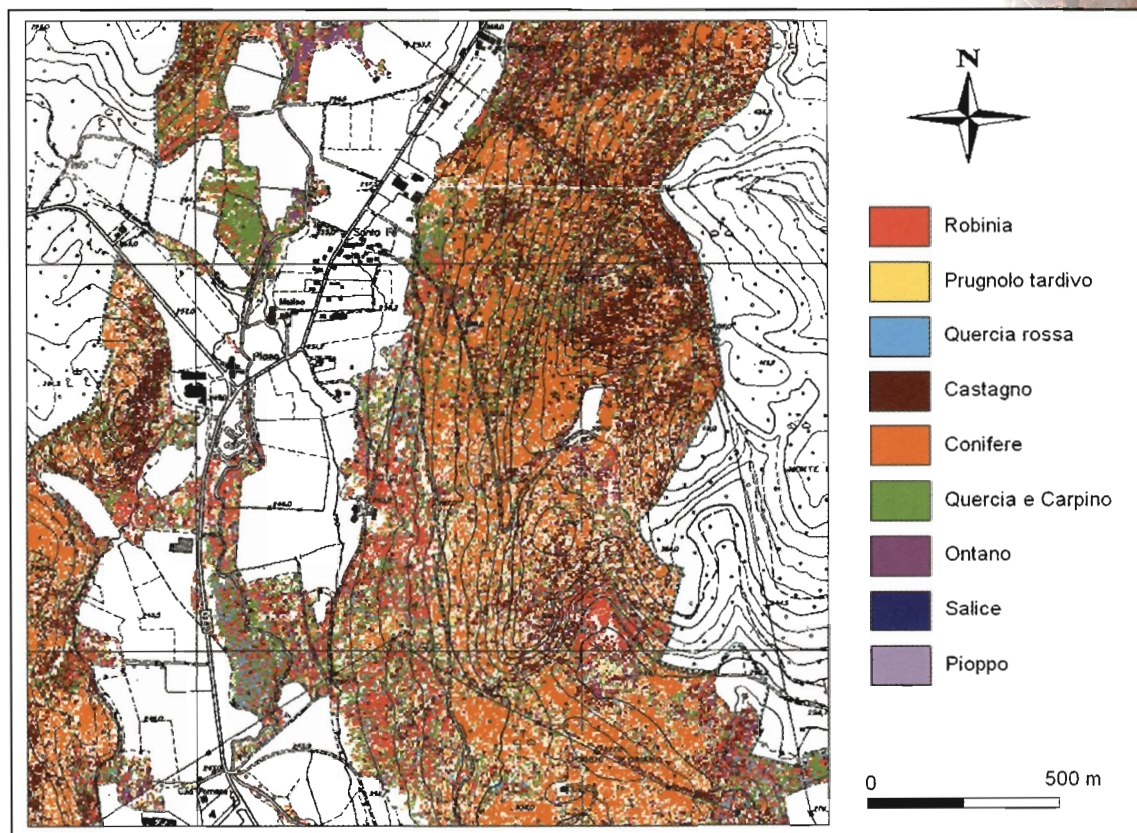
In quest'area (Figura 82) si può osservare che la presenza di specie esotiche è maggiore in prossimità di strade e centri abitati e che, salendo in quota, allontanandosi dalle aree urbanizzate, si ha un'alta percentuale di boschi di Quercia, Conifere e Castagno.

2. Area urbanizzata a est di Malpensa

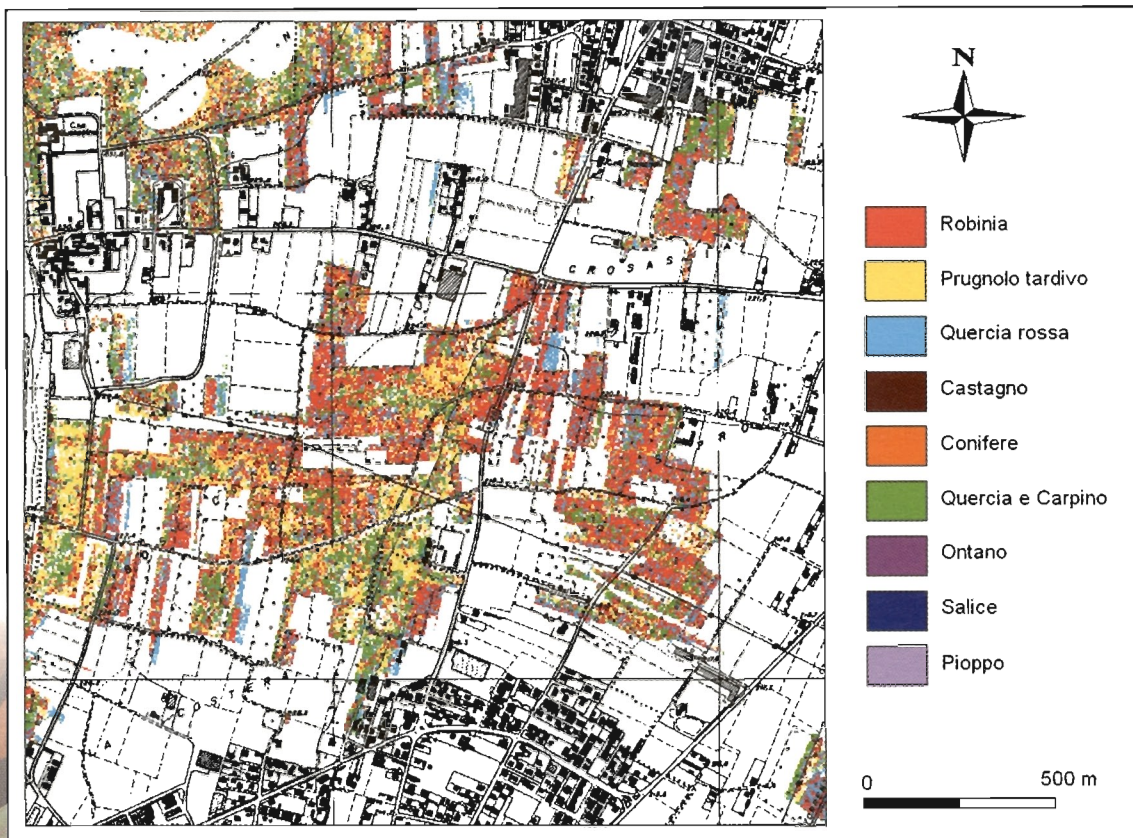
In quest'area fortemente urbanizzata si osserva come sia alta la percentuale di impianti di latifoglie esotiche, quali Robinia e Quercia rossa e come sia forte la presenza del Prugnolo tardivo (Figura 83).

3. Asta fluviale in zona centrale

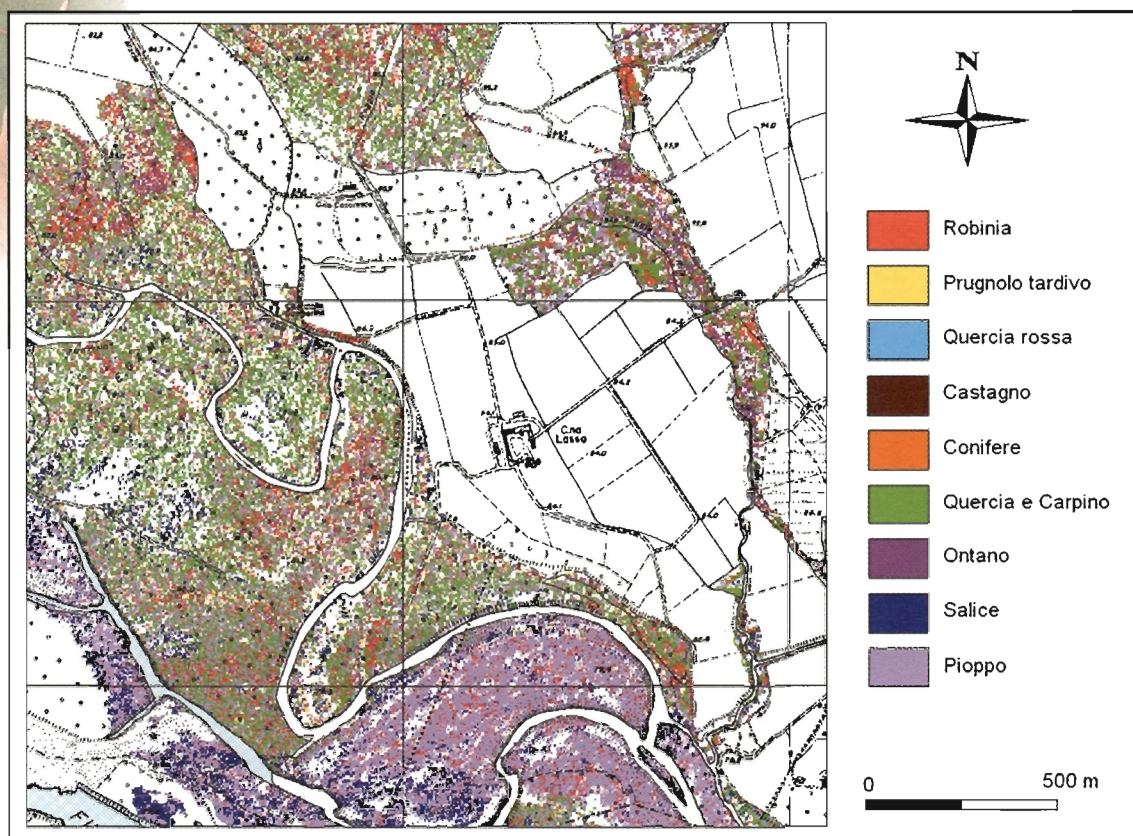
Lungo l'asta fluviale si osserva la forte presenza di Salice e Pioppo. Allontanandosi progressivamente dal fiume queste due specie diminuiscono, ma è sufficiente la presenza di un ruscello o di una zona umida per notare la comparsa dell'Ontano, altra specie a carattere igrofilo. I restanti boschi sono costituiti dal Quercia-Carpineto e da una bassa percentuale di latifoglie esotiche (Figura 84).



● Figura 82 Mappa delle specie relative alle colline moreniche a nord del Parco



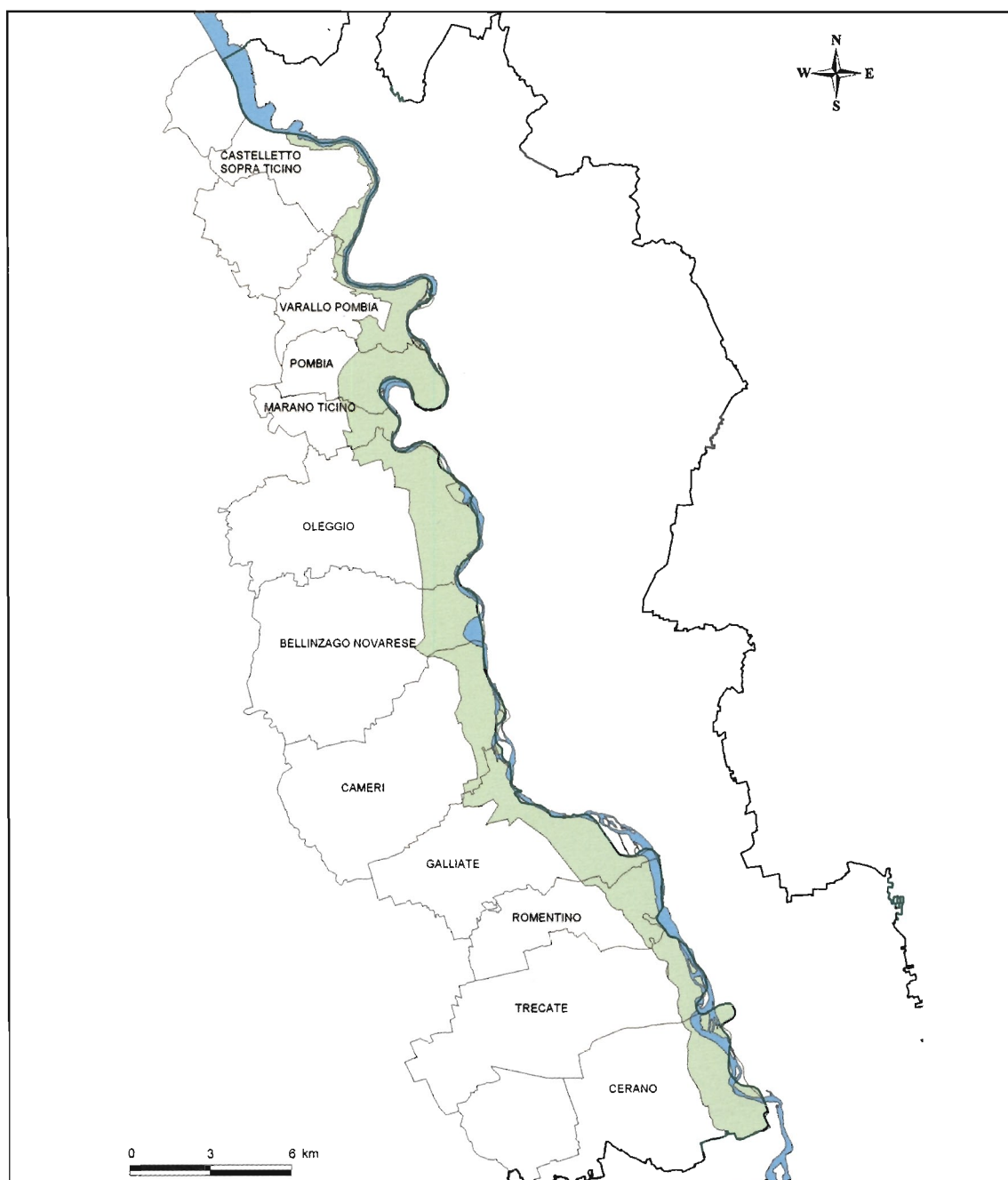
● **Figura 83** Mappa delle specie relativa ad una zona urbanizzata ad est di Malpensa



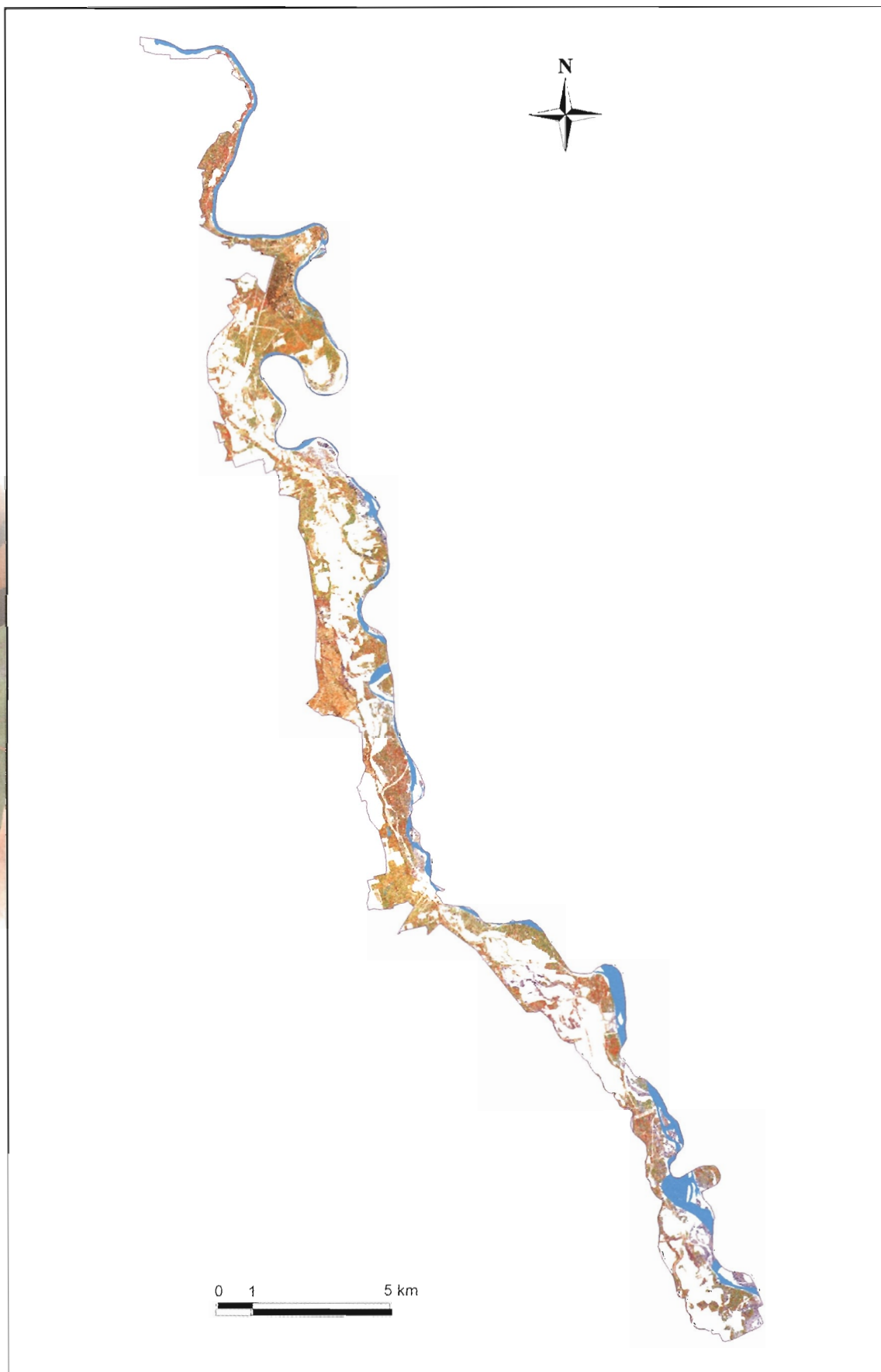
● **Figura 84** Mappa delle specie relativa ad una zona centrale del Parco, in prossimità del fiume Ticino

3.2 Distribuzione delle classi nel territorio del Parco Naturale del Ticino

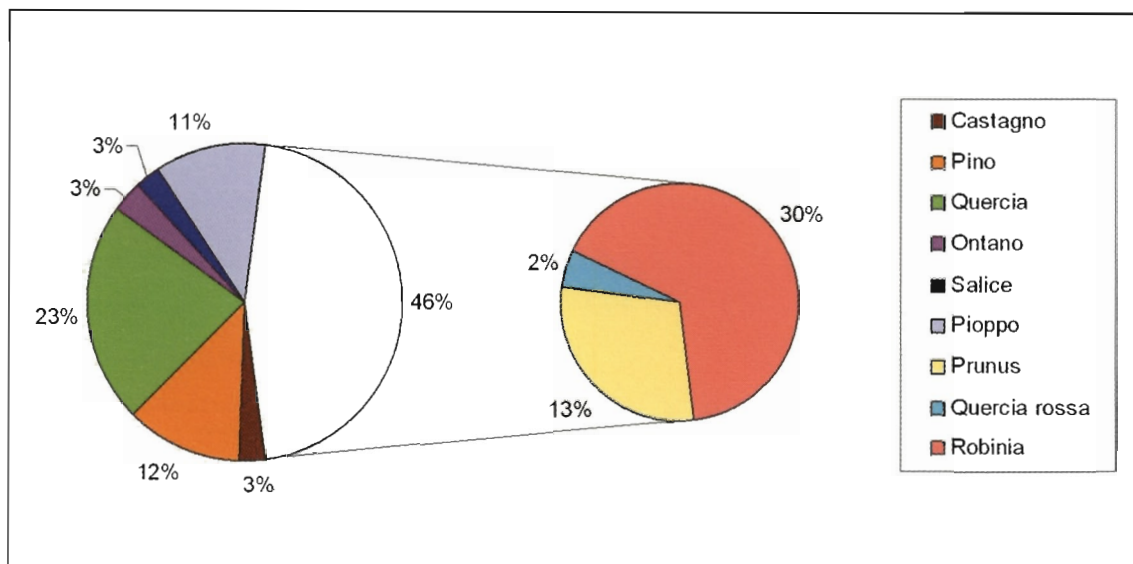
Il Parco Naturale Valle del Ticino comprende la fascia fluviale di undici Comuni della Provincia di Novara, dal Lago Maggiore (Comune di Castelletto Sopra Ticino) al Comune di Cerano (Figura 85). Il Parco si estende su una superficie di 6561 ettari. I boschi occupano circa il 60% del territorio, sono costituiti in prevalenza da latifoglie e occasionalmente da conifere, quali il Pino silvestre, diffuso nel settore nord del Parco. Tra le latifoglie si trovano le essenze tipiche dell'antica foresta padana: Farnia, Carpino, Olmo, che senza l'intervento dell'uomo tendono verso formazioni a Quercu - Carpineto, un tempo dominanti. Nei boschi sono inoltre diffusissime alcune specie esotiche come la Robinia, che in alcune località diviene infestante.



● **Figura 85** Confini del Parco Naturale Valle del Ticino



● **Figura 86** Distribuzione delle specie nel Parco Naturale Valle del Ticino

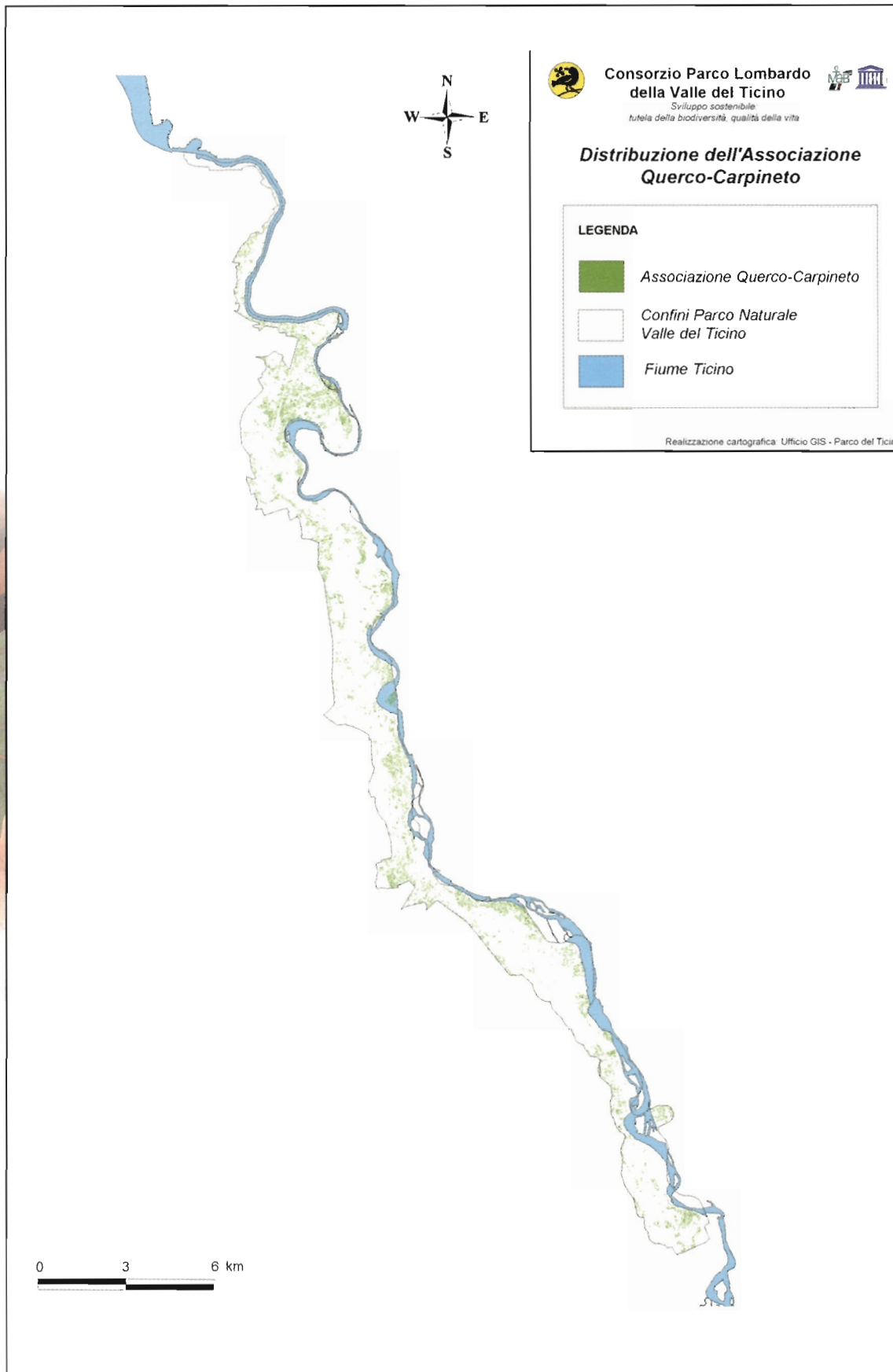


● **Figura 87**
Grafico della distribuzione percentuale delle specie arboree del Parco Naturale Valle del Ticino. Nel grafico di sinistra è rappresentata la distribuzione delle specie, tenendo accorpate le latifoglie esotiche (colore bianco); il grafico di destra rappresenta il contributo percentuale di ciascuna classe di latifoglie esotiche (Robinia, Prugnolo tardivo e Quercia rossa)

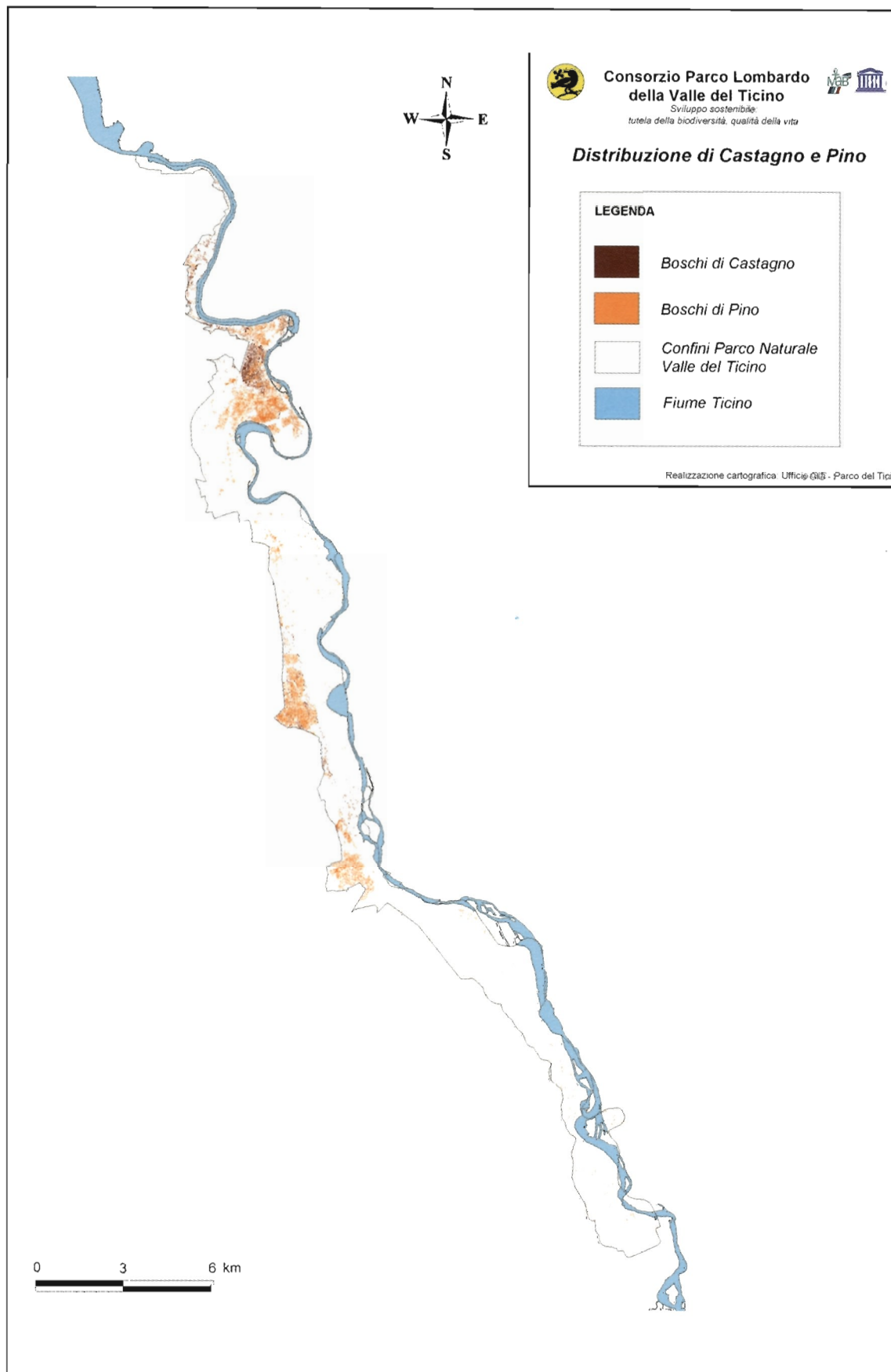
La mappa delle specie prodotta per il Parco piemontese è quella rappresentata in Figura 86. La Figura 87 rappresenta le statistiche riferite alle singole specie.

Da una prima analisi della carta si possono desumere alcune generiche valutazioni di tipo ecologico. In particolare:

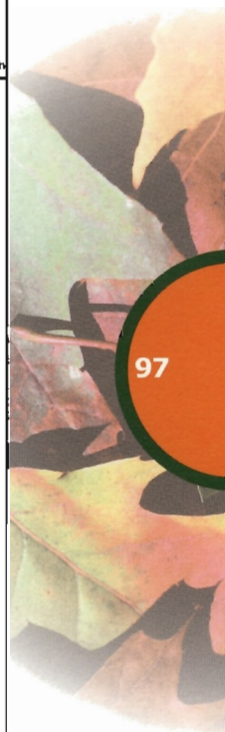
- Il Quercio - Carpineto occupa circa un quarto del totale classificato ed è uniformemente distribuito su tutto il territorio del Parco (Figura 88).
- I boschi di Castagno si trovano prevalentemente nella zona settentrionale in associazione con i boschi di Conifere, che si estendono anche nella parte centrale (Figura 89).
- Le specie a carattere igrofilo, Pioppo, Salice e Ontano, hanno comportamento analogo a quello riscontrato nella parte lombarda del Parco (Figura 90).
- Le latifoglie esotiche infestanti sono numerose e costituiscono poco meno della metà dei boschi classificati (Figura 91). La Quercia Rossa è presente soprattutto in forma di impianto, le specie Robinia e Prugnolo tardivo sono diffuse dove l'impatto dell'uomo è maggiore, in prossimità di strade ed elettrodotti, da cui si diffondono facilmente verso radure e porzioni di bosco aperte.

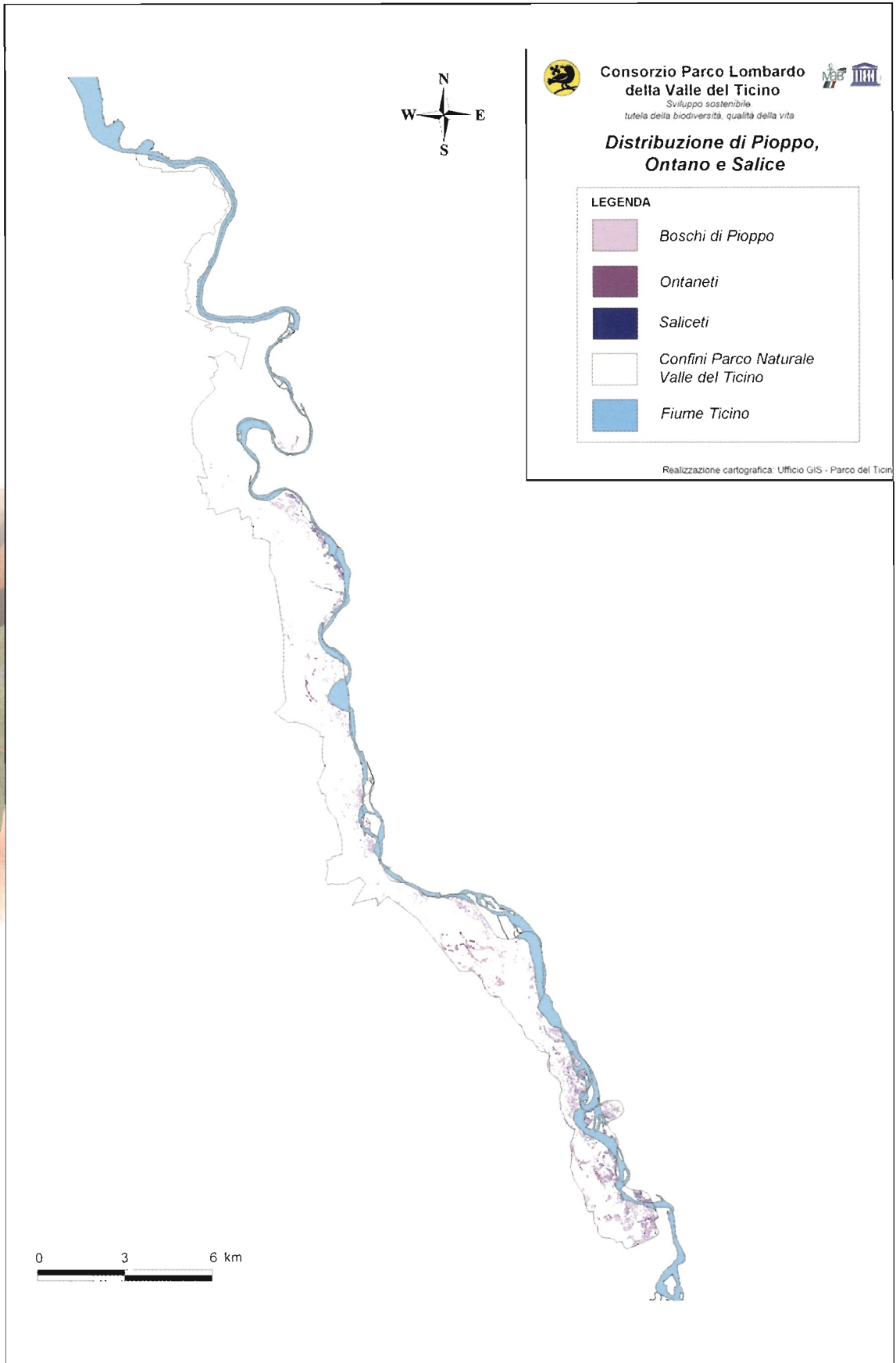


● **Figura 88**
Distribuzione spaziale dell' Associazione Quercus-Carpinus nel Parco Naturale Valle del Ticino

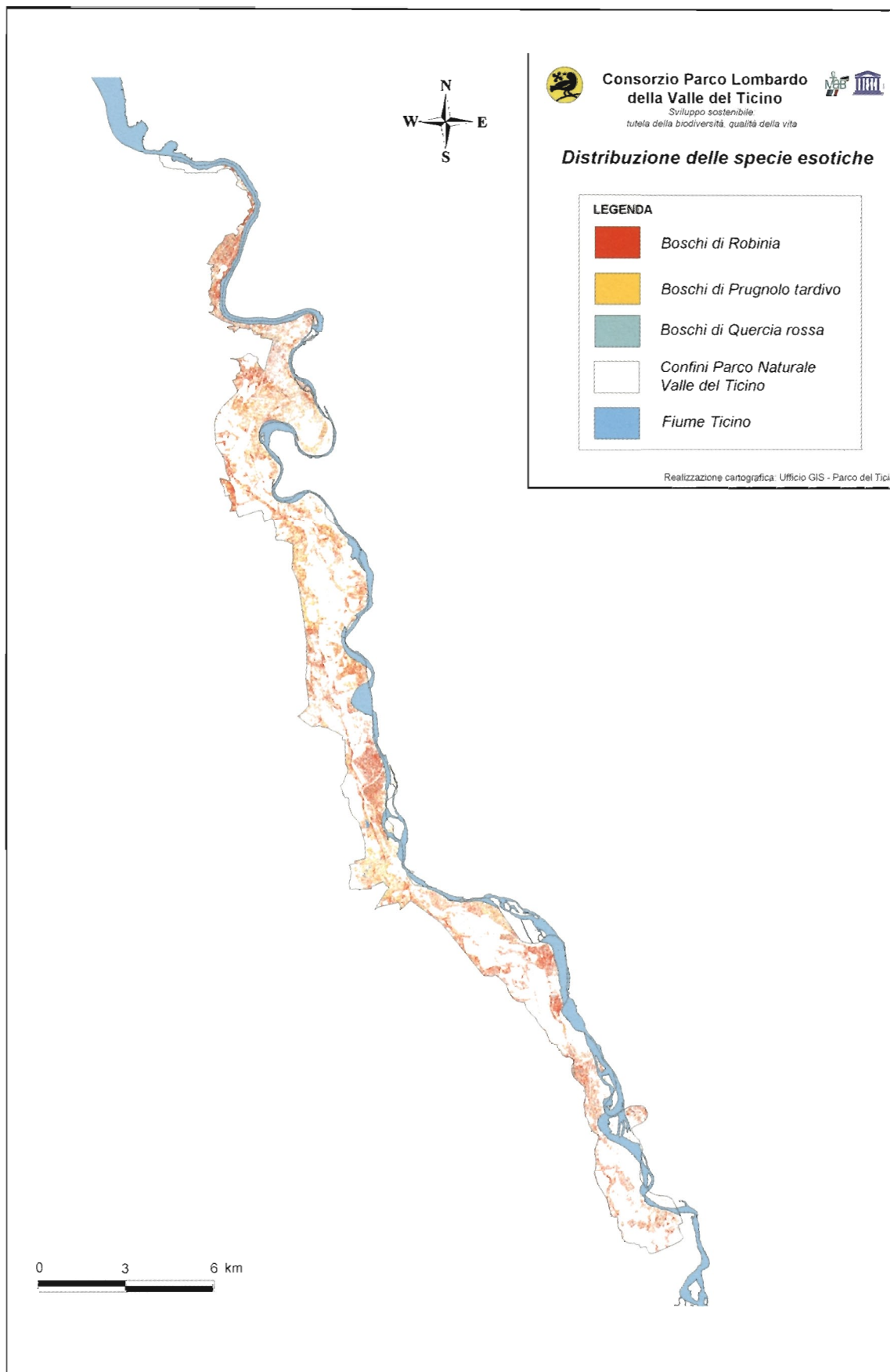


● **Figura 89**
Distribuzione spaziale dei boschi di Conifere e Castagno nel Parco Naturale Valle del Ticino





● **Figura 90**
Distribuzione spaziale delle specie a carattere igrofilo nel Parco Naturale Valle del Ticino



● **Figura 91**
Distribuzione spaziale delle latifoglie esotiche infestanti nel Parco Naturale Valle del Ticino





● Capitolo 4 Valutazione dei risultati

La valutazione di una classificazione può avvenire in maniera qualitativa o quantitativa. Qualitativamente, se il prodotto corrisponde alle aspettative e sembra dare le informazioni richieste, quantitativamente confrontando i risultati ottenuti con verità al suolo di riferimento, *test pixel*, definite indipendentemente dagli esempi usati per la classificazione (analisi di accuratezza).

Nel capitolo precedente si sono valutate le mappe dal punto di vista qualitativo. In questo capitolo viene esposta la valutazione quantitativa.

4.1 Valutazione quantitativa di una classificazione

Qualsiasi mappa tematica deve soddisfare certi requisiti di attendibilità al fine di un suo utilizzo pratico. Anche nel caso di mappe derivate da dati telerilevati, per mezzo di tecniche di classificazione, è quindi necessaria una procedura che verifichi il grado di accuratezza con il quale vengono raggruppati i *pixel* all'interno delle classi tematiche.

L'accuratezza definisce la misura dell'accordo tra un riferimento, lo standard, che si assume come corretto, e un'immagine classificata di cui si vuole stimare la qualità. Quest'analisi presuppone la disponibilità di alcuni dati raccolti a terra o derivati da fotointerpretazione, in grado di costituire un campione rappresentativo dell'effettiva realtà a terra (*test sample*).

Perché i risultati siano attendibili, è necessario prendere in considerazione una popolazione di *pixel* classificati che sia diversa da quella utilizzata come *training* nel corso della procedura di classificazione e che sia rappresentativa dell'intera area coperta dalla mappa tematica.

Nella Scheda di Approfondimento E viene descritta in dettaglio la metodologia utilizzata per la valutazione dell'accuratezza della classificazione prodotta.

Scheda di approfondimento E

Valutazione quantitativa dell'accuratezza di una classificazione

Numerosità e distribuzione spaziale del campione

Per una valutazione quantitativa (analisi di accuratezza) di una classificazione occorre definire, oltre ad un insieme di dati campione da utilizzare nella fase di produzione delle mappe (*training sample*), un altro insieme di dati campione da utilizzare nella fase di valutazione (*test sample*). La possibilità di estendere i risultati dell'accuratezza del *test sample* all'intera mappa è legata al fatto che lo stesso sia stato estratto secondo una metodologia statisticamente significativa.

I criteri di cui bisogna tenere conto nella scelta del protocollo per l'estrazione del *test sample* sono (Stehman, 1999):

- che si conosca la probabilità di estrazione dei campioni;
- che sia semplice da implementare e analizzare;
- che permetta il calcolo delle varianze¹²;
- che causi una bassa varianza delle misure di accuratezza;
- che il campione sia spazialmente ben distribuito;
- che il costo sia limitato.

La raccolta di ogni singolo campione di riferimento, che spesso richiede delle osservazioni dirette sul terreno (*ground truth*, verità a terra) comporta un certo costo: mentre da un lato si tende a contenere la sua numerosità, dall'altro occorre che il campione sia grande, in modo da garantire la validità statistica per ogni analisi.

Accanto alla numerosità totale del campione, bisogna garantire anche che ogni singola categoria sia sufficientemente rappresentata nel campione.

In Tabella D.1 sono riportati alcuni valori ottenuti nella determinazione del numero minimo di osservazioni (*pixel*) per ogni classe, al fine di garantire che il campione sia significativo (Van Genderen, 1978).

Poiché il valore percentuale di *pixel* del campione classificati correttamente è solo una stima dell'accuratezza reale, è opportuno definire un intervallo di confidenza per i valori di accuratezza. Questo intervallo può essere determinato impiegando opportune formule per la stima della varianza.

Numerosità minima di *test sample* per classe in funzione dell'accuratezza

Accuratezza	0.95	0.9	0.85	0.8	0.6	0.5
Numerosità	60	30	20	15	10	5

● Tabella E.1 Relazione numerosità minima - accuratezza (Van Genderen, 1978).

In letteratura sono stati descritti svariati schemi di campionamento; quelli più usati sono riconducibili alle due tipologie principali di campionamento: casuale e sistematico.

¹² Varianza: vedi glossario.

Nel campionamento casuale un numero prefissato n di *pixel* viene estratto casualmente dall'insieme degli N *pixel* totali della mappa. In questo modo ogni *pixel* ha la stessa probabilità n/N di essere estratto. Nel caso di un numero n di campioni estratti troppo limitato, il semplice campionamento casuale non garantisce una buona distribuzione spaziale. Nel campionamento sistematico un *pixel* iniziale viene estratto (con probabilità $1/N$) e, a partire da questo, viene scelto un *pixel* ogni K sia in direzione orizzontale, sia in direzione verticale. Il campionamento sistematico deve il suo successo alla semplicità di implementazione ed alla buona copertura spaziale.

La matrice di confusione

Il calcolo dell'accuratezza globale viene fatto attraverso l'elaborazione di una matrice di confusione all'interno della quale si confrontano i *pixel* classificati con i *test sample* corrispondenti. La matrice di confusione è composta da n colonne ed n righe (n rappresenta il numero delle categorie o delle classi della mappa).

Convenzionalmente le colonne rappresentano i dati del riferimento (verità), mentre le righe i dati della classificazione (vedi Tabella E.2). Gli elementi sulla diagonale principale rappresentano i casi di accordo tra classificazione e verità, mentre gli elementi al di fuori costituiscono gli errori.

La matrice riassume e quantifica i possibili errori di *Omissione* e *Commissione* per singole classi. Gli errori di *Omissione* corrispondono ai *pixel* sicuramente appartenenti ad una certa classe che il classificatore ha ommesso di inserire in quella classe, gli errori di *Commissione* derivano invece dall'inclusione nella stessa classe di *pixel* appartenenti ad altre classi.

		Dati di riferimento (colonne)				Totale nella classificazione
		1	2	...	q	
Dati di classificazione (righe)	1	p_{11}	P_{21}	...	p_{1+}	p_{1+}
	2	p_{21}	P_{22}	...	p_{1+}	p_{2+}

	q	p_{q1}	p_{q2}	...	p_{1+}	p_{q+}
Totale per classe nella classificazione		p_{+1}	P_{+2}	...	p_{+q}	

● Tabella E.2 Esempio di matrice di confusione.

Il generico elemento p_{ij} appartenente alla diagonale esprime il numero di *pixel* classificati in accordo con lo standard delle verità a terra, mentre quelli esterni alla diagonale esprimono le situazioni di errore. La matrice di confusione rappresenta il punto di partenza per la costruzione di una serie di misure di accuratezza di tipo descrittivo ed analitico.

Accuratezza Globale (Overall Accuracy OA)

La più semplice misura di statistica descrittiva è l'Accuratezza Globale AG (Overall Accuracy, OA):

$$AG = \frac{\sum_{k=1}^q p_{kk}}{N}$$

AG esprime il rapporto tra il totale degli accordi (somma degli elementi della diagonale) e il totale delle osservazioni N . L'Overall Accuracy è quindi la probabilità che, preso un

generico punto sulla mappa, esso sia correttamente classificato. Dalla sola OA non è possibile tuttavia ricavare informazioni sulla distribuzione degli eventuali errori fra le classi e, di conseguenza, su quanto la mappatura di ciascuna classe sia affidabile.

Gli indici di accuratezza delle singole classi

La matrice di confusione, mostrando il numero di campioni correttamente classificati per ciascuna classe, permette di ricavarne gli indici sintetici. Tuttavia in questo caso si hanno due possibili alternative: valutare quale sia la probabilità che, preso un *pixel* appartenente alla generica classe *i* sulla mappa, esso corrisponda alla stessa classe nella realtà, oppure, procedendo in maniera complementare, quale sia la probabilità che, preso un punto appartenente alla classe *i* nella realtà, esso sia stato classificato come classe *i*. L'accuratezza si ottiene dividendo il numero di *pixel* corretti p_{kk} per il totale della riga di riferimento p_{k+} o per il totale della colonna p_{+k} . Se si sceglie il rapporto fra i totali dei *pixel* corretti di una classe e il numero totale di *pixel* di quella classe presenti nel riferimento (totale di colonna, p_{+k}) si ha la *Producer's Accuracy*:

$$AP = \frac{p_{kk}}{p_{+k}}$$

L'utente che realizza la classificazione è interessato a sapere in quale proporzione il suo classificatore ha riconosciuto correttamente una certa classe *k* presente nella mappa. Questa misura indica la probabilità che un *pixel* del riferimento sia classificato correttamente. Essa è associata agli errori di *Omissione*, cioè al numero di *pixel* appartenenti realmente ad una classe che il classificatore non riconosce. In pratica si rifiuta ciò che è vero (errore del 1° tipo).

$$\text{Errore di Omissione} = 100 - AP \quad [\%]$$

Se invece si sceglie il rapporto tra il totale dei *pixel* corretti di una classe e il numero totale di *pixel* che sono stati assegnati a quella classe dalla classificazione (totale delle righe, p_{k+}) si ha la *User's Accuracy*:

$$AU = \frac{p_{kk}}{p_{k+}}$$

All'utente, che non conosce la verità, interessa sapere in quale proporzione le aree indicate sulla mappa tematica come appartenenti ad una classe, corrispondano "veramente" a quella classe. Questa misura di accuratezza indica la probabilità che un *pixel*, indicato come appartenente ad una classe nella mappa tematica, appartenga realmente a tale classe nel riferimento. Essa risulta associata agli errori di *Commissione*. In pratica si accetta ciò che è falso (errori del 2° tipo).

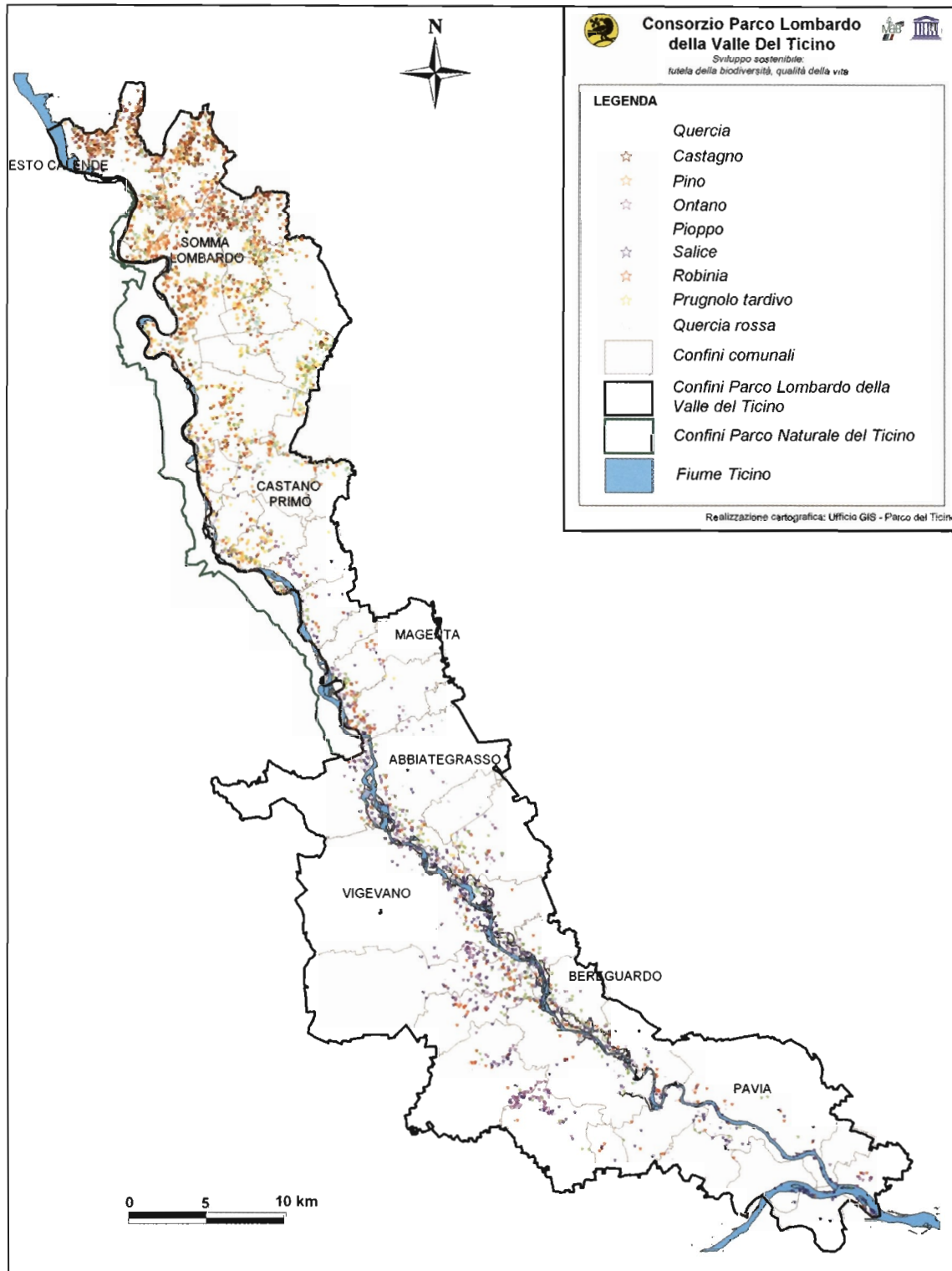
$$\text{Errore di Commissione} = 100 - AU \quad [\%]$$

Gli elementi sulle righe, fuori dalla diagonale, sono gli errori di commissione o di inserimento, sono cioè i *pixel* che per verità appartengono alla classe *B* e *C*, ma il classificatore erroneamente inserisce come membri della classe *A*. Analogamente gli elementi sulle colonne, fuori dalla diagonale, sono gli errori di omissione ed esclusione, cioè i *pixel* che appartengono per verità alla classe *A* ma vengono impropriamente sottratti non essendo riconosciuti tali dal classificatore che li assegna invece alle classi *B* e *C*. Naturalmente più sono elevati i valori di *AP* e *AU* e maggiore sarà l'accuratezza totale *AG*.

4.2 Validazione quantitativa della mappa

Schema di campionamento

La mappa della vegetazione arborea del Parco del Ticino si caratterizza per una elevata eterogeneità spaziale e per un elevato numero di classi. Di conseguenza ambedue gli schemi di campionamento più semplici (Casuale o Sistemático) non garantirebbero a priori una distribuzione numerica dei campioni omogenea fra le classi d'interesse.



● **Figura 92** Distribuzione dei punti di test estratti per la validazione della mappa

Per tale motivo si è scelto di utilizzare un campionamento casuale stratificato. La stratificazione è una partizione della popolazione tale da assegnare ciascun elemento della popolazione ad uno (ed uno soltanto) strato. Il campionamento procede poi indipendentemente all'interno di ciascuno strato.

Nella strategia adottata il risultato della classificazione è stato utilizzato come base della stratificazione, considerando ciascuna specie come uno strato. All'interno di ciascuno strato sono stati estratti N campioni in maniera casuale.

Il *dataset* di validazione, generato secondo lo schema di campionamento casuale stratificato, è composto da un totale di 600 punti, così distribuiti fra le specie:

- Castagno: 60; ● Esotiche accorpate: 180; ● Ontano: 80;
- Pino: 60; ● Pioppo: 80; ● Quercia: 80; ● Salice: 60.

Ciascun punto è stato singolarmente classificato dal fotointerprete. Quando non è stato possibile assegnare il *pixel* univocamente ad una classe, il punto è stato scartato.

La Figura 92 mostra la distribuzione dei punti di test estratti per la validazione della mappa.

Matrice di confusione ed indici di accuratezza

Dei 600 punti verificati dal fotointerprete, 297 punti sono risultati non classificabili; una prima analisi dei restanti 303 fornisce la matrice XYZ1 (Tabella 3), che, espressa in termini percentuali si trasforma nella matrice XYZ2 (Tabella 4):

		Dati di riferimento							Totale
		Castagno	Esotiche	Ontano	Pino	Pioppo	Quercia	Salice	
Dati di classificazione	Castagno	27	4	1	0	0	2	0	34
	Esotiche	2	66	7	1	3	7	0	86
	Ontano	0	6	25	0	3	1	0	35
	Pino	0	1	0	37	2	1	0	41
	Pioppo	0	5	0	0	28	5	6	44
	Quercia	0	7	1	0	1	21	0	30
	Salice	0	2	1	0	4	0	26	33
	Totale	29	91	35	38	41	37	32	303

● Tabella 3 Matrice XYZ1

		Dati di riferimento							Totale
		Castagno	Esotiche	Ontano	Pino	Pioppo	Quercia	Salice	
Dati di classificazione	Castagno	8,91%	1,32%	0,33%	0,00%	0,00%	0,66%	0,00%	11,22%
	Esotiche	0,66%	21,78%	2,31%	0,33%	0,99%	2,31%	0,00%	28,38%
	Ontano	0,00%	1,98%	8,25%	0,00%	0,99%	0,33%	0,00%	11,55%
	Pino	0,00%	0,33%	0,00%	12,21%	0,66%	0,33%	0,00%	13,53%
	Pioppo	0,00%	1,65%	0,00%	0,00%	9,24%	1,65%	1,98%	14,52%
	Quercia	0,00%	2,31%	0,33%	0,00%	0,33%	6,93%	0,00%	9,90%
	Salice	0,00%	0,66%	0,33%	0,00%	1,32%	0,00%	8,58%	10,89%
	Totale	9,57%	30,03%	11,55%	12,54%	13,53%	12,21%	10,56%	100,00%

● Tabella 4 Matrice XYZ2

Gli indici di accuratezza (*Overall Accuracy*, *User's Accuracy*, *Producer's Accuracy*) non possono essere ricavati direttamente da questa matrice, perché essi richiedono che la probabilità di campionamento sia la stessa per ciascun elemento della matrice di confusione. Avendo adottato un campionamento stratificato, la frequenza di

campionamento è invece diversa per ciascuna classe, ovvero per ciascuna colonna della tabella XYZ. Se calcolassimo gli indici di accuratezza direttamente dalla matrice XYZ2, alcune classi (quelle con maggiore frequenza di campionamento) sarebbero sovrarappresentate mentre le classi con minore frequenza di campionamento sarebbero sottorappresentate. Compensando la frequenza di campionamento si ottiene la matrice XYZ3 (Tabella 5):

		Dati di riferimento							Totale
		Castagno	Esotiche	Ontano	Pino	Pioppo	Quercia	Salice	
Dati di classificazione	Castagno	3,66%	0,54%	0,14%	0,00%	0,00%	0,27%	0,00%	4,61%
	Esotiche	0,93%	30,53%	3,24%	0,46%	1,39%	3,24%	0,00%	39,79%
	Ontano	0,00%	1,25%	5,22%	0,00%	0,63%	0,21%	0,00%	7,31%
	Pino	0,00%	0,24%	0,00%	8,89%	0,48%	0,24%	0,00%	9,86%
	Pioppo	0,00%	1,13%	0,00%	0,00%	6,31%	1,13%	1,35%	9,92%
	Quercia	0,00%	5,68%	0,81%	0,00%	0,81%	17,05%	0,00%	24,35%
	Salice	0,00%	0,25%	0,13%	0,00%	0,51%	0,00%	3,28%	4,17%
	Totale	4,58%	39,63%	9,53%	9,36%	10,12%	22,13%	4,64%	100,00%

● Tabella 5 Matrice XYZ3

Dalla matrice XYZ3 è finalmente possibile stimare l'accuratezza complessiva della classificazione:

$$\text{Overall Accuracy} = 75\%$$

Per le singole classi si ottengono i seguenti valori di User's e Producer's Accuracy (Tabella 6):

Classi	PA	UA
Castagno	79%	80%
Esotiche	77%	77%
Ontano	71%	55%
Pino	90%	95%
Pioppo	64%	62%
Quercia	70%	77%
Salice	79%	71%

● Tabella 6
Valori di Producer's Accuracy (PA)
e User's Accuracy (UA) per le singole classi



● Capitolo 5 Conclusioni

Questo progetto è stato realizzato nell'arco di oltre un anno e mezzo, cioè tra marzo 2003 e novembre 2004. Si riporta nella Tabella 7 un riepilogo delle tempistiche, che danno un'idea dell'impegno che è stato necessario per lo sviluppo delle diverse fasi del lavoro.



	Mar 03	Apr 03	Mag 03	Giu 03	Lug 03	Ago 03	Sett 03	Ott 03	Nov 03	Dic 03	Gen 04	Feb 04	Mar 04	Apr 04	Mag 04	Giu 04	Lug 04	Ago 04	Sett 04	Ott 04	Nov 04	
1. Identificazione ed analisi dei problemi	■	■	■	■	■																	
2. Analisi dei dati pregressi		■	■	■																		
3. Acquisizione dei dati (sorvolo aereo)					■																	
4. Rilievi di campo		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
5. Preelaborazioni (correzione geometrica ed atmosferica)							■	■	■	■												
6. Definizione dell'algoritmo di classificazione più idoneo e prove di classificazione									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
7. Elaborazione dei rilievi di campo, fotointerpretazione e generazione del set di <i>training</i>												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8. Classificazione delle immagini												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
9. Verifica dell'accuratezza																					■	■
10. Produzione cartografica																					■	■
11. Produzione documentazione finale																					■	■

● **Tabella 7 Fasi operative del lavoro e tempistiche**

Si possono impostare le considerazioni conclusive su due piani distinti:

- un piano tecnico - operativo, per un'analisi del valore aggiunto che i risultati del lavoro garantiranno al Parco,
- un piano maggiormente improntato sugli aspetti scientifici del progetto.

Per quanto riguarda l'impatto che il lavoro potrà avere sulle prossime attività dell'Ente, si può sottolineare che:

- una prima analisi del grado di affidabilità delle mappe prodotte fa ritenere ipotizzabile un loro impiego come informazioni tematiche di base per la realizzazione del prossimo Piano di Indirizzo Forestale.
- come descritto nel Paragrafo 2.4, "Ricerca delle verità a terra", nel corso del lavoro è stato portato a compimento un percorso virtuoso di crescita nelle interazioni fra

tecnici forestali e tecnici GIS - Telerilevamento. A partire dalle difficoltà iniziali, principalmente attribuibili allo scarso grado di comprensione delle rispettive problematiche, si è giunti alla definizione di una procedura operativa ottimale per l'acquisizione dei dati a terra necessari nell'elaborazione di dati telerilevati iperspettrali finalizzata a studi di carattere forestale. **Il grado di professionalità maturato nel corso di quest'esperienza si rivelerà di fondamentale importanza nelle future attività di monitoraggio della componente boschiva del territorio del Parco mediante tecniche di Telerilevamento;**

- il ciclo di vita dei dati acquisiti dal sensore MIVIS sul territorio del Parco non si esaurisce con le mappe di distribuzione delle specie arboree allegata a questo testo. Il Parco dispone oggi di un dataset georeferenziato di dati iperspettrali ad alta risoluzione geometrica. Grazie alle competenze maturate nel corso del progetto dal personale dell'Ente, tale dataset potrà essere ulteriormente impiegato in campo forestale per diverse applicazioni:
 - indagini di maggior dettaglio specifico rispetto a quelle condotte in questo progetto, su aree di limitata estensione;
 - progressivo aggiornamento della cartografia prodotta, nell'eventualità di un miglioramento dell'accuratezza e della numerosità dei dati di training a disposizione;
 - lettura, per via fotointerpretativa, di elementi attributivi delle particelle forestali che non sono derivabili attraverso procedure di elaborazione automatica.
- E' inoltre opportuno sottolineare che il lavoro qui esposto ha garantito al Parco la possibilità di collaborare con due importanti centri di ricerca italiani nel campo del *remote sensing*: il Reparto Telerilevamento dell'IREA-CNR di Milano ed il gruppo di Telerilevamento del DISAT dell'Università di Milano Bicocca. Tali centri potranno svolgere un ruolo di supporto fondamentale in altri progetti sperimentali o applicativi (non solo in campo forestale) nei quali il Parco intenderà impiegare il dataset MIVIS a propria disposizione.
- per le esigenze del progetto, il Parco ha avuto l'occasione di dotarsi di un ricevitore GPS a precisione sub-metrica (vedi Scheda di Approfondimento C). L'utilizzo di tale strumentazione sta ormai divenendo una consuetudine operativa in tutti i rilievi a terra condotti dai forestali. In prospettiva, ciò garantirà all'Ente di disporre di informazioni di carattere forestale con un elevato grado di accuratezza geografica, condizione fondamentale in boschi ad elevatissima eterogeneità come quelli del Parco del Ticino;
- **le mappe di distribuzione della classe Quercio - Carpineto verranno ora impiegate quale input in un progetto che il Parco sta conducendo, in collaborazione con il gruppo di Telerilevamento del DISAT dell'Università di Milano Bicocca, per lo studio dei fenomeni di deperimento della Farnia.**

Per quanto riguarda gli aspetti scientifici del lavoro, è opportuno evidenziare che:

- la metodologia operativa adottata per la classificazione del dato risulta dal compromesso fra due esigenze: quella di adottare una procedura ripetibile in modo agevole dal personale tecnico del Parco e quella di risolvere un problema complesso quale la discriminazione di dieci differenti specie arboree sfruttando appieno la risoluzione spettrale e geometrica del dato MIVIS;
- **per estensione del territorio boschivo indagato e per dettaglio specifico della legenda, questo lavoro rappresenta, nel panorama italiano, una delle più importanti esperienze nell'impiego di dati telerilevati iperspettrali ad elevata risoluzione geometrica per la mappatura delle specie arboree.**

Glossario

● **Coefficiente di variazione:** indice di dispersione che permette di confrontare misure di fenomeni riferite a unità di misura differenti, in quanto si tratta di un numero puro. Viene definito, per un dato campione, come il rapporto tra la sua deviazione standard (σ) e il valore assoluto della sua media aritmetica (μ):

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu|}$$

Per un campione con un numero finito n di esemplari x_1, x_2, \dots, x_n , è dato dall'espressione:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{|\mu|} - 1 \right)^2}$$

● **Composizione FC (falso colore):** una composizione a falsi colori standard è ottenuta rappresentando in blu, verde, rosso rispettivamente le immagini riprese nelle bande verde, rosso e infrarosso. L'effetto ottenuto è lo stesso di una fotografia scattata con una pellicola infrarosso falso colore; in questo tipo di pellicola i colori reali che la impressionano restituiscono colori diversi, come rappresentato nello schema seguente:

Colori reali	Colori falsi restituiti
Blu	(non restituito)
Verde	Blu
Rosso	Verde
Infrarosso	rosso

● **Composizione RGB (a colori reali):** una composizione a colori reali è ottenuta rappresentando in blu, verde, rosso le immagini riprese appunto nelle bande blu, verde, rosso. L'effetto ottenuto è lo stesso di una fotografia scattata con una pellicola normale, i colori sono del tutto simili a quelli osservati dall'occhio umano (colori reali).

● **Dato vettoriale:** i dati vettoriali sono oggetti grafici che vengono memorizzati in base alle coordinate cartesiane dei punti e linee che li compongono.

● **Digital number:** numero intero positivo associato al pixel dell'immagine che rappresenta la radianza media misurata su una piccola area, o cella elementare di risoluzione, o, più in generale, la grandezza misurata.

● **Dispositivi a scansione:** per esplorazione a scansione si intende l'osservazione ordinata di una superficie, in genere per righe parallele, l'una susseguente all'altra fino alla completa ricopertura della superficie stessa. Il dispositivo a scansione (scanner) è una macchina adatta alla ripresa di superfici in una o più bande dello spettro elettromagnetico (visibile e IR).

● **Firma spettrale:** funzione che rappresenta la riflessione ed emissione di una qualunque superficie nei diversi intervalli di lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico

(visibile, IR vicino, medio e termico). La percentuale dell'energia radiante incidente che viene riflessa o emessa da una superficie dipende dalla sua struttura geometrica, dalla sua natura e composizione. La curva di riflettanza spettrale (firma spettrale) è caratteristica propria di ogni superficie.

● **Immagine digitale:** un'immagine digitale (numerica) è un insieme di elementi discreti organizzati per righe e colonne, cioè una matrice: ad ognuno di tali elementi detti pixel è associato un *Digital Number* (DN). Ogni pixel risulta così caratterizzato da una terna di valori (X, Y, DN), dove X e Y sono i numeri di riga e colonna che individuano la sua posizione all'interno dell'immagine e I è un livello di grigio correlato all'intensità della proprietà fisica proveniente dal suolo. Un'**immagine digitale multispettrale** risulta costituita da un numero di matrici, tante quante sono le bande del sensore che le ha acquisite. Ogni pixel risulta quindi caratterizzato da valori (DN1, DN2, ..., DNn) tanti quanti sono le bande spettrali, oltre alle sue coordinate immagine (posizione del pixel). Un'**immagine digitale iperspettrale** è costituita da un numero ancora maggiore di matrici, perché le bande di acquisizione sono numerose e poco distanziate tra loro. È possibile quindi associare ad ogni pixel una firma spettrale della superficie esaminata.

● **Immagine raster:** vedi *immagine digitale*.

● **Irradianza:** flusso radiante incidente su una superficie. Si misura in Watt/mq.

● **Lunghezza d'onda (λ):** distanza che separa due picchi adiacenti di un'onda; generalmente è espressa in micron.

● **Frequenza (ν):** numero di picchi d'onda che passano in un dato punto in un dato tempo; normalmente è espressa in hertz (Hz) o cicli al secondo.

● **Mosaicatura:** è l'insieme di operazioni che consente di unire tra loro più mappe in formato digitale per realizzare una continuità territoriale.

● **Pixel:** contrazione di *picture element*, è il componente elementare di un'immagine raster caratterizzato da un valore associato.

● **Radianza:** flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido, per una data direzione e misurato su un piano perpendicolare alla direzione data. Si misura in Watt/(mq*ste).

● **Radiazione elettromagnetica:** la radiazione EM è una delle forme di trasferimento di energia che si manifesta sia con le proprietà di un'onda che di corpuscoli. In accordo con la teoria ondulatoria, essa può essere descritta come un'onda piana armonica che si propaga nello spazio vuoto, e consiste di due campi di forza, elettrico e magnetico, ortogonali tra loro e rispetto alla direzione di propagazione. Si ha:

$$\lambda \nu = c$$

dove c è la velocità della luce (circa 300 000 km/s), λ la lunghezza d'onda, ν la frequenza. Queste proprietà ondulatorie rappresentano l'interazione energia-materia su scala macroscopica.

- **Riflettanza:** rapporto tra l'energia riflessa da una superficie e quella incidente; è una grandezza dimensionale compresa tra zero e uno.
- **Risoluzione geometrica:** corrisponde alla dimensione del *pixel* al suolo, ossia alla proiezione dell'elemento sensibile del sensore sulla superficie terrestre.
- **Risoluzione radiometrica:** energia minima rilevabile del sensore, in grado di produrre un segnale distinguibile dal rumore.
- **Risoluzione spettrale:** ampiezza dell'intervallo di lunghezza d'onda cui è sensibile lo strumento.
- **Risoluzione temporale** (per i satelliti): intervallo di tempo tra due passaggi sulla medesima zona.
- **Scanner iperspettrale:** gli scanner iperspettrali esplorano la stessa scena contemporaneamente in più bande dello spettro utilizzando un prisma di rifrazione per separare le varie lunghezze d'onda. I singoli rivelatori trasducono in segnale elettrico solo la parte dello spettro di rifrazione in uscita dal prisma ove essi sono materialmente disposti. Il registratore magnetico che raccoglie i segnali elettrici di scansione dovrà avere un numero di canali pari almeno al numero di rivelatori.
- **Energia radiante:** energia trasportata dalle onde elettromagnetiche. Si misura in Joule.
- **Flusso radiante o potenza radiante:** quantità di energia radiante trasferita da un punto o da una superficie, ad un'altra superficie nell'unità di tempo. Si misura in Watt.
- **Riflettività:** rapporto tra energia riflessa da una superficie e quella incidente. È una grandezza adimensionale compresa tra 0 e 1.
- **Varianza:** è un indice di dispersione. È nulla solo nei casi in cui tutti i valori sono uguali tra di loro (e pertanto uguali alla loro media) e cresce con il crescere delle differenze reciproche dei valori. Viene solitamente indicata con σ^2 (dove σ è la deviazione standard). La formula di base è:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

dove μ rappresenta la media aritmetica dei valori x_i . Trattandosi di una somma di valori (anche negativi) al quadrato, è evidente che la varianza non sarà mai negativa.

Bibliografia

- AA.VV (2002), *"I Parchi del Piemonte - Ambiente e Itinerari"*, Edizioni l'Arciere, pp.112, 115.
- AA.VV. (2001), *"Monitoraggio dello stato di salute della vegetazione boschiva mediante tecniche di telerilevamento all'Infrarosso Falso Colore"*, Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino.
- AA.VV. (2001), Numero Speciale della Rivista italiana di Telerilevamento dedicato alle applicazioni del sensore MIVIS, n° 20-21 Settembre 2000 - Gennaio 2001.
- AA.VV. (2002), *"Monitoraggio della componente ecosistemi dell'area di Malpensa"*, Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino.
- Aspinall R. J. (2002), *"Use of Logistic regression for valisation of maps of the spatial distribution of vegetation species derived from high spatial resolution hyperspectral remotely sensed data"* Ecological Modelling 157 (2002) 301-312.
- Bianchi et al. (1999), *"I dati iperspettrali Mivis per la classificazione dei biotipi forestali nel Parco di Carrega (Parma)"*. Atti ASITA- Napoli 9-12 Novembre
- Binaghi E., Gallo I., Boschetti M., Brivio P. A. (2004), *"A Neural Adaptive Model for hyperspectral data classification under minimal training conditions"*; PROCEEDINGS OF SPIE Remote Sensing 2004, 13-16 September 2004 Maspalomas, Gran Canaria, Canary Islands, Spain.]
- Boschetti M., Canova I., Furlanetto D. , Bianchi A., Castrovinci R. (2002), *"Utilizzo di dati MIVIS a supporto della gestione forestale: mappatura delle specie esotiche nei boschi del Parco del Ticino"* ; Proceedings VI Conferenza Nazionale ASITA Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale, Perugia, 5-8 novembre 2002, vol. I pp. 505-510.
- Brivio P.A. (1999), *"Approcci non convenzionali alla classificazione delle immagini nel telerilevamento"*, Rivista Italiana di Telerilevamento n.16 - Maggio 1999.
- Brivio P.A., R. Tomasoni e E. Zilioli (1993), *"Il Telerilevamento delle caratteristiche strutturali e funzionali delle comunità acquatiche e terrestri"*, pp. 434-467. In Ecologia Applicata, R. Marchetti (editor), Edizioni CittàStudi, Milano.
- Cavalli et al. (2001), *"Dati iperspettrali Telerilevati per la gestione di Riserve Naturali della Provincia di Roma"* Atti ASITA- Rimini 9-12 Ottobre.
- Colombo R., Boschetti M., Giardino C., Meroni M., Panigada C., Busetto L., Brivio P. A., Marino C. M., Seufert G. M. (2002), *"Osservazioni remote iperspettrali e multiangolari per la stima dei parametri biofisici della vegetazione: parte I - progettazione dell'esperimento e analisi dei dati. AITinforma"* - Rivista Italiana di Telerilevamento, 24, pp. 5-13.
- Dillon W.R. and Goldstein M. (1984), *"Multivariate analysis Methods and application"*, Wiley, New York.
- ESRI (1995), *"ARC/INFO. Readlands,"* CA: Environmental System Reseach Institute.
- Ferrarini A., Rossi P., Zaccarelli N. (2001), *"Mappature vegetazionali ad elevata accuratezza: la metodologia delle reti neurali applicata ai dati iperspettrali MIVIS"*, Rivista italiana di Telerilevamento, n. 22 Maggio 2001.

- Ferrarini A., Rossi. P., Zaccarelli N. (2000), "Un classificatore efficiente di dati iperspettrali per la mappatura territoriale: CART (Classification And Regresion Trees)", *Rivista italiana di Telerilevamento*, n. 22 Maggio 2001.
- Foody G.M. (1995), "Land cover classification by an artificial neural network with ancillary information", *International Journal of Geographical Information Systems*, 9: 527-542.
- Furlanetto D., Manfredi N., Trotti F. (2005) "La rete ecologica del Parco del Ticino", *Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino*.
- Harvath R., Braithwaite J. C., Polcyn F. C. (1970), "Effects of atmospheric path on airborne multispectral sensor", *Remote Sensing of Environment*, 1:203-215.
- Hutchinson M.F. (1989), "A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits". "Journal of Hydrology", 106, pp. 211-232.
- Jensen J.R (1996), "Introductory digital image processing. A remote sensing perspective", second edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kaufman Y. J. (1989), "The atmospheric effect on remote sensing and its corrections". In *Theory and applications of optical remote sensing*, edited by Ghassem Asrar (N.A.S.A., Washington D.C), pp.336-428.
- Kennedy P.J. (1997), EUR 17685 - "Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring", *Proceedings International Workshop, University of Agriculture Science (Boku), Vienna, Austria, 14-16 Ottobre 1996*.
- Kokaly R. F., Despain D.G., Clark R. N., Livo, K. E. (2003), "Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data", *Remote Sensing of Environment* Volume: 84, Issue: 3, March, 2003, pp. 437-456
- Lechi G. (1999), "Dispense del corso di telerilevamento", *Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano , DIIAR, Milano*.
- Martin et al. (1998), "Determining Forest Species Composition Using High Spectral Resolution Remote Sensing Data" *Remote Sens. Environ: 65:249-254*
- McGraw J., Warne T.A, Key T. L., Lamar W. R. (1998), "High spatial resolution remote sensing of forest trees", *TREE* vol. 13, N°8 pp.300-301, August 1998.
- McGwire K., Minor T., Fenstermaker L. (2000), "Hypespectral Mixture Modelling for Quantifying Sparce Vegetation Cover in Arid Environments", *Remote Sens. Environ: 72:360-374 (2000)*
- Reusen, L. Bertels, W. Debruyn, B. Deronde, D. Fransaer, S. Sterckx (2003), "Species Identification and Stress Detection of Heavy-Metal Contaminated Trees", *Conference Spectral Remote Sensing of Vegetation, U.S. EPA Environmental Sciences Division, Las Vegas, Nevada. March 12-14th, 2003*.
- Salvatori R., Grignetti A., Casacchia R., Mandrone S. (2003), "The Role of Spatial Resolution in Vegetation Studies by Hyperspectral Airborne Images", *Conference Spectral Remote Sensing of Vegetation, U.S. EPA Environmental Sciences Division, Las Vegas, Nevada. March 12-14th, 2003*.

Sandmeier, St.; Deering, D.W. (1999), "Structure Analysis and Classification of Boreal Forests Using Airborne Hyperspectral BRDF Data from ASAS" Remote Sensing of Environment Volume: 69, Issue: 3, September, 1999, pp. 281-295

Stehman, S. V. (1999), "Basic probability sampling designs for thematic map accuracy assessment", International Journal of Remote Sensing 20: 2423-2441.

Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Santer R., Vermonte E. (1990), "Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum" - 6S code. IGARSS'90, Washington D.C., p. 187.]

Treitz P., Howarth P. (2000), "High Spatial Resolution Remote Sensing Data for Forest Ecosystem Classification: An Examination of Spatial Scale" Remote Sensing of Environment Volume: 72, Issue: 3, June, 2000, pp. 268-289.

UNECE e EC (1999), Fischer R., De Vries W., Seidling W., Augustin S., Hartmann G., Krause G.H.M., Sanz M.J. - "Stato delle foreste in Europa. Bilancio esecutivo 1999", - ECE-ONU e CE, Bruxelles, Ginevra, 1999. 31pp.

Van Genderen J.L., Lock B.F., Vass P.A. (1978), "Remote Sensing: Statistical Testing of Thematic Map Accuracy", Remote Sens. Environ., 7, 3-14.

Zarco-Tejada P.J, Miller J. (1999), "Land cover mapping at BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery." JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 104, pp. 921-933.

Zilioli E. (1993), "Origini e storia del telerilevamento", Rivista italiana di Telerilevamento, n. 2 Novembre 1993.

Zilioli E. (2000), "TELEA Appunti e spunti di Telerilevamento, elementi di Telerilevamento per gli insegnanti delle scuole medie e i responsabili CREA della Regione Lombardia"; Ed. CNR e Regione Lombardia

Publicazioni tecniche e scientifiche del Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino

- *Progetto "Carta pedologica": I suoli del Parco Ticino. L'Abbiatense, 1991, Ersal - Regione Lombardia e Consorzio Parco Ticino.*
- *Progetto "Carta pedologica": I suoli del Parco Ticino. Settore Settentrionale, 1992, Ersal - Regione Lombardia e Consorzio Parco Ticino.*
- *Progetto "Parco Pulito", 1993, Consorzio Parco Ticino.*
- *Il Ticino: studi e proposte sull'assetto idrogeologico e sull'uso del territorio della valle fluviale, 1994, Consorzio Parco Ticino - Autorità Bacino del Po.*
- *La qualità dell'aria nel Parco Regionale Lombardo della Valle del Ticino. Monitoraggio dell'aria effettuato mediante analisi dei licheni, 1995, Consorzio Parco Ticino.*
- *Progetto "Carta pedologica": I suoli del Parco Ticino. Settore Meridionale, 1996, Ersal - Regione Lombardia e Consorzio Parco Ticino.*
- *Strumenti per lo sviluppo dell'agricoltura sostenibile. Esempio di applicazione del Regolamento CEE 2078/92, 1996, Consorzio Parco Ticino, Carrefour.*
- *Gli insediamenti rurali del Parco del Ticino, 1998, Consorzio Parco Ticino.*
- *Le marcite, 1998, Consorzio Parco Ticino.*
- *Il Ticino: studi e proposte sull'assetto idrogeologico e sull'uso del territorio della valle fluviale, 1998, Consorzio Parco Ticino - Autorità Bacino del Po.*
- *Aree demaniali dei fiumi e dei laghi: dall'abbandono alla gestione conservativa, 1999, Consorzio Parco Ticino, Carrefour Lombardia, Commissione Europea, Regione Lombardia.*
- *Atlante della biodiversità nel Parco del Ticino, 1999, Consorzio Parco Ticino.*
- *Ricerca sulla fauna ittica del fiume Ticino, 1999, G.R.A.I.A., Consorzio Parco Ticino.*
- *Monitoraggio della qualità dell'aria mediante licheni nella Valle del Ticino, 2000, Consorzio Parco Ticino.*
- *La qualità delle acque del fiume Ticino, 2001, Consorzio Parco Ticino.*
- *Censimento degli impianti di depurazione presenti nel territorio del Parco del Ticino, 2001, Consorzio Parco Ticino.*
- *Monitoraggio dello stato di salute della vegetazione boschiva mediante tecniche di telerilevamento all'Infrarosso Falso Colore nella Valle del Ticino, 2001, Consorzio Parco Ticino.*
- *Specie esotiche introdotte attraverso gli aeroporti. Analisi dei rischi e delle misure di controllo, 2001, Consorzio Parco Ticino.*

- *La qualità delle acque del fiume Ticino, 2002, Consorzio Parco Ticino.*
- *Monitoraggio della componente ecosistemi nell'area di Malpensa, 2002, Consorzio Parco Ticino.*
- *Valutazione della qualità dell'aria attraverso l'uso di campionatori puntiformi passivi nei Parchi del Ticino, 2002, Consorzio Parco Ticino.*
- *Atlante della biodiversità del Parco del Ticino, 2002. Consorzio Parco Ticino.*
- *Analisi della salute degli animali domestici nei comuni dell'intorno di Malpensa, 2003. Consorzio Parco Ticino.*
- *La migrazione degli uccelli nella Valle del Ticino e l'impatto di Malpensa, 2003. Consorzio Parco Ticino.*
- *Biodiversità animale degli ambienti terrestri nei Parchi del Ticino, 2003. Consorzio Parco Ticino.*
- *Il fiume Ticino e i suoi principali affluenti. Indagine sulla qualità delle acque, 2003. Consorzio Parco Ticino.*
- *La reintroduzione del capriolo nel Parco del Ticino, 2003. Consorzio Parco Ticino.*
- *Il fiume Ticino e i suoi principali affluenti. Indagine sulla qualità delle acque e sull'individuazione degli impatti antropici, anno 2003. 2004. Consorzio Parco Ticino.*
- *La depurazione delle acque reflue nei Parchi del Ticino. Censimento degli impianti di depurazione civili ed industriali, 2004. Consorzio Parco Ticino.*
- *Un paesaggio che scompare. L'area del corridoio ecologico di Cascina Tangitt: la storia e i nuovi scenari, 2005. Consorzio Parco Ticino.*
- *La rete ecologica del Parco del Ticino, 2005. Consorzio Parco Ticino.*

La redazione raccomanda per la citazione bibliografica
di questo volume la seguente dizione:

Boschetti M. et al., *Mappatura delle specie arboree del Parco del Ticino
mediante Telerilevamento iperspettrale*, 2005.
Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino.

Il contenuto anche parziale della presente pubblicazione
può essere riprodotto solo citando il nome degli autori, il titolo del lavoro
e il Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino.