



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
Tuscia

VITERBO
FACOLTÀ DI AGRARIA
DIPARTIMENTO DI PROTEZIONE DELLE PIANTE

DOTTORATO DI RICERCA IN PROTEZIONE DELLE PIANTE
- XXI CICLO -
AGR\12

**TECNICHE DI REMOTE SENSING, GIS E GEOSTATISTICA
APPLICATE ALLA MAPPATURA ED ALL'EPIDEMIOLOGIA
DEL MAL DELL'INCHIOSTRO DEL CASTAGNO**

Dottoranda

Dott.^{ssa} Giuseppina Natili

Giuseppina Natili

Coordinatore

Prof. Leonardo Varvaro

Leonardo Varvaro

Tutore

Prof. Andrea Vannini

Andrea Vannini

Cotutore

Dott.^{ssa} Anna Maria Vettraino

Anna Maria Vettraino

... .. *ad Ambra*

INDICE

1	INTRODUZIONE	p.	1
1.1	Telerilevamento	p.	1
1.1.1	Storia del telerilevamento	p.	1
1.1.2	Definizione di telerilevamento	p.	2
1.1.3	Spettro elettromagnetico	p.	2
1.1.4	Firma spettrale	p.	4
1.1.5	Sensori remoti e immagini digitali	p.	7
1.1.6	Classificazione delle immagini	p.	10
1.1.7	Indici di vegetazione (IV)	p.	11
1.1.8	Applicazioni del telerilevamento	p.	13
1.1.9	Validazione dei dati telerilevati	p.	14
1.2	GPS	p.	16
1.3	GIS	p.	18
1.3.1	Storia dei GIS	p.	18
1.3.2	Tecnologia GIS	p.	18
1.3.3	Struttura di un GIS	p.	19
1.3.4	Strutture per la rappresentazione delle carte	p.	20
1.3.5	La struttura vettoriale	p.	21
1.3.6	La struttura raster	p.	21
1.3.7	Modelli digitali del terreno	p.	22
1.3.8	ArcGis Desktop	p.	23
1.3.9	Geostatistica	p.	24
1.4	Il mal dell'inchiostro del castagno	p.	27
1.4.1	Importanza del castagno e principali patologie	p.	27
1.4.2	Cenni storici	p.	28
1.4.3	Sintomatologia	p.	30
1.4.4	Distribuzione della malattia	p.	31
1.4.5	Considerazioni epidemiologiche	p.	32
1.4.6	Eziologia e ciclo biologico del patogeno	p.	32
1.4.7	Lotta	p.	33
2	OBIETTIVI	p.	35
3	APPLICAZIONE 1	p.	36
3.1	MATERIALI E METODI	p.	37
3.1.1	Monitoraggio aereo delle aree interessata dal mal dell'inchiostro	p.	37
3.1.2	Descrizione dell'area studiata	p.	37
3.1.3	Acquisizione ed elaborazione delle immagini	p.	39
3.1.4	Metodologia per l'individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro	p.	40
3.1.4.1	Ground Activity	p.	40
3.1.4.2	Separabilità delle firme spettrali	p.	42
3.1.4.3	Classificazione tramite l'algoritmo Maximum Likelihood (ML)	p.	43
3.1.4.4	Individuazione delle piante morte	p.	44
3.1.4.5	Individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro	p.	45
3.1.5	Stima dell'accuratezza	p.	45

3.1.6	Produzione delle mappe dei focolai	p.	49
3.1.7	Quantificazione dei focolai	p.	49
3.1.8	Implementazione di strati informativi nel GIS	p.	49
3.1.8.1	Linee di compluvio e rete viaria	p.	49
3.1.9	Elaborazione statistica	p.	50
3.2	RISULTATI	p.	51
3.2.1	Monitoraggio aereo delle aree interessate dal mal dell'inchiostro	p.	51
3.2.1.1	Metodologia per l'individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro	p.	53
3.2.1.2	Stima dell'accuratezza	p.	57
3.2.1.3	Produzione delle mappe dei focolai	p.	60
3.2.1.4	Quantificazione dei focolai	p.	60
3.2.1.5	Implementazione di strati informativi nel GIS	p.	68
4	APPLICAZIONE 2	p.	69
4.1	MATERIALI E METODI	p.	70
4.1.1	Studio della dinamica spazio-temporale tramite la geostatistica	p.	70
4.1.2	Descrizione dell'area studiata	p.	70
4.1.3	Valutazione dei parametri di malattia		70
4.1.4	Analisi di distribuzione e gradiente di malattia	p.	72
4.1.5	Analisi spaziale ed elaborazione degli strati informativi tramite la geostatistica	p.	73
4.1.6	Elaborazione statistica		79
4.2	RISULTATI	p.	80
4.2.1	Analisi di distribuzione e gradiente di malattia	p.	80
4.2.2	Analisi spaziale ed elaborazione degli strati informativi tramite la geostatistica	p.	84
5	DISCUSSIONI E CONCLUSIONI	p.	89
6	BIBLIOGRAFIA	p.	96
7	ALLEGATI	p.	107

1 INTRODUZIONE

Nel campo della ricerca, i sistemi informativi geografici (*Geographic Information System*, GIS) ed il telerilevamento offrono varie opportunità di analisi, fornendo un sostanziale supporto alle decisioni riguardanti problemi di carattere ambientale, compresi gli studi epidemiologici. I GIS possono essere finalizzati anche all'organizzazione ed all'analisi di informazioni di tipo spaziale per una pianificazione modellistica. Con un GIS, quindi, è possibile realizzare un modello interpretativo della realtà, integrando tra loro dati di diversa origine in un comune formato spaziale, così che essi possano essere comparati e presi come riferimento, suggerendo soluzioni per una migliore gestione delle risorse naturali. Questi sistemi sono incentrati su analisi ed elaborazioni territoriali piuttosto che sulla semplice rappresentazione cartografica del territorio (Gomarasca, 1997).

1.1 TELERILEVAMENTO

1.1.1 Storia del telerilevamento

Si può dire che il telerilevamento ebbe inizio nel 1840 quando le mongolfiere acquisirono le prime immagini del territorio con la macchina fotografica appena inventata. La fotografia aerea diventò uno strumento riconosciuto già durante la Prima Guerra Mondiale. L'entrata ufficiale dei sensori nello spazio ebbe inizio con l'inclusione di una macchina fotografica automatica a bordo dei missili tedeschi V-2. Nel 1957 venne lanciato in orbita il primo satellite artificiale, lo Sputnik. Questa innovazione tecnologica rese possibile il montaggio di macchine da ripresa su navicelle in orbita. Dal 1960 su satelliti meteorologici vennero montati sensori che acquisivano immagini in bianco e nero, inoltre altri sensori, sempre a bordo degli stessi satelliti potevano eseguire sondaggi o misure atmosferiche su catene montuose. Nel 1970 iniziò l'acquisizione di immagini della terra con una certa periodicità mediante l'uso di strumenti montati a bordo dello Skylab (e più tardi dello Space Shuttle) e su Landsat, il primo satellite destinato al monitoraggio di terre e oceani al fine di mappare le risorse naturali. Nel 1978 un sofisticato sistema radar, specializzato per lo studio degli oceani, venne montato a bordo del satellite Seasat e negli anni '80 una grande varietà di sensori

specializzati, tra cui CZCS e HCMM, vennero mandati in orbita come progetti di ricerca o fattibilità. Il primo sistema radar non-militare fu lo Shuttle Imaging Radar SIR-A montato dal JPL a bordo dello Space Shuttle nel 1982. Altre nazioni realizzarono poi altri sensori simili o con distinte capacità. A partire dal 1980 il Landsat è stato privatizzato ed in diverse nazioni, tra cui Francia, Stati Uniti, Russia e Giappone, ha avuto inizio un utilizzo più vasto e commerciale del telerilevamento.

1.1.2 Definizione di telerilevamento

Con il termine di telerilevamento si definisce il metodo di osservazione della superficie terrestre e del suo ambiente, dall'atmosfera o dallo spazio, mediante l'utilizzo della radiazione elettromagnetica. Nella sua accezione corrente, questo termine indica non solo l'acquisizione di dati a distanza, ma anche l'insieme dei metodi e delle tecniche per la successiva elaborazione ed interpretazione (Gomarasca, 1997). Da ciò si evince che il telerilevamento è la scienza per mezzo della quale le caratteristiche di un oggetto possono essere identificate, misurate e analizzate senza entrare in contatto diretto con esso.

L'importanza dell'uso delle tecniche di rilevamento a distanza per valutare la vulnerabilità ed il rischio cui il territorio è soggetto è ormai da tempo riconosciuta dalla comunità scientifica. Tali tecniche, infatti, costituiscono uno strumento indispensabile per l'acquisizione sistematica di dati relativi ai più svariati fenomeni naturali. Il telerilevamento è, quindi, uno strumento diagnostico che, nell'ambito della gestione sostenibile del territorio e della conservazione della natura, è in grado di fornire delle informazioni riguardanti la vegetazione in modo distribuito nello spazio (mediante la creazione di mappe) e nel tempo (attraverso il monitoraggio). I prodotti finali, ottenuti dall'interpretazione dei dati spettrali, sono spesso delle carte tematiche che caratterizzano il territorio studiato suddividendolo in aree omogenee rispetto a certe fenomenologie.

1.1.3 Spettro elettromagnetico

Le reazioni che avvengono all'interno del sole danno origine, in accordo con la legge del corpo nero di Plank, ad uno spettro complesso di energia elettromagnetica, che arriva sulla terra attenuato dai fenomeni di riflessione, diffusione e assorbimento dovuti

all'atmosfera. Si definisce spettro elettromagnetico l'insieme continuo delle onde elettromagnetiche ordinate in funzione della loro frequenza, lunghezza o numero d'onda. Un'onda elettromagnetica è caratterizzata dalla lunghezza d'onda (λ), ossia dalla distanza tra due massimi o due minimi di un'onda (Figura. 1); dalla frequenza (ν), definita dal numero di onde complete che passano per un punto nell'unità di tempo; e dal periodo (T), cioè dal tempo necessario affinché un'onda completa passi per un punto ($T = 1/\nu$).

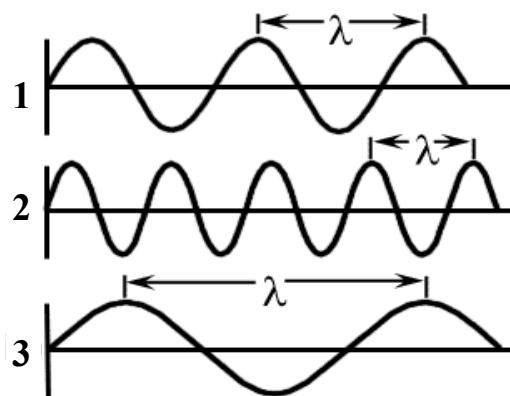


Figura 1: rappresentazione di tre diverse onde elettromagnetiche con diverse lunghezze d'onda

Per convenzione lo spettro elettromagnetico è stato suddiviso, in funzione della lunghezza d'onda, in regioni o bande spettrali, partendo dalle lunghezze d'onda minori (raggi gamma) fino alle onde radio. La regione del visibile (compresa tra $0.4 \mu\text{m}$ e $0.7 \mu\text{m}$) comprende le lunghezze d'onda percepite dall'occhio umano ed è suddivisa in colori. La regione dell'infrarosso (compresa tra $0.7 \mu\text{m}$ e 1 mm) può essere divisa, all'aumentare della lunghezza d'onda, in Near IR (infrarosso vicino), Mid IR (infrarosso medio) e Far IR (infrarosso lontano). In Figura 2 sono mostrate le regioni dello spettro elettromagnetico.

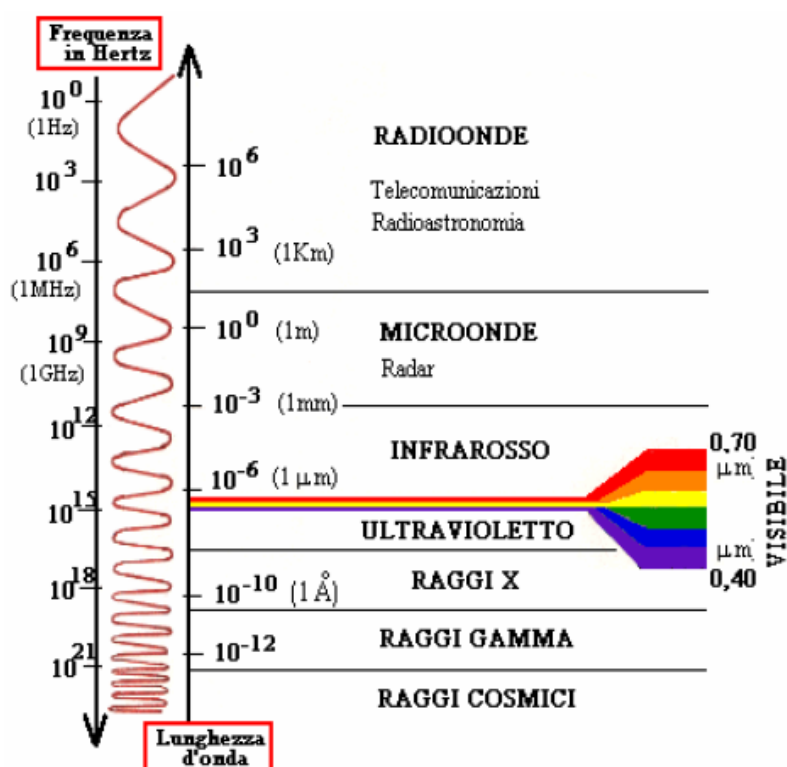


Figura 2: spettro elettromagnetico. (Fonte: Eobem, 2001)

1.1.4 Firma spettrale

La radiazione elettromagnetica riflessa, assorbita e trasmessa da un qualsiasi oggetto varia al variare della lunghezza d'onda. Nel telerilevamento con il termine di riflettanza si indica la percentuale di energia radiante incidente che viene riflessa da un corpo e dipende dal tipo di superficie, dalla natura e dal materiale di cui è composto. Per ogni superficie perciò si può costruire un grafico della firma spettrale o risposta spettrale, caratteristico della superficie stessa, che mette in evidenza le sue capacità di riflessione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente (Figura 3). Ogni tipologia di superficie è quindi caratterizzata da una propria firma spettrale media con un particolare andamento della riflettanza, con valori massimi e minimi localizzati in specifici intervalli di lunghezze d'onda.

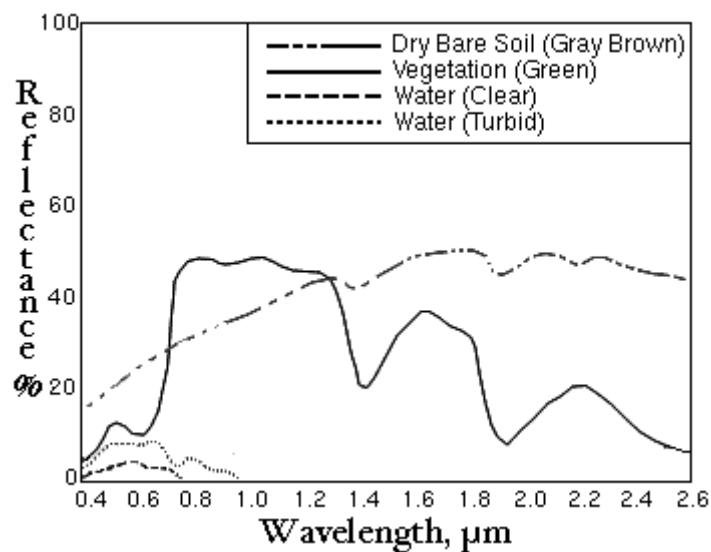


Figura 3: confronto tra le firme spettrali di diverse tipologie di superfici (fonte: www.physics.gatech.edu)

In particolare la curva di riflettanza della vegetazione è caratterizzata da una tipica risposta spettrale in tre regioni ben definite (Figura 4), il cui andamento è regolato, alle varie lunghezze d'onda, da fattori quali i pigmenti fogliari, la struttura fogliare, il contenuto di acqua.

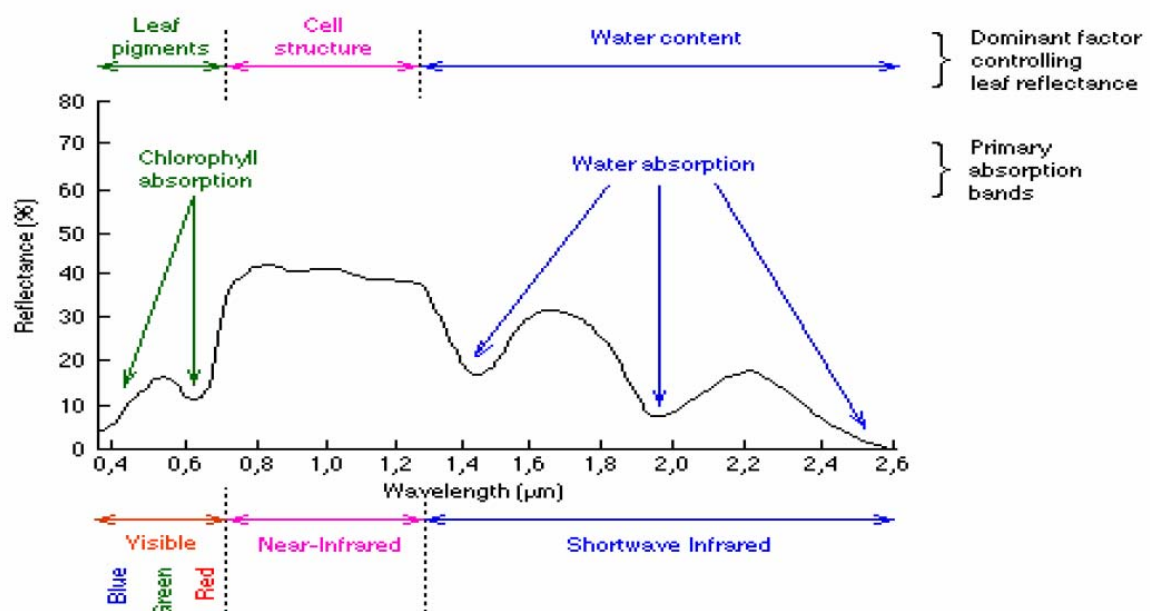


Figura 4: caratteristiche spettrali della vegetazione (Fonte: Floyd, 1978)

Nelle bande del visibile (0.40-0.70 μm), l'assorbimento della luce, ad opera dei pigmenti fogliari, predomina sulla riflettanza. Ci sono due picchi d'assorbimento, nel blu (0.40 $\div$ 0.5 μm) e nel rosso (0.65 $\div$ 0.70 μm), dovuti alla clorofilla presente nelle due forme: a e b, che costituiscono il 65% dei pigmenti totali presenti nelle piante superiori. Questo forte assorbimento, nelle suddette bande determina un picco di riflettanza in corrispondenza del verde, a circa 0.55 μm . Per questa ragione la clorofilla è detta anche pigmento verde. Altri pigmenti secondari, quali i carotenoidi, sono coinvolti nell'assorbimento dell'energia nello spettro del visibile a cui la clorofilla non è sensibile (Brivio et al., 2006).

Nelle bande dell'infrarosso vicino (0,70-1,30 μm), il comportamento spettrale è regolato dalla struttura fogliare intesa come organizzazione spaziale delle cellule delle foglie che varia da una specie all'altra. La radiazione infrarossa non interagisce con i cloroplasti ma è influenzata, appunto, dalla struttura della foglia che provoca una forte riflessione, dell'ordine del 30-70% dell'energia incidente. La porzione di energia residua viene soprattutto trasmessa; quella assorbita è molto poca (Brivio et al., 2006).

Nelle bande dell'infrarosso ad onde corte le proprietà spettrali della vegetazione dipendono dal tenore in acqua della foglia. Si è visto che a 1.4 μm , a 1.9 μm e a 2.6 μm si hanno intensi fenomeni di assorbimento della radiazione da parte dell'acqua. In presenza di stress idrico si misura un abbassamento dei valori di riflettanza (Brivio et al., 2006).

Da queste considerazioni si deduce che la curva di riflettanza può variare in funzione del tipo di vegetazione (a causa della diversa struttura fogliare), della densità, dello stadio fenologico, degli stress idrici, dello stato fitosanitario (Figura 5) a cui può essere soggetta (Gomarasca, 1997).

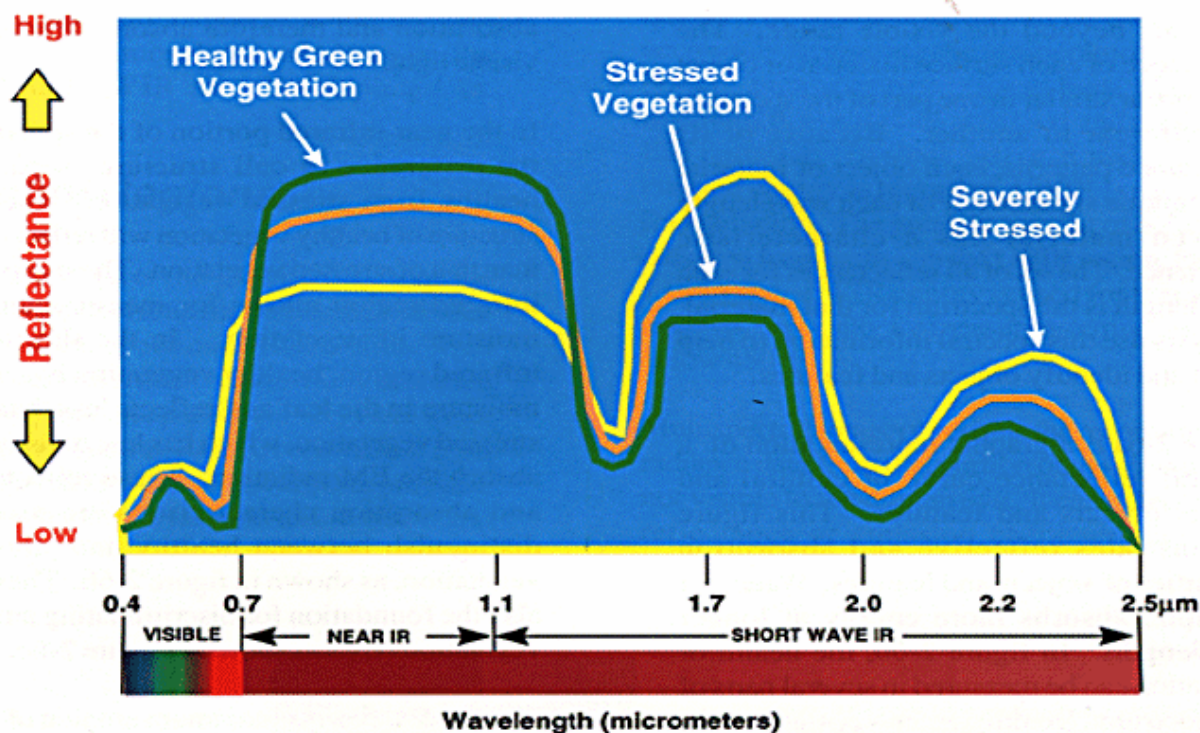


Figura 5: firme spettrali per la vegetazione sana (healthy green vegetation), stressata (stressed vegetation) e fortemente stressata (severely stressed). Nella regione del visibile le diverse firme spettrali appaiono simili; mentre nella regione del vicino infrarosso si differenziano molto tra di loro: la vegetazione sana ha un alto valore di riflettanza che si abbassa sempre più all'aumentare del livello di stress. (Fonte: www.csc.noaa.gov)

1.1.5 Sensori remoti e immagini digitali

Tramite il telerilevamento è possibile studiare la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa da un oggetto e gli strumenti utilizzati per rilevare e quindi analizzare questa radiazione sono i sensori remoti (Figura 6).

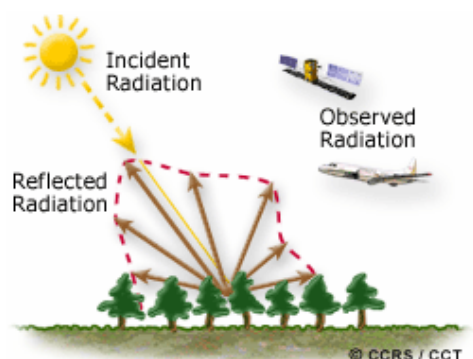


Figura 6: intercettazione da parte dei sensori remoti della radiazione incidente riflessa. (Fonte: www.ccrs.nrcan.gc.ca)

Questi possono essere collocati su piattaforme terrestri, palloni, veicoli aerei e spaziali. La distanza tra il sensore di ripresa e le superfici indagate può variare da pochi metri dal livello del suolo (*Proximal sensing*), a qualche chilometro (*Remote sensing*) nelle osservazioni a mezzo aereo, fino a raggiungere distanze di centinaia o migliaia di chilometri, nel caso di piattaforme satellitari. I sensori si distinguono in passivi e attivi. Sono sensori passivi quelli che rilevano l'energia naturalmente riflessa (solare) o quella emessa (termica) dalla superficie degli oggetti mentre sono attivi i sensori che registrano le risposte spettrali ad una fonte di radiazione artificiale proveniente dallo strumento stesso.

La qualità di un sensore è definita dalla risoluzione radiometrica, dalla risoluzione geometrica, dalla risoluzione spettrale e da quella temporale. La risoluzione radiometrica indica la sensibilità del rivelatore, di un certo sensore, nel percepire e codificare in segnale le differenze di flusso radiante, riflesso o emesso, dalle superfici analizzate. Si misura in bit e rappresenta il numero di livelli in cui può essere scomposto il segnale originario. La risoluzione geometrica indica le dimensioni dell'area elementare al suolo di cui si rileva l'energia elettromagnetica e si misura in metri. La risoluzione spettrale è determinata dall'ampiezza di banda (intervallo di lunghezza d'onda) che lo strumento riesce a discriminare. Fondamentalmente esistono due tipi di sensori: i multispettrali e gli iperspettrali; i primi registrano l'immagine in un limitato numero di bande spettrali distinte (di norma inferiore a dieci), i secondi acquisiscono il segnale in numerosi intervalli di lunghezza d'onda, stretti e ravvicinati, consentendo di ottenere una risposta spettrale dettagliata dei vari oggetti esaminati. Per permettere un'accurata identificazione degli oggetti la risoluzione spettrale del sensore deve essere il più possibile confrontabile con la firma spettrale dell'oggetto stesso. La risoluzione temporale indica il tempo necessario ad un sensore per effettuare due riprese consecutive di una stessa area.

La radiazione registrata dai sensori viene elaborata in un'immagine digitale. L'immagine digitale è una funzione a due dimensioni definita da un modello regolare a griglia (risoluzione geometrica) ed i valori che può assumere appartengono ad un intervallo intero positivo (risoluzione radiometrica). Essa è quindi costituita da un insieme di elementi discreti organizzati in righe e colonne (matrice): ad ognuno di tali elementi, detti pixel (picture element), è associato un numero intero positivo, digital

number (DN), che rappresenta la radianza media misurata su una piccola area (cella elementare di risoluzione) (Figura 7).

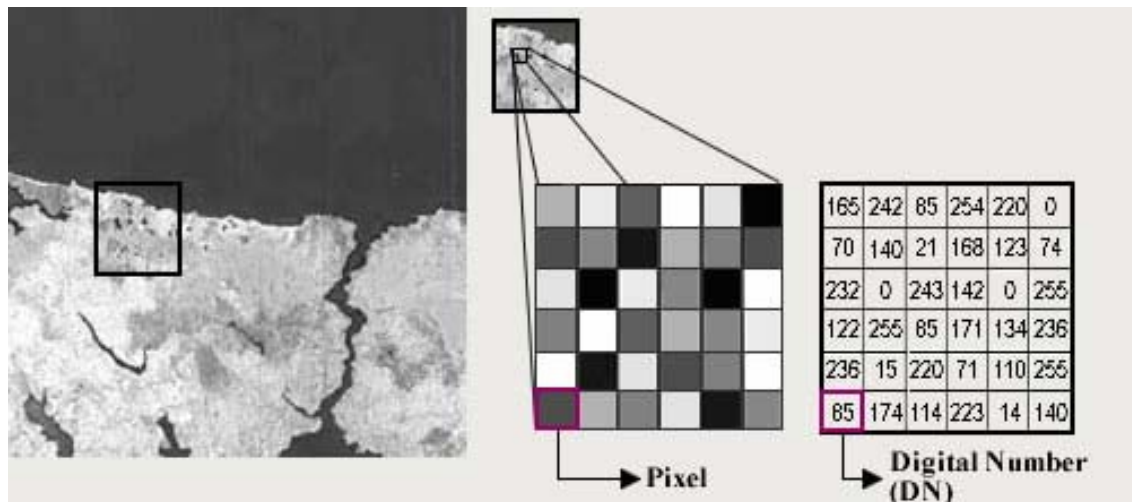


Figura 7: immagine digitale con particolare dei Pixel e Digital number che la compongono (Fonte: www.cscrs.itu.edu.tr)

Prima di poter essere utilizzate le immagini ottenute dai sensori remoti devono essere sottoposte ad una preelaborazione (image processing) al fine di correggere il “rumore” presente nella stessa per effetto delle distorsioni e degli errori introdotti durante la fase di acquisizione. Le correzioni fondamentali, finalizzate ad ottenere una rappresentazione, il più fedele possibile, sono quella geometrica e quella radiometrica. La correzione geometrica elimina gli effetti legati alle caratteristiche del sistema (sensore, piattaforma, terra), eliminando gli errori nella localizzazione dei pixel, disponendoli nella loro corretta posizione all’interno dell’immagine. La correzione radiometrica comprende le correzioni di sistema e le correzioni atmosferiche. Le prime consentono di annullare le distorsioni di ripresa e di calibrare i sensori. Le correzioni atmosferiche servono per eliminare l’errore determinato dallo strato di atmosfera interposto tra il sensore e l’area investigata, infatti, non tutta la radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre arriva ai sensori, poiché l’atmosfera funziona da filtro selettivo alle diverse lunghezze d’onda.

1.1.6 Classificazione delle immagini

La classificazione delle immagini telerilevate, tramite le informazioni spettrali, rappresentate da numeri digitali in una o più bande, è il procedimento più utilizzato per assegnare tutti i pixel di un'immagine a determinate classi (acqua, bosco, terreno secco, terreno umido, ecc.). L'immagine così classificata è composta da un mosaico di pixel, ognuno dei quali appartiene ad una classe, e costituisce, essenzialmente, una mappa tematica dell'immagine di partenza.

Quando si parla di classi è opportuno distinguere tra classi di informazione e classi spettrali. Le prime sono le tipologie d'interesse che si cerca di identificare nell'immagine: differenti seminativi, differenti formazioni forestali, differenti unità geologiche o tipi di roccia, etc. Le seconde invece, sono gruppi di pixel uniformi o molto simili, nelle differenti bande spettrali. L'obiettivo è quello di associare le classi spettrali con le classi di informazione di interesse.

I metodi di classificazione possono essere distinti in guidati (Supervised classification) e non (Unsupervised classification). La tecnica non controllata non richiede la conoscenza a priori degli elementi da discriminare, ma si basa solo sui valori dei pixel dell'immagine, aggregando i dati in cluster (insieme continuo di pixel assegnati ad una stessa classe). La procedura guidata sfrutta la definizione a priori delle classi tematiche (endmember) di interesse: l'individuazione sull'immagine di alcune aree campione, rappresentative delle categorie oggetto d'interesse (ROI: Region Of Interest), permette di determinare i parametri statistici relativi alle classi tematiche prescelte in funzione dei valori dei pixel appartenenti alle aree campione. In questo modo vengono individuati gli spettri tipici di ogni classe (training sites) con i quali viene eseguita la classificazione dell'intera scena, confrontando i pixel dell'immagine e le risposte spettrali delle classi d'interesse, secondo il criterio di somiglianza adottato (algoritmo di classificazione). Questi due sistemi rispondono ad esigenze di classificazione diverse: quando è importante mettere in relazione i gruppi di pixel con categorie di copertura effettivamente presenti sulla scena, il metodo guidato permette di definire classi informative di estrema utilità. Quando invece si devono analizzare superfici sconosciute o scarsamente accessibili, la procedura non guidata permette di eseguire, in via preliminare, un'analisi dell'immagine definendo i gruppi di pixel in termini di classi spettrali (Mather, 1999).

1.1.7 Indici di vegetazione (IV)

Gli indici di vegetazione sono combinazioni algebriche di valori di energia, riflessa o emessa, misurate dai sensori in due o più canali spettrali. Gli IV permettono di avere un'informazione sintetica sulla presenza e sulle condizioni di salute della vegetazione. La maggior parte di questi indici sfrutta la differenza di riflettanza che le piante, fotosinteticamente attive, mostrano nelle bande del visibile e del vicino infrarosso. L'applicazione degli indici di vegetazione consente di ottenere informazioni utili sullo stato fenologico della vegetazione e sulla sua densità di copertura del suolo. Sapendo, infatti, che la vegetazione ha una forte riflettività nell'infrarosso ed un elevato assorbimento nel rosso, è possibile ottenere immagini delle diverse condizioni di salute delle piante e stress causati dalla scarsa disponibilità idrica, di nutrienti o dall'attacco di patogeni.

Il vantaggio nell'uso degli indici piuttosto che delle singole bande spettrali dipende dal fatto che i primi tendono a minimizzare gli effetti del suolo e del background in genere, fornendo un certo grado di standardizzazione per il confronto ed enfatizzando il segnale legato alla vegetazione (Curran, 1981; Goward, 1989; Malingreau, 1989).

Il fatto che le combinazioni algebriche tra le bande nell'infrarosso vicino e nel rosso siano direttamente proporzionali alla quantità di biomassa vegetale ha portato a definire numerosi indici basati su rapporti tra singole bande o combinazioni lineari tra riflettanze. Tra gli indici di vegetazione il più ampiamente usato, per quanto riguarda gli studi sulla vegetazione è sicuramente l'NDVI. Detto indice è già stato ampiamente impiegato per lo studio ed il monitoraggio della vegetazione da immagini digitali (Myneni *et al.*, 1997; Yang *et al.*, 1998; Kawabata *et al.*, 2001; Maselli 2004; Pouliot *et al.*, 2009).

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Questo indice di vegetazione è stato introdotto da Rouse *et al.* (1974) ed è definito dalla differenza fra i valori dell'immagine rilevata nel vicino infrarosso e quelli rilevati nel rosso normalizzata e dividendo il risultato per la somma dei valori delle stesse due immagini.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$

Il differente potere di riflessione in queste bande permette di monitorare la densità ed il vigore della crescita della vegetazione.

Le foglie verdi riflettono molto di più nel vicino infrarosso che nel rosso visibile. Nei periodi di stress le foglie virano da verde a giallo riflettendo significativamente meno nel vicino infrarosso (Figura 8).

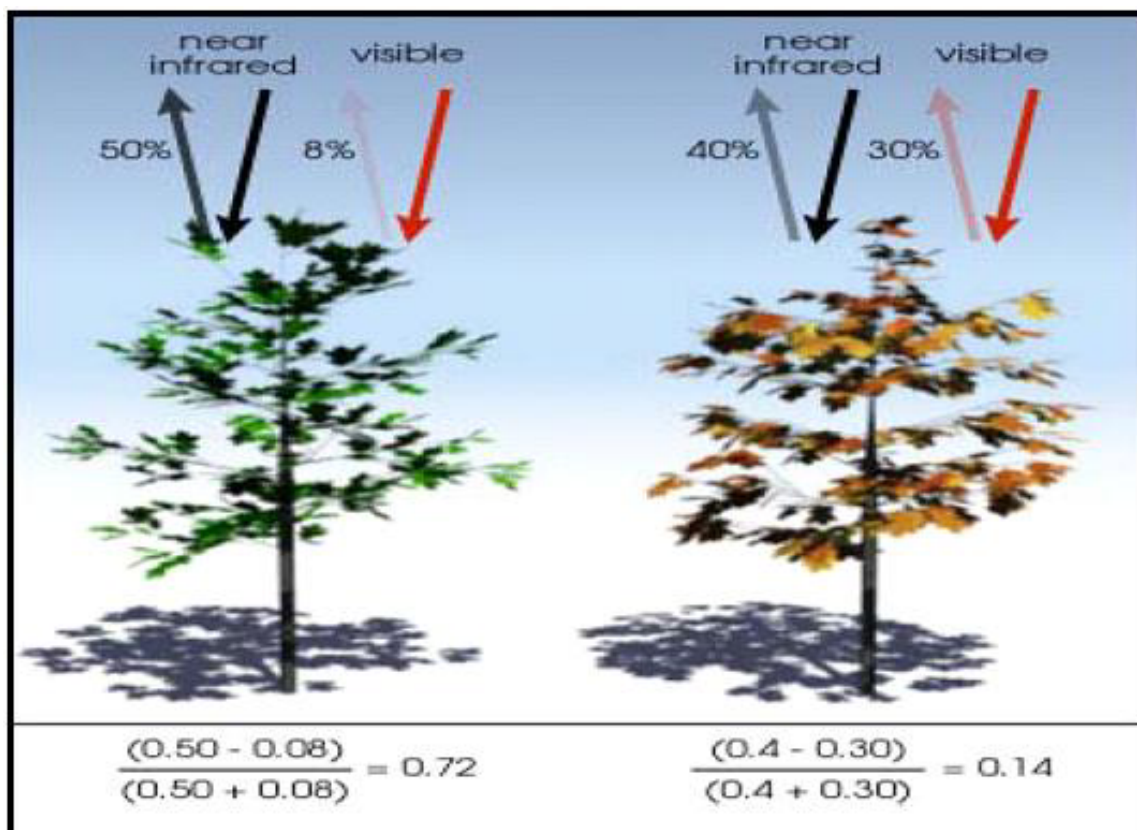


Figura 8: due esempi di calcolo dell'NDVI: a sinistra per una pianta sana a destra per una pianta stressata. (Fonte: Hosking)

Nuvole, acqua e neve hanno una grande riflettanza nel visibile rispetto al vicino infrarosso mentre la differenza è circa zero per rocce e suoli secchi (tabella 1) (Holben, 1986).

Tabella 1: potere riflettente e valore dell'NDVI per alcune tipologie di superfici

Tipologie di coperture	RED	NIR	NDVI
Vegetazione densa	0.100	0.500	0.700
Suolo secco	0.260	0.283	0.025
Nuvole	0.227	0.228	0.002
Ghiaccio e neve	0.375	0.342	-0.046
Acqua	0.022	0.013	-0.257

L'NDVI può assumere valori che variano tra -1 ed 1 , dove valori inferiori allo 0 individuano la presenza di acqua, valori prossimi allo 0 indicano i suoli, e valori tra compresi tra 0.4 e 0.7 indicano rispettivamente una bassa influenza della vegetazione e abbondanza di specie vegetali, vegetazioni molto dense possono arrivare a valori prossimi a 0.8 . (Singh, 1989).

1.1.8 Applicazioni del telerilevamento

Nel corso degli ultimi cinquanta anni varie metodologie di telerilevamento sono state sviluppate e impiegate per lo studio delle risorse ambientali e per il monitoraggio dei processi naturali. Utilizzando dati spettrali è possibile studiare i boschi e tutte le componenti che agiscono su di essi ottenendo alcune variabili ecologiche che descrivono lo stato della vegetazione. Particolare interesse è rivestito dagli studi condotti sulla vegetazione. Il telerilevamento viene impiegato in campo agricolo per stimare le condizioni delle colture nel tempo e nello spazio. Lo studio della riflettanza spettrale della vegetazione ha permesso di definire alcune relazioni quantitative tra la fenologia della coltura ed i dati telerilevati elaborate in indici di vegetazione. Numerosi studi hanno evidenziato la possibilità di utilizzare il telerilevamento per la stima di parametri agronomici tradizionali come l'indice di area fogliare (LAI), la percentuale di copertura vegetale, la biomassa ed altri parametri biofisici. Il recente progresso scientifico e tecnologico abbinato ad una riduzione dei costi, permette di estrapolare informazioni utili sulle colture mediante un'analisi spazio-temporale degli indici di vegetazione. L'uso degli indici di vegetazione assume una notevole importanza nel campo delle applicazioni agricole per la determinazione della variabilità spaziale delle produzioni.

L'impiego del telerilevamento per lo studio vegetazionale è ampiamente documentato in diversi campi di applicazione: nella redazione di inventari forestali (FAO, 1999a; Bauer *et al.*, 1994; Boyd *et al.*, 2005), per discriminare diverse tipologie forestali e classificare l'uso del suolo (Clark *et al.*, 2001; Townsend & Walsh, 2001; Langley *et al.*, 2001); per lo studio dell'indice di area fogliare, la biomassa epigea, l'evapotraspirazione, lo stato fisiologico, ecc (Chen J.H. *et al.*, 2002; Chen J.M. *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2005; Chavez, 2004; Chilar *et al.*, 1991; Ikeda *et al.*, 1999; Moran *et al.*, 1991); per la previsione delle produzioni agricole (FAO, 1999b; Clevers *et al.*, 1996); per il monitoraggio degli incendi (Belli *et al.*, 2008; Helfert & Lulla, 1990; Li *et al.*, 2001). In patologia vegetale, sono state utilizzate immagini aeree per rilevare la mortalità e le condizioni fitosanitarie della vegetazione in presenza del fenomeno "sudden oak death" (SOD o morte improvvisa delle querce) (Kelly e Meentemeyer, 2002; Kelly *et al.*, 2004; Pu *et al.*, 2008); Everitt *et al.*, (1999) tramite il telerilevamento hanno individuato l'appassimento delle querce in alcune aree del centro e del sud del Texas. Macomber e Woodcock (1994) hanno mappato la mortalità delle conifere causata dalla siccità.

1.1.9 Validazione dei dati telerilevati

Una fase molto delicata nella produzione di carte tematiche ottenute da dati telerilevati è rappresentata dal controllo della qualità della classificazione, in quanto deve fornire un indice di accuratezza della mappa. Dalla letteratura è stato possibile appurare che tra le procedure di verifica è molto diffuso l'uso della "matrice di confusione" (Congalton, 1991; Stehman *et al.*, 1998; Foody, 2002) o "matrice di contingenza", che confronta la classe di appartenenza osservata con la categoria di assegnazione nell'immagine classificata. Non tutti i lavori di remote sensing riportano una valutazione sulla qualità della classificazione (Lucas *et al.*, 2008; Asner *et al.*, 2008); quando detta stima è presente risulta essere molto variabile, soprattutto in funzione dell'applicazione oggetto di studio: per coperture del suolo di diverse tipologie forestali si va da 66,80% (Gergel *et al.*, 2007) a 77% (Bello-Pineda *et al.*, 2005) a 90,73% (Lasaponara *et al.*, 2007). In lavori in cui le classi analizzate sono più difficili da discriminare, quali le classi di malattia per una singola specie forestale, l'indice di

accuratezza totale è più basso (31%); per migliorare l'accuratezza si tende ad accorpare le classi o ad inserire altri parametri (Coops *et al.*, 2003).

1.2 GPS

Il sistema GPS (Global Positioning System) rappresenta un sistema di navigazione con copertura globale e continua in grado di fornire all'utente le coordinate geografiche (latitudine, longitudine), la quota e la velocità di qualsiasi mezzo in ogni punto della Terra e per l'intero arco delle ventiquattro ore, con un grado di accuratezza che varia a seconda del tipo di utente. Il GPS permette quindi di ricevere e memorizzare le coordinate di punti rilevati in campo (*waypoints*), di calcolarne le distanze rispetto ad un'origine, la direzione, e ritrovarli successivamente mediante l'operazione di "Navigator".

Originariamente il GPS fu concepito, dalla difesa americana, per applicazioni esclusivamente militari per le quali era necessario garantire la copertura globale, un'elevata precisione, permettere di operare in qualsiasi condizione meteo, essere in grado di servire veicoli caratterizzati da alte velocità di spostamento. Solo in un secondo momento, quando il gran numero di possibili applicazioni civili divenne chiaro, fu concessa la fruizione dei suoi servizi anche ad utenti non governativi.

Il sistema GPS consta di tre parti essenziali:

- un sistema satellitare basato su una costellazione di 24 satelliti (cui se ne affiancano altri 4 in caso di eventuali sostituzioni) orbitanti ad una quota di circa 20200 Km. I satelliti sono disposti, a gruppi di quattro o cinque, su sei orbite centrate attorno alla terra in modo tale da minimizzare gli effetti negativi in caso di mancato funzionamento di uno di questi;
- stazioni di controllo e di monitoraggio dell'attività dei satelliti;
- i ricevitori utilizzati dagli utenti, dotati di un sensore in grado di captare le onde elettromagnetiche emesse dai satelliti.

Affinché le coordinate di un punto sulla superficie terrestre siano individuate con un sufficiente grado di precisione, occorre che il ricevitore GPS, sia in grado di captare il segnale emesso da almeno 4 satelliti.

Il sistema GPS è affetto da diversi tipi di errori. Errori dipendenti dai satelliti e causati da dispositivi introdotti a bordo degli stessi dal dipartimento della difesa degli USA, per ragioni inerenti alla politica di sicurezza interna, e che determinano una degradazione della precisione per uso civile. Ciò fino al 2000, quando è stato deciso di

rimuovere il disturbo, riservandosi il diritto di reinserirlo in qualsiasi momento e senza preavviso per l'intero globo o per un'area circoscritta. Ogni ricevitore origina degli errori legati al rumore interno causato dai ritardi prodotti sia dai dispositivi elettronici sia dal software per l'elaborazione dei dati. Errori legati alla propagazione delle onde elettromagnetiche, generate dai satelliti, attraverso gli strati della ionosfera e della troposfera, dove subiscono sia variazioni nella velocità sia rifrazione con conseguente allungamento dei percorsi rispetto a quello rettilineo tra satelliti e ricevitore. Errori prodotti dalla combinazione dei segnali diretti con quelli riflessi dalle superfici circostanti, in ambiente forestale ne sono responsabili le foglie e le cortecce, in particolar modo se le loro superfici sono bagnate. Un rilevante accorgimento per la riduzione degli errori in ambiente forestale è quello di non effettuare rilievi dopo piogge o periodi di forte umidità. Per ridurre gli errori ed incrementare l'accuratezza nella localizzazione dei punti d'interesse si può ricorrere ad antenne particolari ed alla correzione differenziale. Il principio della correzione differenziale si basa sulla considerazione che, in una stessa zona e per uno stesso lasso di tempo, le fonti di degrado rimangono le stesse. La correzione differenziale consiste nella correzione dei dati registrati dal ricevitore in campo (rover) utilizzando quelli registrati contemporaneamente da un altro ricevitore posizionato in un punto di coordinate note con elevata precisione e accuratezza (reference station). La correzione differenziale può avvenire in un momento successivo a quello del rilevamento in campo (DGPS post-processing) o contemporaneamente (DGPS real time). Il metodo differenziale risulta essere il più studiato ed accurato, ma gli elevati costi legati all'acquisto delle attrezzature, le laboriose operazioni per l'eliminazione degli errori, la necessità di avere apposite stazioni fisse vicine alle zone da rilevare, rendono questo metodo tutt'ora applicato solo per i rilievi che richiedono necessariamente una notevole precisione (Nelson *et. al.*, 1999). L'uso del GPS è fortemente legato a quello del GIS, in quanto il primo è uno strumento di rilievo dei dati, mentre il secondo ne consente l'elaborazione grafica, geografica, statistica, e la successiva restituzione su carta. L'uso congiunto del GPS e del GIS permette la creazione di banche dati aggiornate ed aggiornabili.

1.3 GIS

1.3.1 Storia dei GIS

Il GIS nasce come risultato dello sviluppo e della convergenza di diverse tecnologie. David J. Maguire (1990) identifica in quattro principali fattori lo sviluppo dei GIS:

- abbondanza nella disponibilità dei dati immagini da piattaforme satellitari ed aeree, rilevazione tramite GPS;
- progresso della geografia quantitativa a partire dagli anni '60 (analisi statistiche, analisi multivariata);
- natura multidimensionale dei dati geografici;
- praticità dei GIS

Dalla seconda metà degli anni '60 si assiste alle prime esperienze in ambito applicativo presso istituti di ricerca militari, laboratori universitari statunitensi e canadesi. In particolare il Canada Information System è stato uno dei primi sistemi GIS operativi finalizzato all'analisi statistica per lo sviluppo e la gestione di vaste aree territoriali. In concomitanza il laboratorio dell'Università di Harvard per la computer grafica ed analisi spaziale ha svolto un ruolo determinante nello sviluppo di soluzioni software fino all'inizio degli anni '80 (Tomlinson e Petchenik, 1988) quando si assiste alla nascita del personal computer al quale si affianca da subito lo sviluppo di software GIS per mini-hardware (in particolare ARC/INFO); è da questa data che, convenzionalmente, si fa partire la storia moderna del GIS. Nell'ultimo ventennio si è assistito alla diffusione crescente dei GIS che si sono affermati come una scienza interdisciplinare influenzando principalmente le discipline afferenti alle Scienze della Terra ed il settore pubblico amministrativo (Biallo 2002).

1.3.2 Tecnologia GIS

Le immagini ottenute dalle attività di telerilevamento ed i dati acquisiti tramite GPS sono comunemente gestite tramite software GIS. Molteplici le definizioni di Sistema informativo Geografico, tra le più citate: "i sistemi informativi geografici sono strumenti atti alla memorizzazione, gestione, analisi e restituzione di dati georeferenziati" (Aronoff, 1989); "i GIS sono sistemi informativi in grado di

raccogliere, memorizzare, richiamare, trasformare e rappresentare dati geografici" (Burrough e McDonnel, 2000); e quella più recente di Gomarasca (2004): "I GIS sono un potente insieme di strumento in grado di accogliere, memorizzare, richiamare, elaborare, trasformare e rappresentare dati spazialmente riferiti".

Un GIS permette di gestire, elaborare dati e informazioni, facendo stretto riferimento alla geometria delle entità a cui i dati e le informazioni sono legate, e alla posizione geografica (*coordinate s.l.*) delle entità. Ogni strato informativo in un GIS ha una sua collocazione spaziale sul territorio (dato georeferenziato) e possiede specifici attributi compilati in apposite banche dati (geodata-base); i GIS integrano la capacità di effettuare operazioni sui data-base, come interrogazioni e analisi statistiche, con la visualizzazione e l'analisi geografica, caratteristici delle mappe. Uno strumento GIS è caratterizzato inequivocabilmente dalla possibilità di sovrapposizione di livelli poligonali differenti con generazione di nuovi oggetti geografici (overlay). Partendo da strati informativi di varia natura è possibile tramite questi software non solo creare un banca dati geografica delle caratteristiche dell'oggetto studiato, al fine di avere un quadro della situazione attuale, ma anche associare gli strati tra loro ottenendo nuove informazioni, utili a creare modelli spaziali e a gestire le problematiche inerenti la pianificazione territoriale.

La possibilità di analizzare ed elaborare le caratteristiche delle diverse entità geografiche attraverso la loro natura geometrico-spaziale unitamente o indipendentemente alla loro natura informativa, rende i sistemi informativi geografici un potente strumento di lavoro in molti settori scientifici, tecnologici e amministrativi. In particolare, in campo epidemiologico, la tecnologia GIS, consente di elaborare dei modelli cartografici sulla diffusione di un dato fenomeno, identificare le variabili territoriali che lo influenzano ed il loro grado di correlazione con il fenomeno stesso, nonché, sulla base di questo simulare dei cambiamenti nel tempo facendo variare alcune di queste variabili. In altre parole un GIS è utile per rappresentare la distribuzione spaziale di un dato fenomeno, per spiegarlo, ed anche per prevederne i cambiamenti.

1.3.3 Struttura di un GIS

Un GIS può essere definito come un insieme di sottoprogrammi differenti, collegati tra loro da un programma principale (main programm).

Un GIS è caratterizzato da un database management system (DBMS), un sistema formato da tutti quei programmi che permettono di memorizzare, gestire, analizzare, esplorare, ed associare dati territoriali e coordinate geografiche a dati descrittivi; il software quindi opera su due livelli: quello informativo grafico, composto dalle caratteristiche geografiche e geometriche dell'elemento rappresentato, e quello informativo, nel quale vengono restituiti gli attributi descrittivi dell'oggetto in esame.

Inoltre il DBMS permette di ordinare i dati ed effettuare analisi statistiche sulle caratteristiche del dato spaziale e di inserire i dati in tabelle informative e statistiche, quindi crearne di nuove.

Il DBMS è anche detto database relazionale (*RDBMS*), in quanto le informazioni riguardanti una certa entità geografica, sono registrate come una serie di record (righe) messi in relazione tra loro. I database relazionali utilizzano un linguaggio *SQL*, il quale introduce delle regole molto utili per mantenere efficiente il database, per regolamentare l'accesso ai soli utilizzatori autorizzati, e per promuovere un corretto sviluppo della banca dati esistente (Loukos *et al.*, 2000).

Il sistema di analisi geografica, permette di esaminare ed interrogare i dati, solo sulla base delle loro caratteristiche spaziali, a prescindere degli attributi descrittivi. Ciò grazie all'operazione di *overlay*, mediante la quale è possibile, per una stessa porzione di territorio, sovrapporre due carte con tematismi differenti.

Il database è integrato da una serie di programmi preposti all'elaborazione dei dati. Fondamentale è la visualizzazione dei dati e delle carte (tramite periferiche video). L'output cartografico viene elaborato dal software e la qualità di restituzione su supporto fisico varia in funzione delle caratteristiche del plotter.

Il sistema di digitalizzazione delle carte permette di utilizzare i dati disponibili in formato cartaceo (carte tradizionali). Attualmente il metodo di digitalizzazione più comune è quello eseguito tramite scanner che permette la restituzione dei dati in formato raster non georeferenziato.

1.3.4 Strutture per la rappresentazione delle carte

Tutti gli oggetti presenti in un GIS vengono rappresentati mediante l'utilizzo di dati geometrici, topologici e attributi. I dati spaziali, all'interno di un GIS, possono essere ricondotti a due tipologie: la struttura vettoriale e quella raster. Questi due

modelli possono essere invertiti tra loro, con relativa affidabilità attraverso l'impiego di specifiche routines.

Nei formati vettoriali, per rappresentare gli oggetti, vengono utilizzate forme geometriche di base, come punti, linee o poligoni. I formati raster utilizzano la primitiva geometrica del pixel (o cella) all'interno di una griglia regolare di elementi.

Rispetto al modello raster quello vettoriale incide meno sulla memoria necessaria allo stoccaggio delle informazioni.

1.3.5 La struttura vettoriale

Dal punto di vista geometrico vengono utilizzati tre elementi di base: il punto, la linea ed il poligono. Un punto è definito da una coppia di coordinate e serve a riprodurre oggetti puntiformi quali alberi. La linea è costituita da una serie di punti, definiti da coordinate, uniti tramite segmenti e rappresenta strade, fiumi, sentieri, etc. I poligoni vengono utilizzati per delimitare aree chiuse come un bosco, le particelle forestali, i limiti di una regione.

La topologia definisce il rapporto di coesistenza tra i vari elementi di un GIS come, per esempio, se una linea è comune a due poligoni adiacenti o se un determinato poligono è racchiuso all'interno di un altro.

Gli attributi vengono utilizzati per assegnare un valore ad un oggetto: ad una pianta può essere attribuita una classe di malattia.

1.3.6 La struttura Raster

I dati in formato raster sono costituiti da un'insieme di celle regolari, generalmente di forma quadrata, dette pixel. L'insieme di tutte le celle componenti la griglia (*Grid*), costituisce una matrice. Ad ogni cella è associato un attributo, ad esempio un'immagine è formata da più pixel ed ogni pixel contiene un'informazione di un determinato colore.

La risoluzione è definita come il più piccolo elemento che può essere rappresentato in una cella; affinché la risoluzione sia massima, occorre che la cella sia la più piccola possibile, determinando di conseguenza un aumento esponenziale della memoria fisica del dato. Per questo motivo i dati raster sono di dimensioni maggiori rispetto a quelli vettoriali.

Il modello Raster risulta utile per la rappresentazione di dati continui come il tipo di suolo, il tipo di vegetazione, la climatologia. Tuttavia la rappresentazione rimane in forma discreta e questo determina una certa perdita di accuratezza, tanto minore, quanto minore è la porzione di territorio rappresentata da ogni singola cella.

1.3.7 Modelli digitali del terreno

I modelli tridimensionali del terreno, denominati DTM (*Digital Terrain Model*) o DEM (*Digital Earth Model* o *Digital Elevation Model*), sono strutture di dati che consentono una lettura e una visualizzazione del territorio non più in due dimensioni, come nelle cartografie di base, ma in tre dimensioni, associando ai valori delle coordinate x e y la quota z di un punto.

Grid e Tin (Triangulated Irregular Network). Esistono due principali formati per i modelli digitali del terreno, il GRID e il TIN. Se si dispone di un insieme di punti quotati, ordinati in griglie a passo regolare, è possibile generare un GRID. Un GRID è un modello Raster, costituito da una maglia regolare di celle ad ognuna delle quali viene associato un determinato valore di quota corrispondente alla quota media della porzione di territorio rappresentato (Biallo 2002). Se invece si dispone di un insieme sparso di elementi quotati si applica un algoritmo che crea un TIN. Un TIN è un metodo d'interpolazione di tipo deterministico, ossia dove non si tiene in considerazione l'incertezza associata alle variabili di input (Watson, 1981). Tramite TIN è possibile spazializzare i dati ottenendo una superficie con una serie di elementi triangolari non sovrapposti. Un TIN viene creato a partire da una serie di punti noti (mass points), aventi valori di coordinate x,y,z. Dove x e y sono le coordinate planimetriche mentre z è un valore che rappresenta l'attribuzione tematica dei punti. Quando un DEM viene prodotto in formato TIN ad ogni vertice (o nodo) vengono associate le coordinate geografiche (x,y) e naturalmente l'altitudine (z). La quota di ogni triangolo, corrisponde al valore medio della porzione di territorio rappresentato (Biallo 2002).

I modelli digitali del terreno permettono, tramite opportune procedure, di calcolare i principali parametri morfologici. Da un DTM, in formato TIN o GRID, possono essere estrapolate informazioni quali deflussi superficiali, cartografie dell'altimetria, delle pendenze e delle esposizioni, generare immagini 3D, ecc. Queste

variabili possono molto utili in studi ecologici come ad esempio per correlare particolari tipi vegetazionali alla morfologia del territorio.

1.3.8 ArcGIS Desktop

ArcGIS Desktop è un pacchetto GIS commercialmente molto diffuso. Sviluppato e venduto dalla ESRI, comprende un insieme di applicazioni integrate: ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox. L'uso di questi strumenti permette di eseguire qualsiasi operazione GIS: gestione dati, analisi geografica, editing dei dati, elaborazione di dati geografici e produzione cartografica. Per questo pacchetto sono disponibili funzionalità aggiuntive organizzate in moduli che si configurano come estensioni del modulo base, di cui condividono modelli, strutture dati e modalità di utilizzazione (Figura 9). Le estensioni consentono di svolgere operazioni quali elaborazioni di dati geografici raster e analisi di dati 3D.

ArcGIS Spatial Analyst	Algoritmi per la modellazione dei raster Operazioni algebriche sui raster Funzioni VBA per l'analisi dei raster	ArcScan™ per ArcGIS	Editing integrato raster-vector Vettorializzazione da raster Raster snapping
ArcGIS 3D Analyst	ArcScene™: visualizzazione real-time di scene 3D Visualizzazione di scene in ArcCatalog Strumenti per la modellazione 3D Strumenti in ArcTIN	ArcGIS Schematics	Rappresentazione schematica di dati Visualizzazione di reti GIS e informazioni alfanumeriche Rappresentazioni in differenti tipologie di schemi
ArcGIS Geostatistical Analyst	Strumenti kriging e modellazione delle superfici Strumenti statistici per l'esplorazione e l'analisi dei dati geografici rappresentazione cartografica degli errori, soglia e probabilità	ArcGIS Publisher	Pubblica documenti PMF da ArcMap per successive visualizzazioni con ArcReader o su Web utilizzando l'estensione ArcMap Server di ArcIMS
ArcGIS Survey Analyst	Gestione delle misure rilevate con l'utilizzo del geodatabase Sofisticati strumenti per il calcolo delle misure provenienti da rilievi Strumenti per migliorare l'accuratezza dei dati GIS con misure rilevate	ArcPress per ArcGIS	Sistema per la stampa o la conversione in formato immagine di mappe
ArcGIS StreetMap™ USA	Database contenente il grafo stradale di tutti gli Stati Uniti	MrSID® Encoder per ArcGIS	Estende la compressione e la mosaicatura delle immagini da 50 (standard nei prodotti di base) fino a 500 megapixel
ArcGIS StreetMap Europe	funzionalità di geocodifica e database contenente il grafo stradale di tutta Europa	TIFF/LZW Compression	Consente la compressione delle immagini in formato TIFF/LZW (proprietà UNISYS)
ArcGIS Tracking Analyst	Gestione di oggetti (linee, punti e poligoni) in movimento sul territorio (GPS) Strumenti di Playback (Play, Pause, Rewind, Forward)		

Figura 9: Estensioni disponibili e loro descrizione, per il pacchetto ArcGIS Desktop.

In particolare, l'estensione ArcGIS Geostatistical Analyst permette di creare superfici continue da misurazioni discontinue prese in punti campione per le quali è possibile prevedere in modo attendibile valori relativi a superfici attraverso il kriging e include strumenti per la valutazione dell'errore statistico, del valore di soglia e il calcolo delle probabilità.

1.3.9 Geostatistica

La nascita dei Gis, unita allo sviluppo di metodi computazionali più sofisticati, ha permesso una grande espansione dei modelli spaziali tra questi la geostatistica. La Geostatistica è la disciplina che si occupa dell'analisi dei fenomeni naturali, che hanno un contesto spaziale, sulla base di dati e informazioni ricavati da campionamenti (Raspa, 1995).

Tale disciplina si è sviluppata inizialmente nel settore dell'ingegneria mineraria e in quello petrolifero, per valutare le risorse presenti nel sottosuolo, e nell'ambito dell'ingegneria ambientale, per stimare il grado d'inquinamento di un sito da metalli pesanti. (Raspa, 1995). A partire dalla seconda metà degli anni ottanta i metodi geostatistici hanno cominciato a diffondersi in settori diversi da quelli tradizionali dell'ingegneria mineraria e del petrolio, nel cui ambito erano stati messi a punto. I settori in cui tale diffusione ha avuto ed ha luogo sono principalmente quelli delle scienze della terra applicate. Le discipline coinvolte sono tante, e tra queste si possono ricordare: la scienza dei suoli, l'idrologia, l'idrogeologia, la geochimica, la meteorologia, l'oceanografia, l'igiene ambientale, l'agronomia, l'analisi delle immagini, etc. Nell'ambito della fitopatologia e dell'entomologia sono riportati in letteratura diverse applicazioni geostatistiche al fine di produrre una rappresentazione continua sul territorio della distribuzione del fenomeno studiato. L'integrazione delle componenti spaziali e temporali fornisce un utile sistema per valutare l'intensità di malattia, la dinamica di diffusione nel tempo e nello spazio in relazione ai modelli di malattia e l'impatto delle eventuali misure di controllo (Thomson e Connor, 2000). In patologia le tecniche di spazializzazione vengono applicate per lo studio della variabilità spaziale e temporale di specie fungine. Nel Nord Italia sono state elaborate mappe spaziali relative all'incidenza di *Fusarium verticillioides* e *Aspergillus flavus* e alla presenza di fumosinina e aflatossina, da loro causata in granella di mais (Battilani, 2004). In campo forestale sono presenti lavori riguardanti *Armillaria* spp. inerenti lo sviluppo, tramite

interpolatori geostatistici, di mappe di predizione su larga scala della malattia, al fine di integrare le strategie di pianificazione forestale (Kallas, 2003). Su microscala, dell'ordine di alcuni ettari, si riportano studi sulla distribuzione iniziale dell'inoculo di *Armillaria* spp. e il suo successivo sviluppo nel tempo (Lung-Escarmant e Guyon, 2004). Attraverso l'integrazione del remote sensing e della geostatistica, è stata dimostrata l'associazione tra il mal dell'inchiostro ed un forte intervento antropico (pratiche colturali intensive) in piantagioni di castagno da frutto (Martins *et al.*, 2007)

La geostatistica studia l'autocorrelazione spaziale dei dati, cercando di verificare se osservazioni effettuate tra punti vicini presentano una minore variabilità rispetto ad osservazioni effettuate tra punti distanti.

Il metodo più utilizzato nella geostatistica è il kriging. Si tratta di un metodo di interpolazione che evidenzia, tra i punti vicini, un legame statistico (covarianza) che può non avere un significato fisico. Si presuppone che tutti i valori siano il risultato di un processo casuale, ma non indipendente, e tale dipendenza è chiamata autocorrelazione, definita come la tendenza di due tipi di variabili ad essere in relazione. Si parla, nella geostatistica, di processi casuali dipendenti.

In particolare, il kriging, permette, conoscendo il valore di una grandezza in alcuni punti nello spazio, di determinare il valore della grandezza in altri punti per i quali non esistono misure. Nel kriging, questa interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione della grandezza, cioè sull'assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità; ossia le cose più vicine sono più simili rispetto alle cose più lontane.

La caratterizzazione di un fenomeno spaziale, temporale o spazio-temporale costituisce il primo e più importante passo di uno studio geostatistico. Essa consiste nell'evidenziare la variabilità del fenomeno oggetto di studio in relazione alla presenza di eventuali anisotropie. In campo spaziale si possono mettere in evidenza componenti locali e regionali della variabilità. In campo temporale si possono evidenziare variabilità stagionali o annuali di diversi fenomeni.

Allo studio della variabilità di un fenomeno, grazie a strumenti quali il GIS, è possibile sovrapporre uno o più strati che riportino l'andamento di strade, compluvi, aree con presenza di animali quali vettori di patogeni, dati termopluviometrici, o altri parametri che possono essere correlati al fenomeno che si sta esaminando. Questi strati,

sovrapposti ad elaborazioni geostatistiche, potranno quindi fornire elementi utili alla definizione di interventi preventivi contro eventuali epidemie e alla valutazione ed individuazione delle aree a maggior rischio di diffusione.

1.4 IL MAL DELL'INCHIOSTRO DEL CASTAGNO

1.4.1 Importanza del castagno e principali patologie

Il castagno europeo (*Castanea sativa* Mill.) rappresenta una delle principali specie arboree caratterizzanti i paesaggi delle aree montane e pedemontane della dorsale appenninica, dei rilievi pre-appenninici e pre-alpini del nostro paese. Il castagno occupa una superficie di circa 580.000 ha (dati ISTAT, 1996) ed è una delle latifoglie maggiormente presenti in Italia. Oltre a svolgere un'insostituibile azione di regolazione delle acque e consolidamento dei versanti collinari e pedemontani, il castagno rappresenta una fonte di reddito per le popolazioni residenti in aree marginali grazie al mercato del frutto e del legname. Riguardo questo ultimo, si consideri che in Italia il castagno costituisce il 26% della produzione nazionale di legname da lavoro proveniente da latifoglie. In termini quantitativi si parla di 44.165 mc utilizzati (dati ISTAT, 1996) per un valore di circa 1.330.000 € per anno. Ben diversa è la situazione per il frutto: la produzione nazionale annua è di circa 727.817 quintali per un valore di circa 69.258.000 € annui. E' doveroso ricordare che il 70% della superficie castanicola nazionale è costituita da proprietà privata. L'Italia risulta attualmente la quarta produttrice mondiale di castagne ma detiene il record per resa produttiva ad ettaro.

È importante sottolineare come l'attenzione alla filiera castagno e in particolare ai suoi prodotti non può prescindere dalla salvaguardia dagli agenti patogeni. E' chiaro che non si può investire su una produzione quantitativamente o qualitativamente messa a rischio da fattori di danno e malattia.

Nel corso degli ultimi 100 anni il castagno europeo è stato colpito da gravissime avversità di ordine entomologico e fitopatologico che ne hanno messo a rischio, se non l'esistenza come specie, sicuramente la coltivazione e l'areale di distribuzione in Europa e in Italia. Gli insetti più dannosi sul castagno sono quelli che provocano danni al frutto, tra cui il balanino (*Curculio elephas* Gyll.) e tre lepidotteri tortricidi (*Pammene fasciana* L., *Cydia fagiglandana* Zell., *Cydia splendana* Hb.).

Il frutto in post-raccolta è anche sensibilmente attaccato da agenti fungini come la *Rachodiella castaneae* Pyr e *Phomopsis endogena* (Speg.) Cifferi, causa della mummificazione delle castagne. I danni provocati sul frutto sono variabili a seconda degli anni di raccolta e le perdite possono oscillare intorno al 40% del prodotto. A medio o lungo termine gli agenti di malattia del castagno possono essere responsabili

della completa distruzione del castagneto o deperimento del bosco ceduo, provocando quindi danni ambientali ed economici ben più gravi della sola perdita o riduzione delle produzioni. Parliamo in particolare di *Dryocosmus kuriphilus* (Yasumatsu), di Cancro corticale e di Mal dell'inchiestro. La presenza di *D. kuriphilus* (Yasumatsu) è stata segnalata in provincia di Cuneo dal 2002 (Brussino *et al.*, 2002) e nel Lazio dal 2005 (Monti Cimini). Si tratta di un imenottero originario del nord della Cina che è considerato uno degli insetti più nocivi per il castagno, in grado di provocare la formazione di galle (ingrossamenti di forma tondeggiante e dimensioni variabili da 0,5 a 2 cm di diametro, di colore verde o rossastro) su foglie e germogli, compromettendo lo sviluppo vegetativo delle piante e la fruttificazione. Per far fronte a questa nuova emergenza sono già state previste una serie di misure di eradicazione e profilassi. Il Cancro corticale è una malattia a carico di tutti i tessuti legnosi della porzione epigea della pianta ed è diffuso, praticamente, in tutti i castagneti italiani. Il Mal dell'inchiestro è una malattia ben più subdola della precedente ed è localizzata sulle grosse radici e al colletto della pianta; si tratta di una malattia che può portare a morte individui centenari in poche stagioni vegetative. Tuttavia, mentre i danni da Cancro corticale hanno subito negli ultimi 20 anni una forte diminuzione a causa della diffusione naturale del fenomeno dell'ipovirulenza esclusiva nei castagneti da frutto e cedui della nostra penisola, il Mal dell'Inchiostro ha subito un fortissimo incremento.

1.4.2 Cenni storici

Il mal dell'inchiestro del castagno, originario dell'Asia, è stato segnalato per la prima volta nel 1824 negli Stati Uniti. In Europa la prima segnalazione risale al 1838 in Portogallo, ma è probabile che la malattia fosse già presente in Spagna fin dal 1726 (Crandall *et al.*, 1945).

Secondo il Gibelli (1883), in Italia, la malattia si è affermata fin dagli inizi del 1800. Nel 1845 fu notata per la prima volta dal Dr. Selva, un medico piemontese, che la indicò con il termine generico di “moria del castagno”. La prima descrizione si ebbe solo più tardi, nel 1859 ad opera del Puccinelli, come riportato dal Piccioli nel 1922.

La malattia fu al centro di studi e dispute tra numerosi ricercatori per tutta la fine del 1800 e l'inizio del 1900.

Inizialmente fu correlata a formazioni micorriziche osservate sulle radichette degli alberi malati, formazioni la cui natura era all'epoca incerta. Delacroix (1897), con altri, perdurò sull'ipotesi micorrizica, presumendo il saprofitismo in condizioni normali ed il parassitismo in assenza di humus, mentre Gibelli (1879, 1882), con il rinvenimento di micorrize anche su piante sane, indirizzò i suoi studi verso funghi non micorrizogeni della rizosfera.

Le osservazioni del Gibelli e di altri ricercatori francesi evidenziarono la presenza sulle radici del castagno di *Diplodia castaneae* var. *radicicola*, *Torula exitiosa*, *Melanomma gibellianum* e di un micelio molto sviluppato sulle ultime ramificazioni radicali, che portava a morte anche le micorrize e che purtroppo non fu studiato approfonditamente.

Agli studi del Mangin (1903) si deve la segnalazione dell'ascomicete *Mycelophagus castaneae*, agente parassitario del fungo micorrizico la cui morte avrebbe indotto implicitamente quella delle radici del castagno.

Furono ipotizzate anche cause non parassitarie: climatiche (freddi intensi) e pedologiche (terreni umidi e compatti).

Altri studiosi, tra i quali Briosi e Farneti (1909, 1911), considerarono il marciume delle radici un processo secondario attribuendo la malattia a *Coryneum perniciosum* (Briosi e Farneti), che ha come forma ascofora *Melanconis perniciosa* (Briosi e Farneti). Questo parassita, che attacca la parte aerea della pianta, in Italia ed in Francia causa "la moria dei polloni del castagno" e non ha nessuna relazione col mal dell'inchiostro.

Nel 1917, dopo anni di studio, il Petri dimostrò definitivamente l'origine infettiva della malattia, identificando l'agente eziologico come una nuova specie di Oomicete, *Blepharospora cambivora* Petri, riconosciuta in seguito come *Phytophthora cambivora* (Petri) Buis. (Petri, 1917a; Petri, 1917b; Petri, 1918; Petri, 1925; Petri, 1930; Petri, 1936). Il Petri constatò che il parassita penetra nell'ospite attraverso le grosse radici in prossimità del colletto, invade i tessuti corticali, spostandosi rapidamente nel cambio, dove opera il suo maggiore accrescimento e da dove raggiunge il colletto ed il pedale. Osservò, inoltre, che il patogeno ha un decorso inter ed intracellulare, che il micelio è povero o privo di setti, che muore dopo la morte dei tessuti, ed infine, che è coltivabile solo su particolari substrati.

1.4.3 Sintomatologia

Il Mal dell'Inchiostro del castagno è una gravissima fitopatologia che colpisce indiscriminatamente piante di ogni età in vivaio, in frutteto, in boschi da legno. Durante la stagione vegetativa i sintomi sono facilmente osservabili sulla parte epigea delle piante malate, dove si manifestano con un iniziale languore parziale o totale della chioma, che mostra microfillia e viraggio del colore fogliare a verde pallido. Successivamente, si nota una rarefazione accentuata e ingiallimento del fogliame e spesso i ricci non vengono portati a maturazione e rimangono sui rami anche durante la stagione invernale. In estate, il forte contrasto tra la chioma folta e verde intenso delle piante sane e la chioma rarefatta e pallida di quelle malate agevola l'individuazione di queste ultime. Contestualmente alla rarefazione ed all'ingiallimento del fogliame, decorticando la pianta al colletto, è possibile notare aree necrotiche di colore marrone scuro-nero con contorno ben definito di forma triangolare e con il vertice rivolto verso l'alto (Figura 10). Sulle grosse radici si notano aree irregolari di tessuto morto di colore scuro; inoltre, è frequente la presenza di un essudato nero che macchia il terreno a contatto con le radici. Gli individui adulti possono essere portati a morte in poche stagioni vegetative (1-3 anni) mentre semenzali e piante molto giovani possono morire anche nell'arco di un solo anno.

Diversamente da quanto avviene a seguito degli attacchi di cancro corticale, le piante di castagno colpite dal mal dell'inchiostro esauriscono completamente la capacità pollonifera e ciò a causa della morte dell'intero apparato radicale.



Figura 10: Sintomi del mal dell'inchiostro: A: microfillia e rarefazione della chioma di una giovane pianta di castagno; B: “fiammata” alla base di un pollone di castagno.

1.4.4 Distribuzione della malattia

La presenza del Mal dell'Inchiostro in Italia è segnalata fin dall'inizio del XX° secolo quando già causava pesanti perdite al patrimonio castanicolo nazionale. Negli ultimi anni tale patologia ha subito una forte recrudescenza, sia a livello europeo che nazionale (Anselmi *et al.*, 1996, 1999; Vannini e Vettraino, 2001; Vettraino *et al.*, 2001, 2004) minacciando numerose aree castanicole causando gravissimi danni. In Italia la malattia è presente in tutto l'areale di distribuzione del castagno con esclusione della sola Sicilia (Anselmi *et al.*, 1999).

Il contenimento e l'eradicazione del Mal dell'Inchiostro sono interventi indispensabili per l'importanza economica (produzione di frutti, legname e funghi) ed ecologica (stabilizzazione dei versanti e regimazione delle acque) che il castagno riveste.

1.4.5 Considerazioni epidemiologiche

Le indagini svolte negli ultimi anni con programmi di sperimentazione finanziati da Enti locali, fonti di finanziamento misti (Regione e Comunità Europea) come l'obiettivo 5b, e fonti di finanziamento comunitarie, come il 5° Programma Quadro, hanno permesso di chiarire molti aspetti inerenti l'epidemiologia e la biologia del Mal dell'Inchiostro.

La malattia è fortemente legata alle attività antropiche e si diffonde prevalentemente attraverso lo scorrimento superficiale delle acque, seguendo le linee di massima pendenza o i tracciati delle strade rurali, forestali e strade provinciali che attraversano comprensori castanicoli (Anselmi *et. al.*, 1999). E' stata notata inoltre la capacità della malattia di diffondersi in contropendenza probabilmente attraverso vettori quali animali o l'uomo stesso che può facilmente trasportare l'inoculo attraverso stivali sporchi di fango infetto o cingoli e pneumatici di mezzi di trasporto.

1.4.6 Eziologia e ciclo biologico del patogeno

Il Mal dell'Inchiostro del castagno è causato da organismi filamentosi del genere *Phytophthora*, molto legati al terreno e alla presenza di acqua liquida nel suolo. Tra le specie associate alla malattia, se escludiamo *Phytophthora cinnamomi* Rands, tuttora molto rara in Italia su castagno, *Phytophthora cambivora* Buisman è certamente quella più pericolosa e maggiormente diffusa (Vettraino *et al.*, 2001).

Il chiarimento di alcuni aspetti della biologia di questo terribile agente patogeno apre la strada alla messa a punto di strategie di lotta potenzialmente efficaci. Il patogeno è presente nei castagneti italiani ed europei con un unico tipo sessuale (Vettraino *et al.*, 2001, 2004), fatto questo che limita al minimo la possibilità di riproduzione sessuata e quindi di formazione degli oogoni vitali che, oltre a rappresentare fonte di variabilità genetica, fungono anche da strutture di resistenza che permettono la sopravvivenza del patogeno in condizioni climatiche avverse. Inoltre questa specie non produce clamidospore anch'esse strutture di conservazione e resistenza. *P. cambivora* è quindi particolarmente sensibile a condizioni climatiche avverse che ne limitano notevolmente la diffusione durante alcuni periodi dell'anno. Esperienze condotte per 2 anni consecutivi in alcuni castagneti del viterbese e del reatino mettono in luce come *P.*

cambivora sia isolabile dal suolo solo in determinati periodi dell'anno, in genere corrispondenti a quelli maggiormente piovosi (Vettraino *et al.*, 2001).

Le informazioni esposte sull'epidemiologia e sulla biologia di *P. cambivora* sono di grande utilità per i risvolti di ordine pratico che possono derivare dalla loro utilizzazione nel campo del monitoraggio e valutazione del rischio di infezione.

1.4.7 Lotta

I metodi volti a contenere e/o eradicare la malattia si basano su una profonda conoscenza degli aspetti biologici ed epidemiologici del patogeno.

Nel corso della storia del Mal dell'Inchiostro sono stati elaborati diversi interventi di lotta, tra cui:

- una buona regimazione e canalizzazione delle acque superficiali per evitare il trasporto incontrollato dell'inoculo, specialmente dalle aree infette a quelle sane;
- evitare dissodamento e movimento di terra in castagneti infetti, soprattutto in prossimità delle piante, in quanto ciò favorisce la dispersione dell'inoculo nell'ambiente;
- sistemare strade e viottoli infraboschivi, con pulizia periodica delle scoline laterali al fine di allontanare le acque infette ed evitare accumulo di inoculo nei fanghi;
- evitare il passaggio di automezzi e persone nelle aree particolarmente colpite soprattutto nei periodi di maggiore pressione dell'inoculo. Un eventuale lavaggio a pressione di pneumatici, cingoli e scarponi è auspicabile specialmente quando si transita da aree infette ad aree sane;
- in caso di aree ad alta vulnerabilità alla diffusione della malattia sarebbe opportuno creare lungo le strade che attraversano o costeggiano castagneti infetti una fascia di rispetto occupata da prati o specie non suscettibili.

Ai fini curativi, accertata la presenza di piante malate occorre:

- abbattere gli individui morti o infetti, possibilmente durante i mesi più freddi, provvedendo all'asportazione delle ceppaie e delle grosse radici. Durante tali interventi è fondamentale fare attenzione a non diffondere

terreno o materiali infetti e bruciare o portare in apposita discarica i residui legnosi e la segatura. La buca originata dall'asportazione della ceppaia dovrebbe essere trattata prima delle piogge primaverili con solfato di rame e calce in eguale misura. Nel caso in cui non fosse possibile asportare la ceppaia, questa e quelle delle piante limitrofe dovrebbero essere scalzate e trattate con poltiglia bordolese (5% solfato di rame, 5% calce in soluzione acquosa). In ogni caso non è opportuno ripiantare il castagno, o piante ospiti del patogeno, prima di 5-8 anni;

- applicare il metodo “Gandolfo” nelle zone dove la temperatura scende sotto lo zero. Detto metodo consiste nello scalzare le ceppaie di piante infette ed esporle ai rigori invernali in grado di uccidere il micelio presente nei tessuti. Tale pratica può essere integrata dalla somministrazione di anticrittogamici sulle superfici esposte.

Per quanto riguarda i trattamenti chimici, l'uso di acilaniline, come il Metalaxyl, ha permesso di ottenere risultati positivi nel controllo di *P. cambivora* su mandorlo, di *P. cinnamomi* su quercia (Luque *et al.* 2002; Thomidis e Elena 2001; Wicks 1988). Purtroppo l'uso prolungato dei suddetti prodotti porta ad un aumento della resistenza da parte della popolazione di *Phytophthora*, determinando una riduzione dell'efficacia dei trattamenti. Nuova frontiera nella lotta verso questo tipo di fitopatologie sono i trattamenti endoterapici con fosfito di potassio (Darrieutort e Lecomte 2007; Fernández-Escobar *et al.* 1999; Shearer *et al.* 2006; Wicks e Hall 1990; Whiley *et al.* 1992).

2 OBIETTIVI

Scopo della ricerca è l'applicazione, alla patologia forestale, di metodologie di remote sensing, GIS e geostatistica per l'elaborazione di mappe tematiche del Mal dell'Inchiostro del castagno nel centro Italia per ampliare le conoscenze epidemiologiche e per caratterizzare i parametri territoriali prevalentemente coinvolti nel mal dell'inchiostro del castagno. L'individuazione dei fattori che favoriscono l'affermazione e la diffusione della malattia è un processo essenziale per produrre mappe di rischio che possono essere impiegate come un valido aiuto nel campo della pianificazione forestale.

Gli obiettivi specifici hanno riguardato:

- l'individuazione, tramite tecniche di remote sensing, dei focolai del mal dell'inchiostro.
- Elaborazione dei dati in ambiente GIS con moduli di geostatistica (modelli spaziali).

I lavori oggetto di questa tesi sono stati svolti nell'ambito di diversi progetti di ricerca:

- *“nuove metodologie di remote sensing per il monitoraggio del mal dell'inchiostro del castagno e lo sviluppo di mappe di rischio fitopatologico”*. Ente finanziatore Parco Nazionale Gran Sasso e Monti della Laga;
- *“Messa a punto e attuazione di reti di monitoraggio e di valutazione del rischio per il mal dell'inchiostro del castagno” e “Elaborazione di modelli sperimentali per il contenimento del mal dell'inchiostro. Valorizzazione delle risorse forestali”*. Ente finanziatore regione Lazio: PRAL e DOCUP Obiettivo 5b Progetto I.1.3 07.002;

3. APPLICAZIONE 1

INDIVIDUAZIONE, TRAMITE TECNICHE DI REMOTE SENSING, DI FOCOLAI DEL MAL DELL'INCHIOSTRO DEL CASTAGNO, MAPPATURA, DETERMINAZIONE DELL'ESTENSIONE E CARATTERIZZAZIONE DELLE VARIABILI TERRITORIALI DI MAGGIORE INTERESSE.

3.1 MATERIALI E METODI

3.1.1 Monitoraggio aereo delle aree interessate dal mal dell'inchiostro

L'attività di ricerca ha riguardato l'analisi di immagini telerilevate per il monitoraggio delle condizioni fitosanitarie dei castagneti del Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga e del Parco Nazionale dei Monti Sibillini e delle aree circostanti.

3.1.2 Descrizione dell'area studiata

Per definire le aree che sarebbero state interessate dal sorvolo sono stati individuati i castagneti tramite la carta dell'uso del suolo **Corine Land Cover Map (CLC)**. Il Corine Land Cover Map è un progetto operativo finalizzato al rilievo delle classi di copertura del suolo per tutto il continente europeo.

La copertura *Corine Land Cover 90* e i suoi successivi aggiornamenti sono riconosciuti a livello europeo quali strumenti di base per la definizione delle politiche territoriali da parte di diversi servizi della Commissione Europea quali la DG-Politiche Regionali (*DG-Regional policy*), la DG-Ambiente (*DG Environment*) e la DG Agricoltura (*DG Agriculture*), oltre all'AEA e ai nodi della rete costituita dai Centri Tematici Europei (*European Topic Centres - ETCs*). Essa inoltre rappresenta uno strato informativo per lo sviluppo di applicazioni o modelli di analisi spaziale su base GIS finalizzati alla produzione d'informazioni complesse utili a supportare le scelte dei decisori politici a livello europeo e nazionale. Il CLC prevede la realizzazione di una cartografia della copertura del suolo che deriva dalla fotointerpretazione di immagini da satellite Landsat TM a scala 1:100.000. La superficie minima cartografabile è di 25 ettari, che corrisponde sulla carta ad un quadrato di 5 mm di lato.

Dal CLC dell'Italia, georeferenziata in UTM-WGS 84 fuso 33, sono stati estrapolati i poligoni che delimitano le aree a castagno:

CODICE Corine Land Cover (CLC)	DESCRIZIONE	LIVELLO
3114	Boschi a prevalenza di castagno	4°

ed il volo ha interessato i comuni sui quali essi insistevano. Più precisamente sono stati sorvolati i comuni di: Valle Castellana (TE), Acquasanta Terme (AP), Arquata del

Tronto (AP), Montegallo (AP), Montemonaco (AP), Montefortino (AP), Pievebovigliana (MC), Fiastra (MC), San Ginesio (MC), Sarnano (MC), Crognaleto (TE), Montereale (AQ), Borbona (RI), Macchia Lunga di Prungoleto (AQ) (Figura 11).

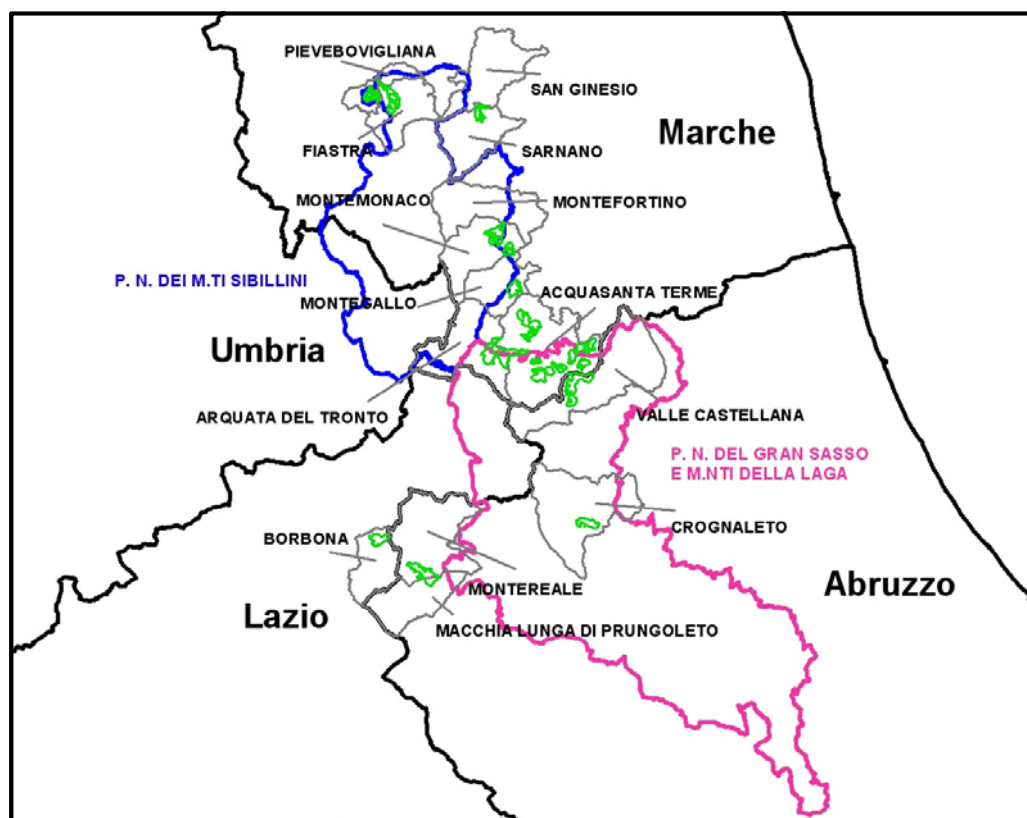


Figura 11: Territorio del Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga (area delimitata in viola) e del Parco Nazionale dei Monti Sibillini (area delimitata in azzurro). In verde i poligoni estrapolati da CLC IV livello per la copertura castanicola e comuni (confini in grigio) nei quali cadono.

Ulteriore cartografia di base, oltre al CLC, georeferenziata sulla base della proiezione UTM-WGS84 fuso 33, è rappresentata dalla Carta Tecnica Regionale (CTR) con scala 1:10.000 e dalle ortofoto a colori AGEA (ex AIMA) con risoluzione a 1 m della regione Abruzzo e Marche.

Le aree castanicole, individuate tramite CLC, sono state modificate, sulla base delle ortofoto al fine di delimitare le sole aree castanicole (Figura 12). Tramite l'estensione XTOOLS di ArcView 3.2 sono stati estrapolati gli ettari di castagneti. In totale il sorvolo ha interessato 5214,69 ettari distribuiti come riportato in Tabella 2 per quanto riguarda i territori dei due parchi e le aree circostanti ma non incluse in essi.

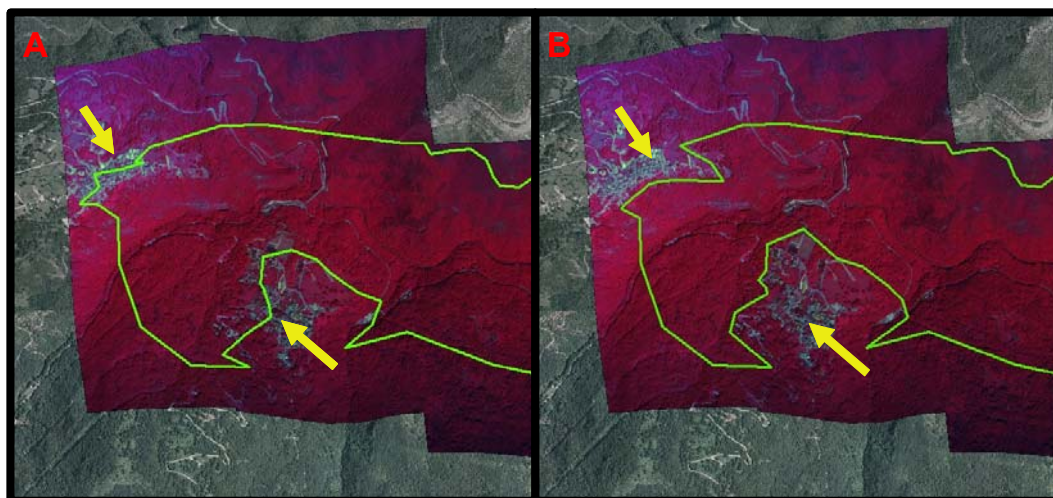


Figura 12: Parte dell'immagine aerea del comune di Crognaleto restituita su ortofoto in ambiente GIS. In verde parte del poligono del Corine Land Cover che individua i boschi di castagno. In A il CLC originale che ingloba aree edificate e in B il CLC dopo le opportune modifiche che delimitano le sole aree castanicole. Le frecce indicano le variazioni più evidenti.

Tabella 2: distribuzione dei castagneti nei territori dei Parchi e fuori

TERRITORIO	SUP. CAST. (ha)	SUP. CAST. (% riferita alla sup. totale)
Parco Naz. del Gran Sasso e M.ti della Laga	2107,96	40,42
Parco Naz. dei M.ti Sibillini	731,75	14,03
Aree castanicole fuori dai Parchi Nazionali	2374,99	45,54
TOTALE	5214,69	100,00

L'area studiata è caratterizzata dalla presenza di castagneti, prevalentemente puri, che vegetano ad una quota compresa tra i 600 e i 1200 metri sul livello del mare. Oltre al mal dell'inchiostro è presente anche il cancro corticale del castagno causato da *Cryphonectria parasitica* (Murr) Barr.

3.1.3 Acquisizione ed elaborazione delle immagini

Le immagini digitali multispettrali sono state acquisite dalla Società Terrasystem s.r.l. la quale si è occupata anche dell'elaborazione (correzione, tecniche di registrazione, ortoproiezione e mosaicatura) secondo la tecnica descritta da Tramontana (2005). L'acquisizione delle immagini, avvenuta il 31 luglio ed il 1 agosto del 2006, è

stata eseguita mediante il dispositivo aviotrasportato D.F.R (Noce, 2004), in 3 bande di colore: 550 nm (verde), 680 nm (rosso) e 780 nm (infrarosso vicino-NIR). Al termine del processo di elaborazione sono state prodotte 14 immagini, per ciascuna delle quali è stata applicata la metodologia di seguito descritta per individuare i focolai del mal dell'inchiostro.

3.1.4 Metodologia per l'individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro

L'individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro è stata condotta nel modo seguente:

- ground activity allo scopo di campionare le classi tematiche d'interesse: piante asintomatiche, piante sintomatiche, piante morte e zone di radura;
- studio della separabilità delle firme spettrali;
- classificazione delle immagini;
- individuazione delle piante morte;
- produzione di uno strato tematico finale con la localizzazione dei probabili focolai;

3.1.4.1 Ground Activity

Il monitoraggio aereo è stato affiancato da operazioni di ground activity nel luglio del 2006. Per la classificazione delle immagini si è ricorsi al metodo guidato. Il focolaio, scelto come training sites, ricade nell'area di Arola (comune di Acquasanta Terme (AP)) (Figura 13), dove la presenza di *P. cambivora* è stata precedentemente accertata (Vannini *et al.*, 2009).

Durante il monitoraggio a terra, attraverso l'uso del ricevitore GPS (modello GS20 Leica Geosystems, Inc. Heerbrugg, Switzerland), sono state rilevate complessivamente 40 coordinate geografiche, 10 per ogni tipologia considerata: zone di radura, piante asintomatiche, sintomatiche e morte. È stata eseguita la correzione differenziale tramite la stazione fissa a L'Aquila. Le zone di training sites sono state restituite, sotto forma di shapefile poligonali, sulle immagini a falsi colori mediante il software Arcview ver. 3.2 della ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, USA), permettendo di individuare i focolai della malattia e la risposta spettrale delle varie classi (Figura 14). Ad una prima analisi visiva si è potuto

constatare che a causa della sintomatologia tipica della patologia, che determina microfillia (diminuzione delle dimensioni delle foglie di circa il 13%), viraggio del colore della chioma seguita da una progressiva rarefazione, le piante malate appaiono, nelle immagini a falsi colori, con aspetto “sfumato”, rendendole evidenti rispetto alle piante sane (Figura 14).

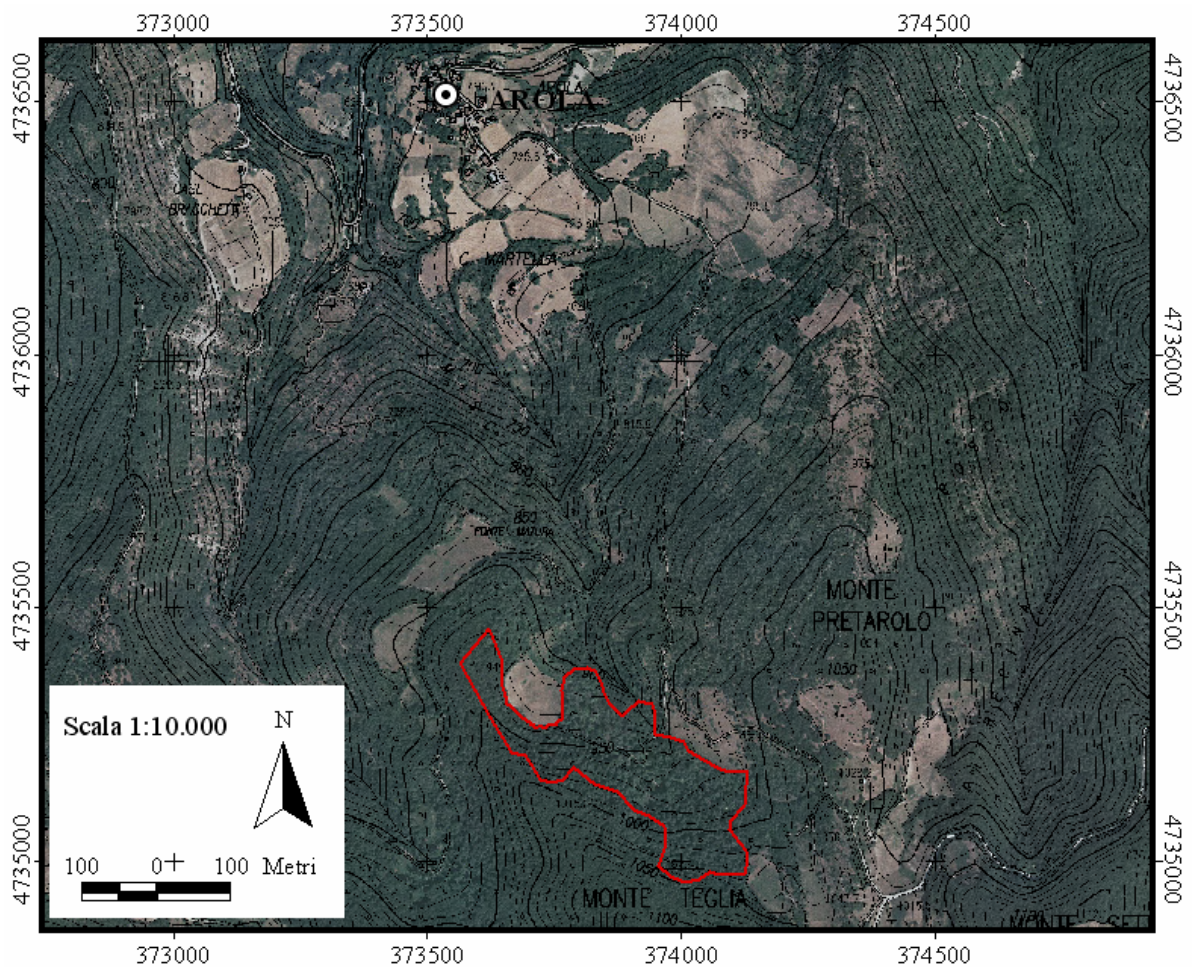


Figura 13: restituzione su ortofoto della localizzazione geografica del castagneto sito ad Arola (AP), delimitato in rosso, utilizzato come training sites per generare le firme spettrali delle diverse classi tematiche.

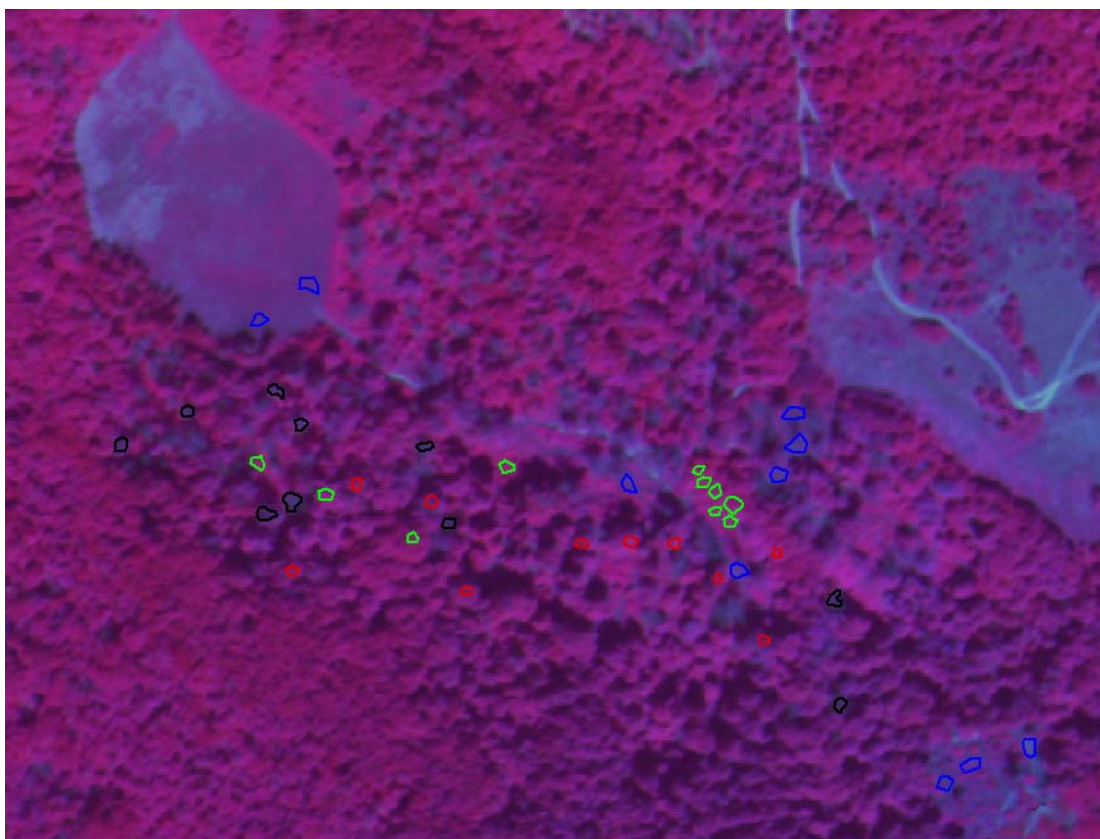


Figura 14: localizzazione, sull'immagine multispettrale a falsi colori, dei training sites delle classi tematiche d'interesse: piante asintomatiche (verde), piante sintomatiche (rosso), piante morte (nero), zone di radura (azzurro).

3.1.4.2 Separabilità delle firme spettrali

La separabilità delle firme spettrali è stata analizzata tramite il software Idrisi Andes® ver. 15 (Clark Labs, Clark University, Worcester, MA, USA).

Lo shapefile poligonale, con i poligoni che individuano le classi tematiche d'interesse, è stato importato in Idrisi. Mediante il modulo Makesig sono state generate le firme spettrali, per le classi tematiche scelte, nelle singole bande delle immagini. Con il modulo Sigcomp sono state comparate le firme spettrali precedentemente generate e la separabilità spettrale è stata misurata con il modulo Sepsig.

La capacità di discriminare diverse tipologie di suolo è tanto maggiore quanto maggiore è la differenza in termini spettrali tra le classi considerate e quanto più omogenee sono le classi stesse. Pertanto è importante eseguire una misura della separabilità spettrale dei valori medi di riflettanza acquisiti per ogni classe considerata. Tra le diverse funzioni statistiche messe a punto per questo scopo, è molto utilizzata la

funzione Transformed Divergence (Swain et al., 1978; Jensen, 1996a) che permette di valutare la separabilità spettrale tra coppie di classi:

$$TD_{ij} = 2000 (1 - \exp(-D_{ij}/8))$$

dove

i e j sono le firme spettrali delle classi da confrontare;

D_{ij} è la funzione divergenza (Swain et al., 1978) definita come:

$$D_{ij} = 1/2 \operatorname{tr} ((C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1})) + 1/2 \operatorname{tr} ((C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T)$$

in cui

C_i è la matrice di covarianza della firma spettrale della classe i

μ_i è il vettore medio della firma i

tr è la funzione traccia della matrice

T è la funzione trasposizione

La funzione Transformed Divergence attribuisce un peso che decresce in modo esponenziale all'aumentare della distanza tra le classi. I valori possono essere compresi tra 0 e 2000: per risultati al di sotto di 1700 la separazione delle classi è scarsa, tra 1700 e 1900 si ha una buona separabilità, al di sopra di 1900 le classi sono ben separate (Jensen 1996a).

3.1.4.3 Classificazione tramite l'algoritmo Maximum Likelihood (ML)

Nell'ambito della classificazione supervisionata, il Maximum Likelihood (algoritmo di massima verosimiglianza) è tra i metodi statistici più utilizzati, in quanto di facile applicazione e presente nella maggior parte dei software di elaborazione delle immagini. Questo algoritmo si basa sul fatto che ogni classe spettrale, per ogni banda, possa essere descritta mediante una distribuzione di probabilità Gaussiana. Tale ipotesi è plausibile in quanto la maggior parte dei pixel di riferimento di una classe ha valori estremamente simili e si distribuisce intorno alla media di questi valori. Dal campione di riferimento, per ogni classe considerata, si estrapolano la media, la varianza, la covarianza e le funzioni di probabilità che derivano dall'andamento della quantità di pixel presenti in una classe all'allontanarsi dal punto medio della classe stessa. In pratica, si delineano delle curve concentriche di equiprobabilità che si allontanano dal

punto medio della classe (Trianni, 2006). Ciascun pixel è assegnato alla classe con la massima probabilità. Il software Idrisi Andes, per classificare le immagini con l'algoritmo a massima verosimiglianza, mette a disposizione il modulo Maxlike che si basa sulla teoria probabilistica Bayesiana. In particolare, ricorrendo alle informazioni estratte dalle classi dei training sites di riferimento, il modulo Maxlike, usa i valori di media, varianza e covarianza delle firme spettrali per stimare la probabilità di appartenenza di un pixel a dette classi (Idrisi, 2006). Il prodotto finale è un'immagine raster in cui ogni classe tematica è rappresentata da un diverso colore.

3.1.4.4 Individuazione delle piante morte

I poligoni delimitanti le piante morte sono stati estrapolati, con il software Idrisi Andes, elaborando le immagini dell'NDVI e della banda del rosso secondo la metodologia descritta da Sun *et al.* (2005).

Le immagini dell'NDVI sono state riclassificate, con il modulo Reclass in un'immagine binaria, assegnando "1" a valori inferiori a 0.3 (aree non vegetate) e "0" a valori superiori a 0.3 (aree vegetate). Le aree non vegetate sono caratterizzate dalla presenza di piante morte, zone di radura e poligoni estremamente piccoli. Questi ultimi costituiscono una sorta di "rumore dell'immagine" e come tali sono stati eliminati tramite il modulo Generalization. In questo modo è stata prodotta un'immagine delle aree non vegetate dove sono raggruppate le piante morte e le zone di radura. Per poter separare queste due tipologie di copertura del suolo è stata sfruttata la forte riflettanza delle zone di radura nella banda del rosso. Il modulo Histo è stato impiegato per individuare una soglia di separazione che è risultata essere pari a 60. L'immagine della banda del rosso è stata riclassificata, con il modulo Reclass in un'immagine binaria, assegnando "1" a valori inferiori a 60 e "0" a valori superiori a 60 (zone di radura). Con questo metodo, è stato osservato che, generalmente, solo la porzione di pixel situate al centro delle zone di radura viene evidenziata come tale mentre i pixel più esterni, che appartengono ugualmente alle zone di radura, vengono omessi. Le due immagini riclassificate sono state intersecate tra di loro con il modulo Overlay in questo modo si è ottenuta un'immagine in cui è stata eliminata la parte centrale delle zone di radura. Con il modulo Group sono stati raggruppati pixel contigui e con il modulo Area è stato possibile associare la superficie ad ogni gruppo di pixel. Ipotizzando la presenza di

piante morte vicine è stato ritenuto ragionevole eliminare superfici continue superiori a 500 m². L'immagine prodotta è stata quindi riclassificata in un'immagine binaria, con il modulo Reclass, assegnando "1" ai valori inferiori a 500 (piante morte) e "0" ai valori superiori a 500. L'immagine raster risultante mostra la localizzazione delle piante morte.

3.1.4.5 Individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro

Le immagini raster, ottenute con la classificazione tramite l'algoritmo a massima verosimiglianza e quelle ottenute tramite il processo di individuazione delle piante morte, sono state importate in ArcGis 9.2 della ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, USA) dove sono state convertite in immagini vettoriali e sono state sovrapposte. Poiché il mal dell'inchiostro si distribuisce a macchia d'olio ed è caratterizzato dall'alternanza di piante asintomatiche, sintomatiche e morte, le aree che mostravano questo avvicendamento sono state delimitate da poligoni (Figura focolai) e considerate come probabili focolai della malattia.

3.1.5 Stima dell'accuratezza

La validazione del lavoro svolto è stata eseguita tramite la costruzione della matrice di confusione con i dati rilevati in seguito ai sopralluoghi condotti nell'estate del 2007. La matrice di confusione è formata da tante righe e colonne quante sono le classi che si analizzano. Le righe rappresentano i valori della classificazione, le colonne la verità a terra. Sulla diagonale della matrice è riportato il numero di "unità campione" (pixel, poligoni regolari o irregolari, punti, ecc.) correttamente classificate per ogni classe. In tabella 3 è riportato un generico esempio di matrice di confusione.

Tabella 3: esempio di matrice di confusione formata da q classi.

		Verità a terra				
Valori della classificazione		a	b	...	q	
	a	n_{aa}	n_{ab}	...	n_{aq}	n_{a+}
	b	n_{ba}	n_{bb}	...	n_{bq}	n_{b+}
	...	...	...	...	...	...
	q	n_{qa}	n_{qb}	...	n_{qq}	n_{q+}
		n_{+a}	n_{+b}	...	n_{+q}	n

Dalla matrice di confusione si ottengono tre indici: *overall*, *producer's* e *user's accuracy*. La *overall accuracy* (accuratezza totale) si ottiene dividendo tutte le unità campione correttamente classificati (dati della diagonale) per il numero totale di unità campione nella matrice. La *producer's accuracy* (accuratezza del produttore) si ottiene dividendo il numero di unità campione correttamente classificati che appartengono ad una classe per la somma dei valori della colonna della stessa classe. La *user's accuracy* (accuratezza dell'utente) si ottiene, invece, dividendo il numero di unità campione correttamente classificati che appartengono ad una classe per la somma dei valori della riga della stessa classe. Nel caso della *producer's accuracy*, si parla anche di errori di omissione, per cui le unità campione appartenenti ad una classe non vengono attribuiti ad essa (indicati nelle colonne); nel caso della *user's accuracy* si parla di errori di commissione o di inserimento, per cui alcune unità campione vengono assegnati a classi diverse da quella alla quale dovrebbero appartenere (indicati nelle righe).

Ulteriori informazioni riguardo alla matrice di confusione possono essere ottenuti tramite il coefficiente di concordanza Khat di Cohen o coefficiente Kappa che include gli elementi al di fuori della diagonale per dare una stima che incorpori anche la misura degli errori di omissione e di commissione (Jensen, 1996b). Il coefficiente k misura le concordanze fra dati reali e risultati della classificazione, escludendo quelle attribuibili al caso. Questo indice vale 1, in caso di perfetta concordanza; è pari a 0 quando i dati sono classificati in modo casuale, ma può assumere anche valori negativi, se la concordanza delle classificazioni è peggiore di quella casuale (Lionetti, 1991).

$$\text{coefficiente } k = \frac{N \sum_{k=1}^q n_{kk} - \sum_{k=1}^q n_{k+} n_{+k}}{N^2 - \sum_{k=1}^q n_{k+} n_{+k}}$$

dove:

N = somma di tutte le unità di campionamento della matrice di confusione;

$\sum_{k=1}^q n_{kk}$ = somma degli elementi della diagonale della matrice di confusione;

$\sum_{k=1}^q n_{k+} n_{+k}$ = somma dei prodotti del totale della colonna k per il totale della riga k .

Le procedure di accuratezza implicano l'uso di verità a terra per valutare la bontà di una classificazione. Queste informazioni si possono ricavare da mappe, foto aeree o verifiche, tramite rilievi a terra mediante l'uso di GPS. Le informazioni rilevate vengono restituite in ambiente GIS, in modo da poterle sovrapporre e confrontare con le classi di interesse.

La procedura per determinare l'accuratezza implica tre fasi (Stehman *et al.*, 1998):

- definizione dello schema di campionamento
- definizione del protocollo di rilievo
- definizione del protocollo di stima ed analisi

Schema di campionamento. Occorre sottolineare che la validità statistica delle stime di accuratezza è basata su un campionamento probabilistico, ossia uno schema di campionamento in cui ogni punto potenziale di campionamento dovrebbe avere una probabilità non nulla di essere scelto e queste probabilità dovrebbero essere note a priori (Stehman *et al.*, 1998). Lo schema di campionamento è il protocollo attraverso il quale viene selezionata l'unità di campionamento di riferimento. L'unità di campionamento è l'elemento fondamentale sul quale si basa la stima dell'accuratezza; esso rappresenta il punto d'unione tra la localizzazione geografica sulla mappa e la corrispondente posizione geografica in campo (Stehman *et al.*, 1998). Per le aree castanicole studiate è

stato costruito un grid con celle da 10 x 10 metri, tramite l'estensione, per Arcview, MILA utilities (ver. 3,4). Come unità di campionamento è stata adottata una cella in quanto rappresenta la dimensione minima in cui è compresa almeno una pianta di castagno. Tramite l'estensione per Arcview: Random Point Generator, (ver. 1.3) sono stati estrapolati un punto random per ogni area sospetta e cinquanta punti random distribuiti nelle aree asintomatiche. Ogni punto è stato assegnato alla rispettiva cella di appartenenza per la quale è stato determinato il centroide mediante l'estensione per Arcview: the Africover extension. Per avere la massima sicurezza di verifica in campo è stato deciso di esaminare 8 celle contigue ad ogni punto estratto random, per un totale di 9 celle (Figura 15).

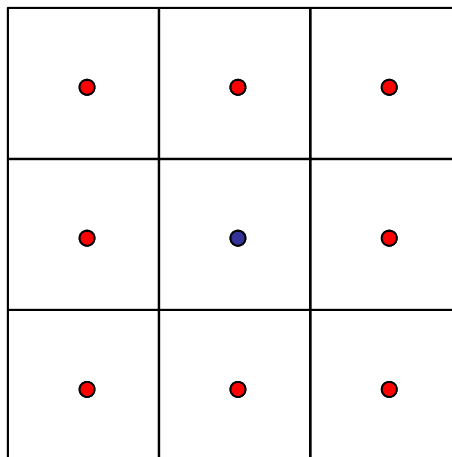


Figura 15: schema di verifica seguito in campo. La cella centrale è quella estratta random e le altre sono state aggiunte per ottenere la massima sicurezza di verifica in campo.

Protocollo di rilievo. È il protocollo attraverso il quale si esegue il controllo delle unità di campionamento per le classi da verificare (Stehman *et al.*, 1998) che in questo lavoro sono la presenza o assenza dei sintomi del mal dell'inchiostro.

Tutte le unità di campionamento individuate sono state sottoposte a verifica in campo tramite l'uso del GPS in modalità navigation nel quale sono state registrate le coordinate geografiche dei centroidi delle unità di campionamento da verificare.

Definizione del protocollo di stima ed analisi. È stato realizzato attraverso la costruzione della matrice di confusione.

3.1.6 Produzione delle mappe dei focolai

Al termine della validazione del lavoro eseguito, il layer con i poligoni, delimitanti le aree castanicole interessate dal mal dell'inchiostro del castagno, è stato sovrapposto alle ortofoto per la produzione di mappe tematiche.

3.1.7 Quantificazione dei focolai

Tramite l'estensione XTOOLS di ArcView 3.2 sono stati quantificati gli ettari interessati dal mal dell'inchiostro.

3.1.8 Implementazione di strati informativi nel GIS

Il sistema GIS prodotto è stato ampliato con nuovi strati informativi al fine di studiare eventuali correlazioni presenti fra l'intensità di malattia dei focolai ed alcuni parametri territoriali.

Attraverso la digitalizzazione delle curve di livello della CTR e la loro successiva elaborazione con lo Spatial Analyst, del software ArcGis 9.2, si è creato un DEM, in formato Grid, con celle regolari di 20 m di lato.

I parametri che sono stati esaminati sono la rete viaria e le linee di compluvio.

3.1.8.1 Linee di compluvio e rete viaria

Attraverso il modulo Hydrology Modeling di Arc-Gis 9.2 sono state generate le linee di compluvio.

Le CTR, le ortofoto e le immagini a falsi colori sono state impiegate come base per digitalizzare la rete viaria.

Questi due nuovi strati informativi sono stati sovrapposti al *layer* relativo alla diffusione della malattia. Tramite l'estensione Geoprocessing Wizard di ArcView 3.2 sono state quantificate le strade ed i compluvi che attraversano i focolai.

Zwankhuizen *et al.* (1998) esprimono l'intensità di malattia di un focolaio come il numero di polloni per metro quadro. Con il telerilevamento non sempre sono individuabili le singole piante in quanto chiome adiacenti possono apparire come un unico individuo, per questa ragione la precedente definizione, in questo lavoro, è stata riadattata ed espressa come il rapporto della superficie malata all'interno del focolaio per la superficie del focolaio stesso.

La densità di strade e compluvi (espressa come lunghezza lineare su superficie) è stata correlata all'intensità di malattia del focolaio.

3.1.9 Elaborazione statistica

L'analisi statistica tra la densità delle strade e dei compluvi e la superficie castanicola interessata dal mal dell'inchiostro è stata condotta attraverso il software Graphpad InStat® 4.00 (San Diego, California, USA).

3.2 RISULTATI

3.2.1 Monitoraggio aereo delle aree interessate dal mal dell'inchiostro

L'uso integrato del GIS e del telerilevamento ha permesso di monitorare 5214,69 ha di aree castanicole (Figura 16). Alcune porzioni delle immagini aeree presentavano zone d'ombra che non è stato possibile analizzare (Figura 17).

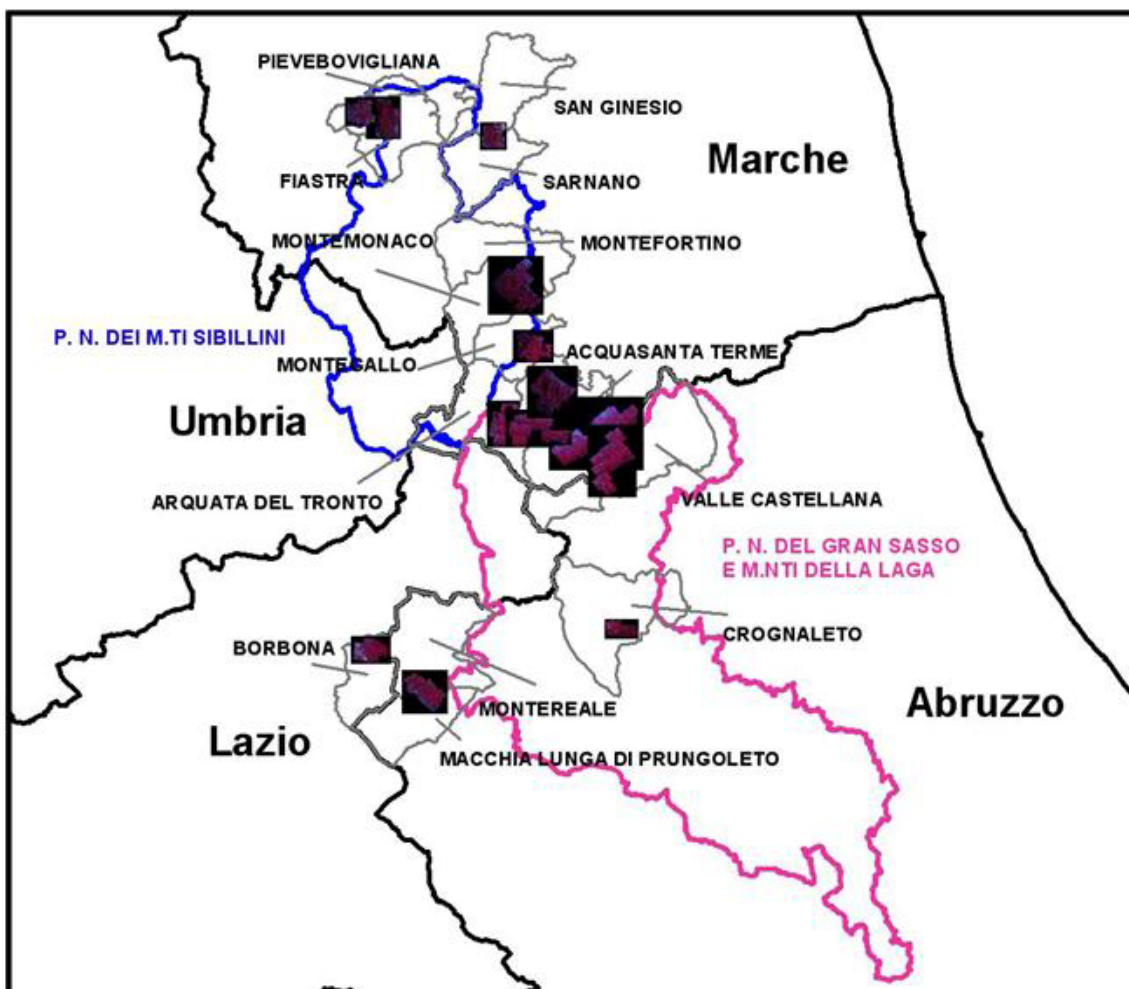


Figura 16: immagine dell'intera area monitorata, con le 14 immagini in falsi colori che sono state impiegate per l'individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro.

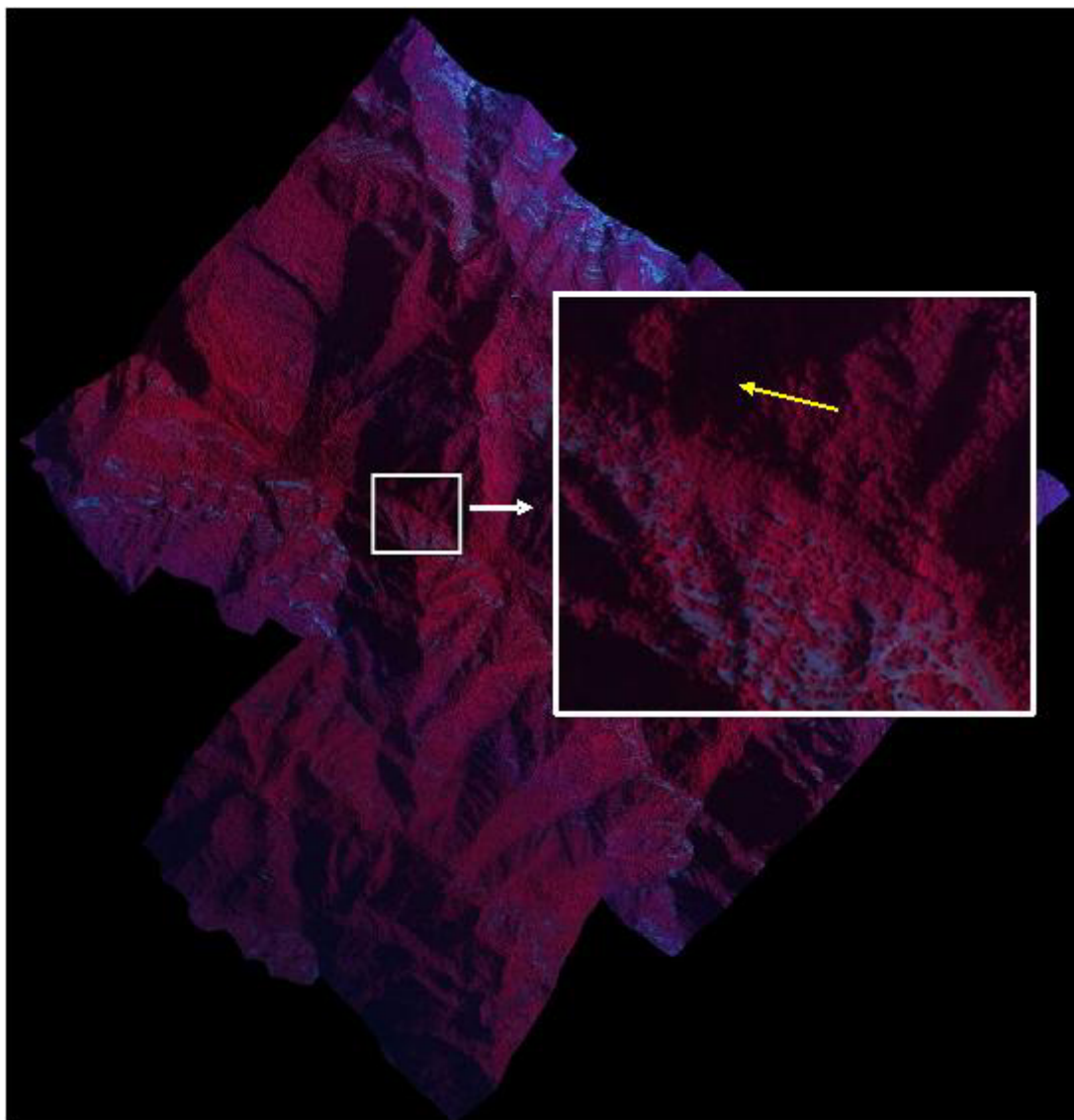


Figura 17: immagine aerea in falsi colori. Nel riquadro bianco un particolare che illustra una zona d'ombra (freccia gialla).

3.2.1.1 Metodologia per l'individuazione dei focolai del mal dell'inchiostro

Le operazioni di ground activity hanno permesso di delimitare il focolaio di Arola e di utilizzarlo come training sites per le diverse classi tematiche d'interesse. Per le classi considerate sono state generate le firme spettrali. Una prima analisi qualitativa ha permesso di visualizzarne l'andamento su un grafico (Figura 18). La matrice, in tabella 4, riporta i valori di separabilità, per le firme spettrali delle diverse classi, calcolati con il metodo Transformed Divergence, al fine di confrontare ogni possibile coppia di classi.

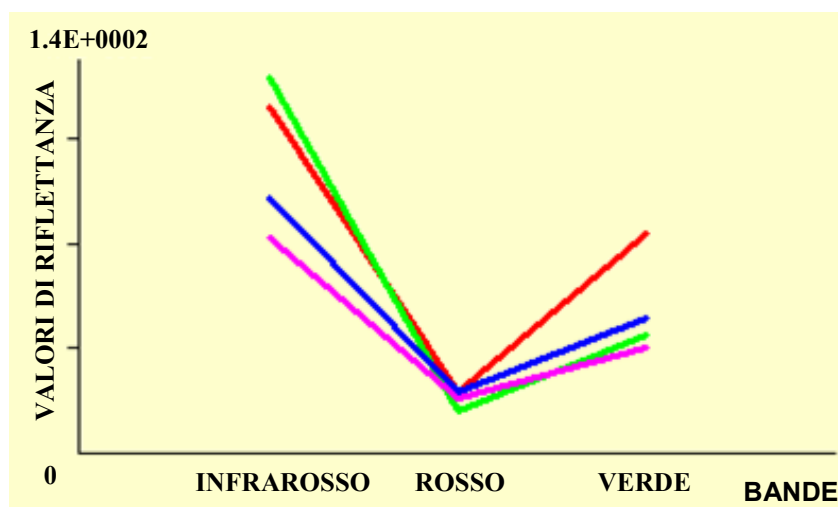


Figura 18: grafico per la comparazione spettrale per le diverse bande. Piante asintomatiche (verde), piante sintomatiche (rosso), piante morte (azzurro) e zone di radura (rosa).

Tabella 4: matrice di separabilità calcolata tramite il metodo Transformed Divergence per le firme spettrali delle classi tematiche considerate. (TD=2000 massima separabilità; 1900 ÷ 2000 buona separabilità; 1700 ÷ 1900 media separabilità; < 1700 scarsa separabilità).

Classe tematica	1	2	3	4
1 Piante asintomatiche	0	2000	2000	2000
2 Piante sintomatiche	2000	0	2000	2000
3 Piante morte	2000	2000	0	1690.11
4 Zone di radura	2000	2000	1690.11	0

La classificazione, tramite l'algoritmo a massima verosimiglianza, ha permesso di ottenere tante immagini raster quante erano le immagini multispettrali di partenza. In Figura 19 è illustrata l'area castanicola di Crognaleto (TE) in cui ogni classe tematica è rappresentata da un diverso colore e le classi tematiche "piante morte" e "zone di radura", a causa della loro scarsa separabilità ($TD = 1690.11$), sono state raggruppate in un'unica categoria. A questo elaborato è stato sovrapposto quello ottenuto in seguito al processo di individuazione delle piante morte (Figura 20) dove vengono rappresentate, con colori diverse, le quattro classi tematiche d'interesse.

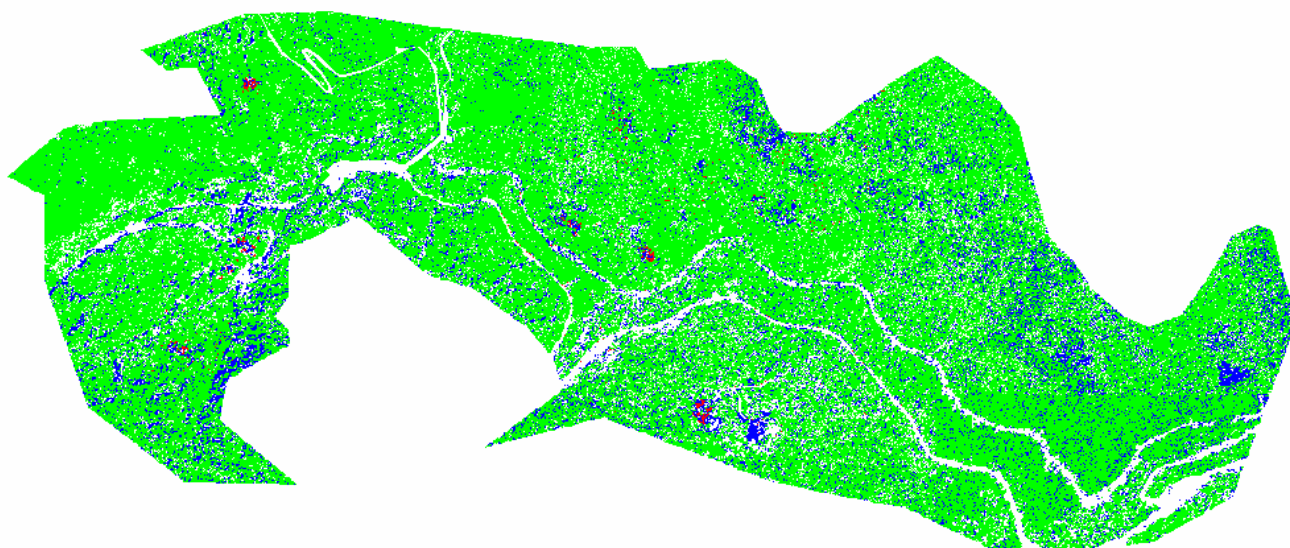


Figura 19: Classificazione con l'algoritmo a massima verosimiglianza dell'area castanicola del Comune di Crognaleto (TE). In verde le piante di castagno asintomatiche, in rosso le sintomatiche, in azzurro il raggruppamento per le piante morte e le zone di radura, in bianco tutto ciò che non rientra nelle classi tematiche d'interesse (ombra delle piante, strade, corsi d'acqua, costruzioni, etc.).

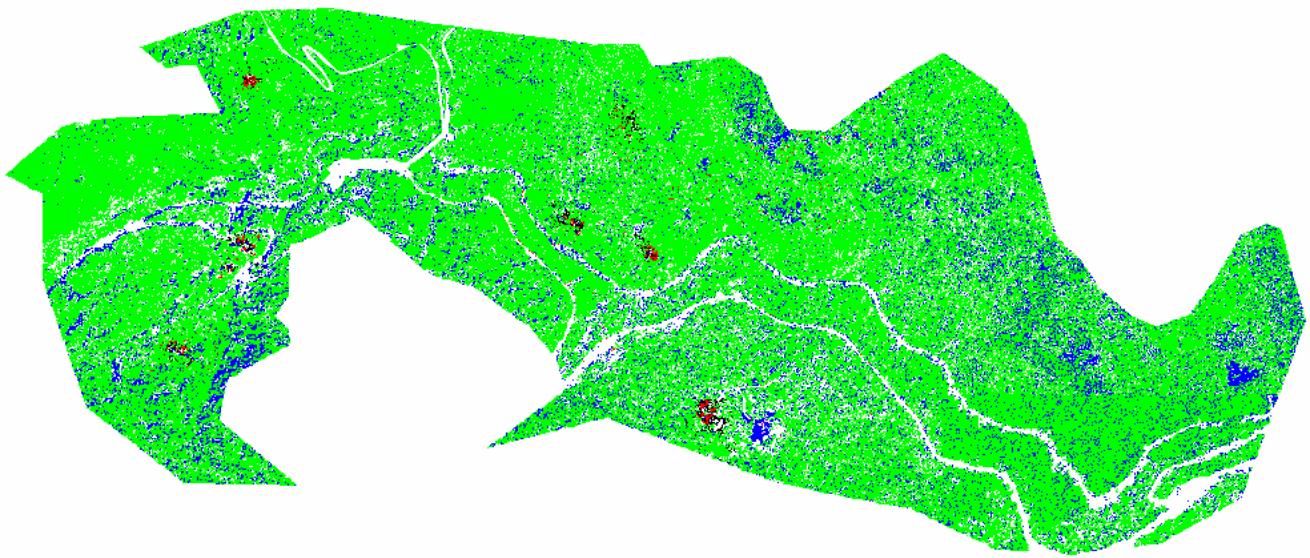


Figura 20: Classificazione con l'algoritmo a massima verosimiglianza dell'area castanicola del Comune di Crognaleto (TE). In verde le piante di castagno asintomatiche, in rosso le sintomatiche, in nero le morte, in azzurro le zone di radura, in bianco tutto ciò che non rientra nelle classi tematiche d'interesse (ombra delle piante, strade, corsi d'acqua, costruzioni, etc.).

Tutte le immagini sono state esaminate nel dettaglio (Figura 21) e le zone con alternanza di piante asintomatiche, sintomatiche e morte, sono state delimitate da poligoni (Figura 22) e considerati probabili focolai del mal dell'inchiostro.

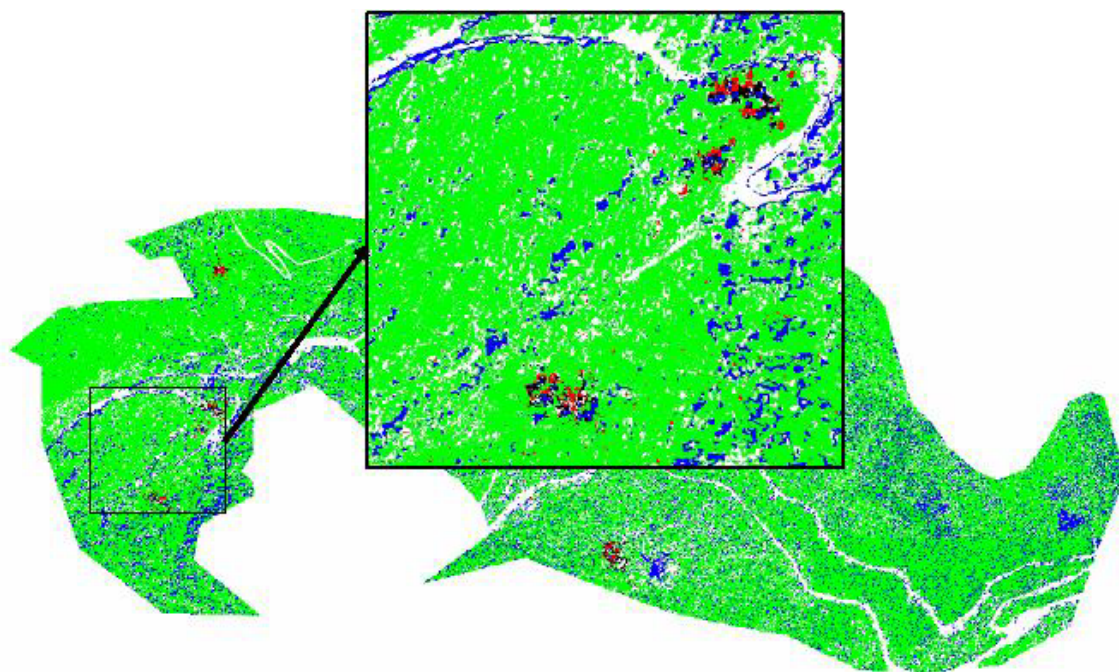


Figura 21: ingrandimento di una porzione dell'area castanicola di Crognaleto (TE) classificata con l'algoritmo a massima verosimiglianza. In verde le piante di castagno asintomatiche, in rosso le sintomatiche, in nero le morte, in azzurro le zone di radura, in bianco tutto ciò che non rientra nelle classi tematiche d'interesse (ombra delle piante, strade, corsi d'acqua, costruzioni, etc.).

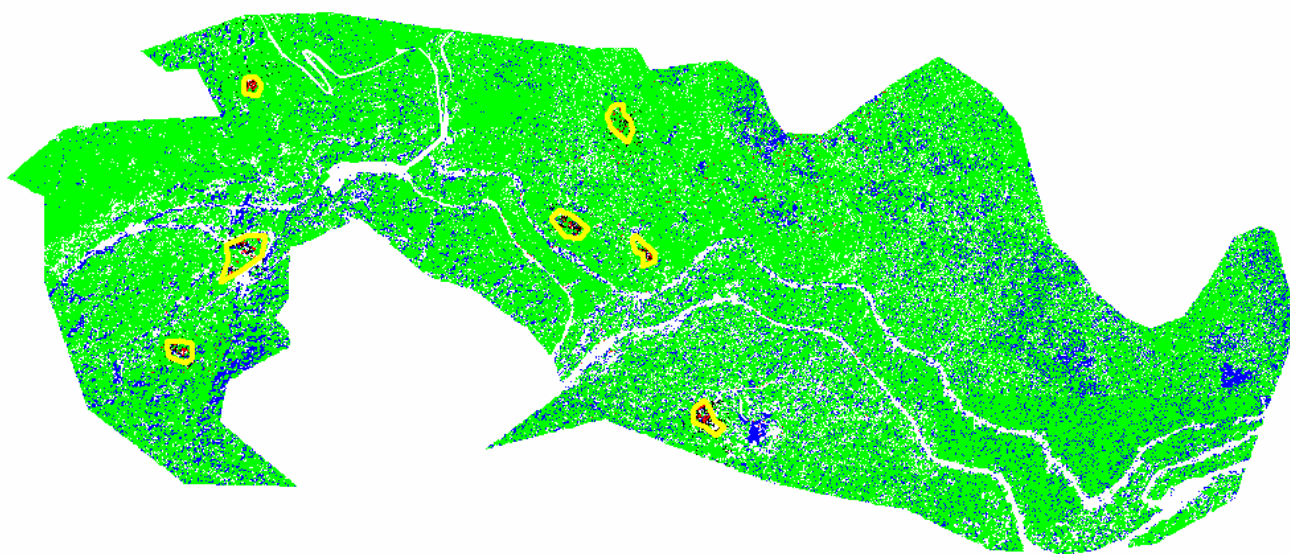


Figura 22: delimitazione di probabili focolai del mal dell'inchiostro (in giallo) dell'area castanicola di Crognaleto (TE) classificata con l'algoritmo a massima verosimiglianza. In verde le piante di castagno asintomatiche, in rosso le sintomatiche, in nero le morte, in azzurro le zone di radura, in bianco tutto ciò che non rientra nelle classi tematiche d'interesse (ombra delle piante, strade, corsi d'acqua, costruzioni, etc.).

Da un'analisi visiva delle immagini a falsi colori, si è potuto constatare che le piante malate appaiono con aspetto sfumato (Figura 23).

La metodologia illustrata per l'area castanicola del comune di Crognaleto, è stata applicata a tutte le superfici castanicole per tutti i comuni interessati dal sorvolo. In totale sono state individuate 98 aree sospette.

3.2.1.2 Stima dell'accuratezza

Per ogni unità di campionamento è stato accertato e registrato lo stato fitosanitario: assenza\presenza del mal dell'inchiostro. Inoltre sono state registrate come deperienti unità di campionamento all'interno delle quali piante che, pur non presentando i sintomi del mal dell'inchiostro, mostravano rarefazione della chioma (Figura 23).

In base a quanto emerso dai rilievi si è quindi deciso di costruire 2 matrici di confusione, la prima avente come classi analizzate la presenza e l'assenza dei sintomi del mal dell'inchiostro (tabella 5); la seconda avente come classi la presenza e l'assenza di segni di deperimento, tra i quali è, ovviamente incluso il mal dell'inchiostro (tabella 6). L'indice di accuratezza totale, l'indice di accuratezza dell'utente, l'indice di

accuratezza del produttore e il coefficiente k sono riportati nelle tabelle Matrice MI e Matrice D.

In base ai rilievi effettuati è stato possibile appurare la presenza di una sintomatologia tipica causata da *Phytophthora* spp. in 34 delle 98 aree individuate come sospette. Le altre 64 aree presentavano segni di deperimento non legati al mal dell'inchiostro del castagno.

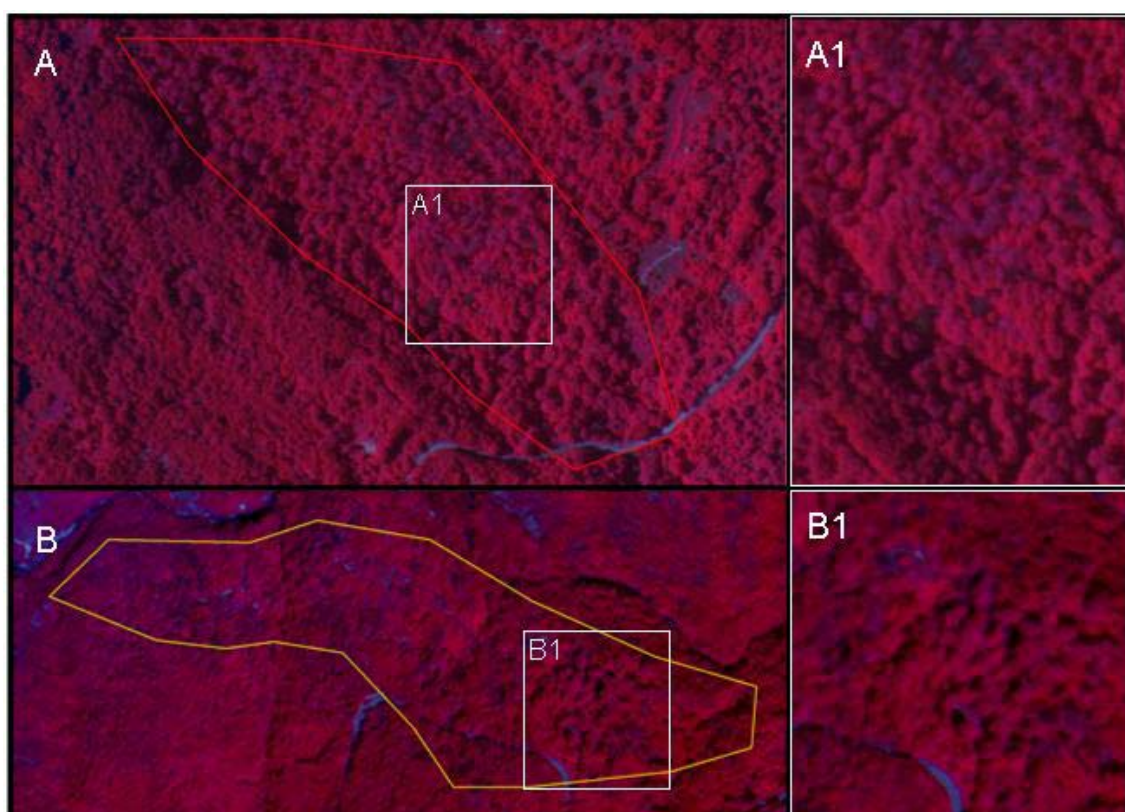


Figura 23: immagine aerea in falsi colori dove è evidente l'aspetto sfumato che caratterizza le piante malate. L'area delimitata dal poligono rosso individua un focolaio causato dal mal dell'inchiostro (A) mentre quella delimitata dal poligono giallo mostra un focolaio da cancro corticale (B). L'ingrandimento di due particolari sulla destra (A1 e B1) sottolinea come le due sintomatologie mostrino un simile aspetto sfumato

Tabella 5: matrice di confusione per la presenza/assenza dei sintomi del mal dell'inchiostro del castagno

		Verità a terra		Totale righe	Accuratezza dell'utente (%)
		sintomatiche	asintomatiche		
classificazione	sintomatiche	568	4	572	98.30
	asintomatiche	314	446	760	58.68
Totale colonne		882	450	/	/
Accuratezza del produttore		64.40	99.11	/	
Indice di accuratezza totale = 76.13%					
Coefficiente k = 0.54					

Tabella 6: matrice di confusione per la presenza/assenza dei sintomi per il deperimento dei castagneti esaminati

		Verità a terra		Totale righe	Accuratezza dell'utente
		deperienti	non deperienti		
classificazione	deperienti	845	4	849	99.53
	non deperienti	37	446	483	92.34
Totale colonne		882	450	/	/
Accuratezza del produttore		95.80	99.11	/	
Indice di accuratezza totale = 96.92%					
Coefficiente k = 0.93					

3.2.1.3 Produzione delle mappe dei focolai

Sono stati elaborati un quadro d'insieme (Figura 24), per dare una visione geografica complessiva della distribuzione della malattia, e 6 mappe tematiche (Figure 25-30) che individuano i focolai del mal dell'inchostro. In alto a sinistra di ciascuna mappa è riportato un numero che ne permette l'inquadramento geografico nel quadro d'insieme.

3.2.1.4 Quantificazione dei focolai

Oltre a quantificare gli ettari interessati dal mal dell'inchostro si è proceduto anche a determinare gli ettari interessati dal solo deperimento, per le superfici ricadenti nei parchi e nelle aree limitrofe (tabella 7).

Tabella 7: superficie, espressa in ettari ed in percentuale, delle aree a castagno, delle aree interessate dal mal dell'inchostro e delle aree deperienti, distribuita nel territorio dei Parchi Nazionali del Gran Sasso - Monti della Laga e dei Monti Sibillini ed in alcune aree limitrofe ad essi.

TERRITORIO	SUP. CAST. (ha)	SUP. CAST. (% riferita alla superficie totale)	SUP. MAL. (ha)	SUP. MAL. (%) riferita al territorio)	SUP. DEP. (ha)	SUP. DEP. (% riferita al territorio)
Parco Naz. del Gran Sasso e M.ti della Laga	2107,96	40,42	42,87	2,03	28,04	1,33
Parco Naz. dei M.ti Sibillini	731,75	14,03	/	/	6,43	0,88
Aree castanicole fuori dai Parchi Nazionali	2374,99	45,54	19,46	0,82	28,24	1,19
TOTALE	5214,69	100,00	62,33	1,19	62,71	1,20

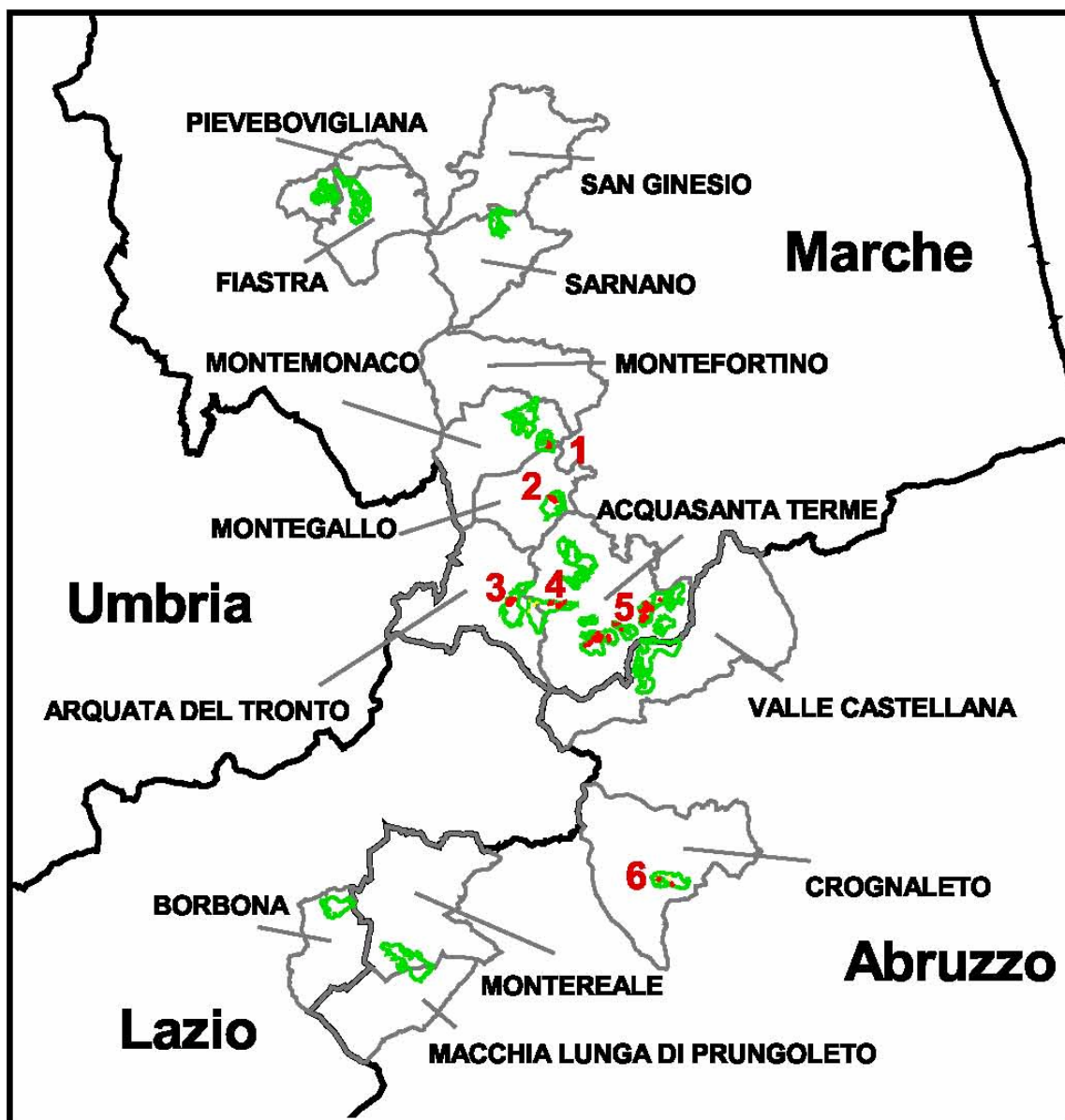


Figura 24: inquadramento geografico della distribuzione del mal dell'inchiostro nelle aree investigate. In nero i confini regionali, in grigio i confini comunali, in verde le aree castanicole ed in rosso i focolai del mal dell'inchiostro. I numeri, riportati anche sulle mappe nelle 6 Figure seguenti, permettono di localizzare i focolai del mal dell'inchiostro

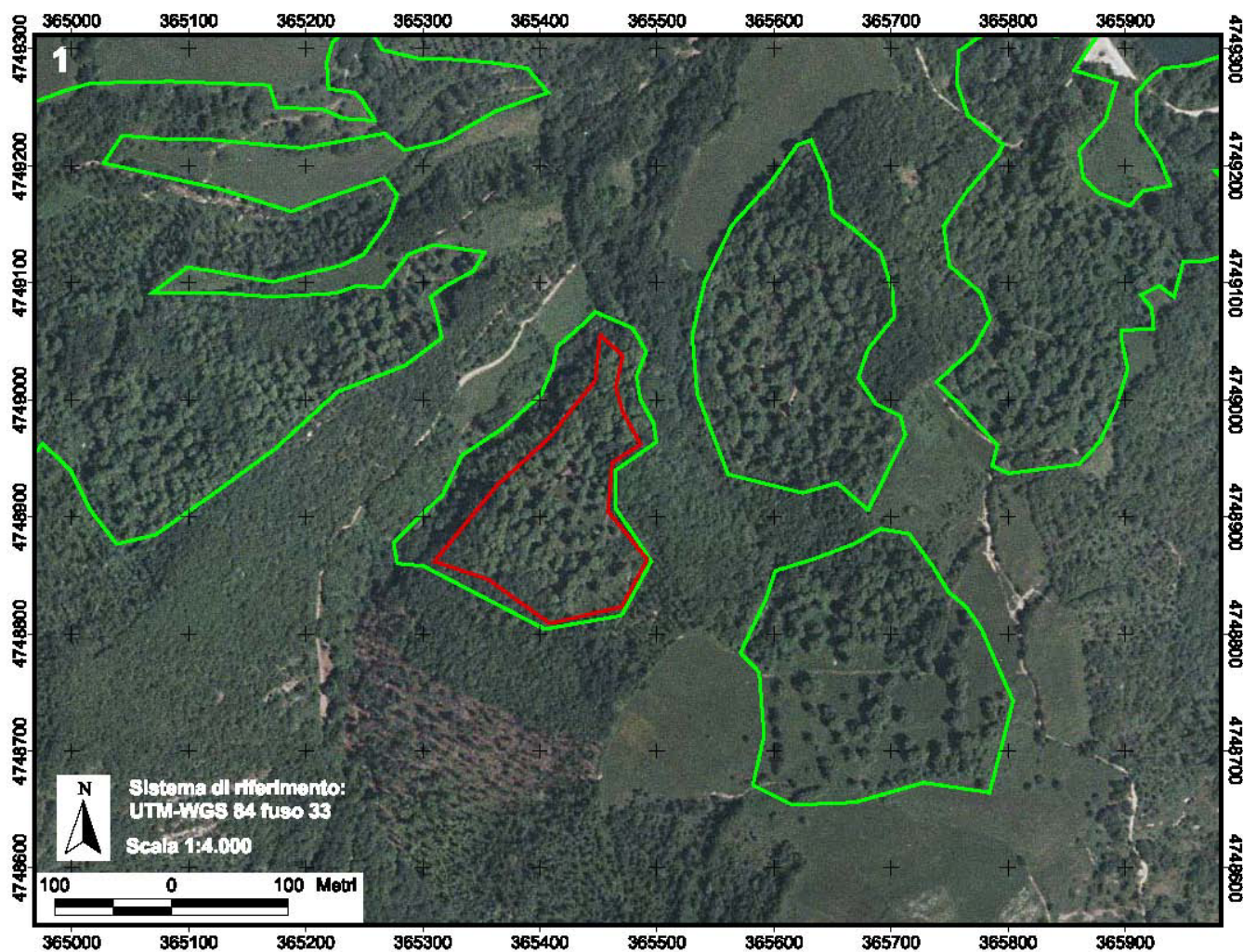


Figura 25: mappa tematica che individua il focolaio del mal dell'inchiostro (in rosso) nel Comune di Montemonaco (AP). In verde le aree castanicole. Il numero in alto a sinistra si rifà alla Figura 24 per un inquadramento geografico della distribuzione della malattia

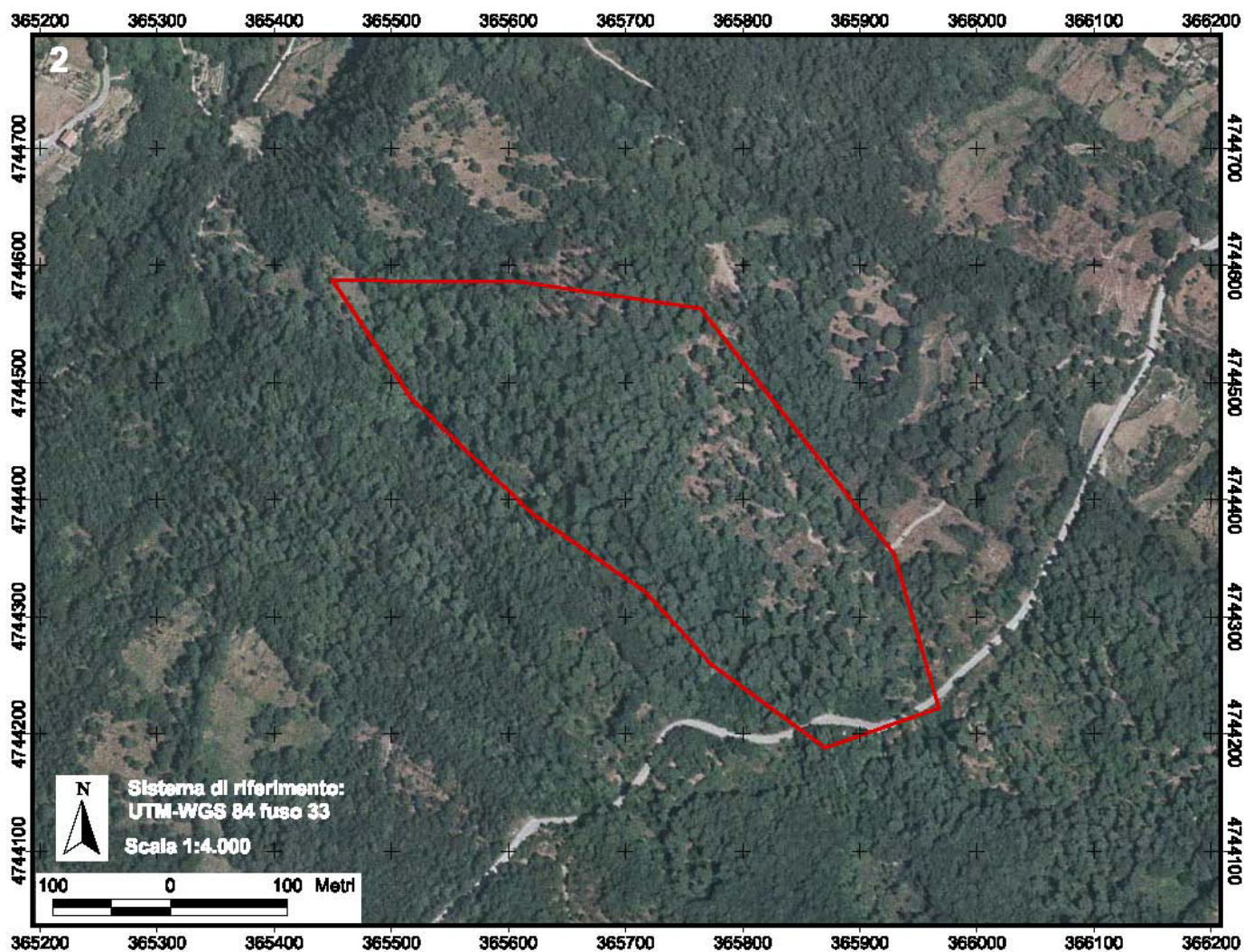


Figura 26: mappa tematica che individua il focolaio del mal dell'inchiostro (in rosso) nel Comune di Montegallo (AP). Il numero in alto a sinistra si rifà alla Figura 24 per un inquadramento geografico della distribuzione della malattia

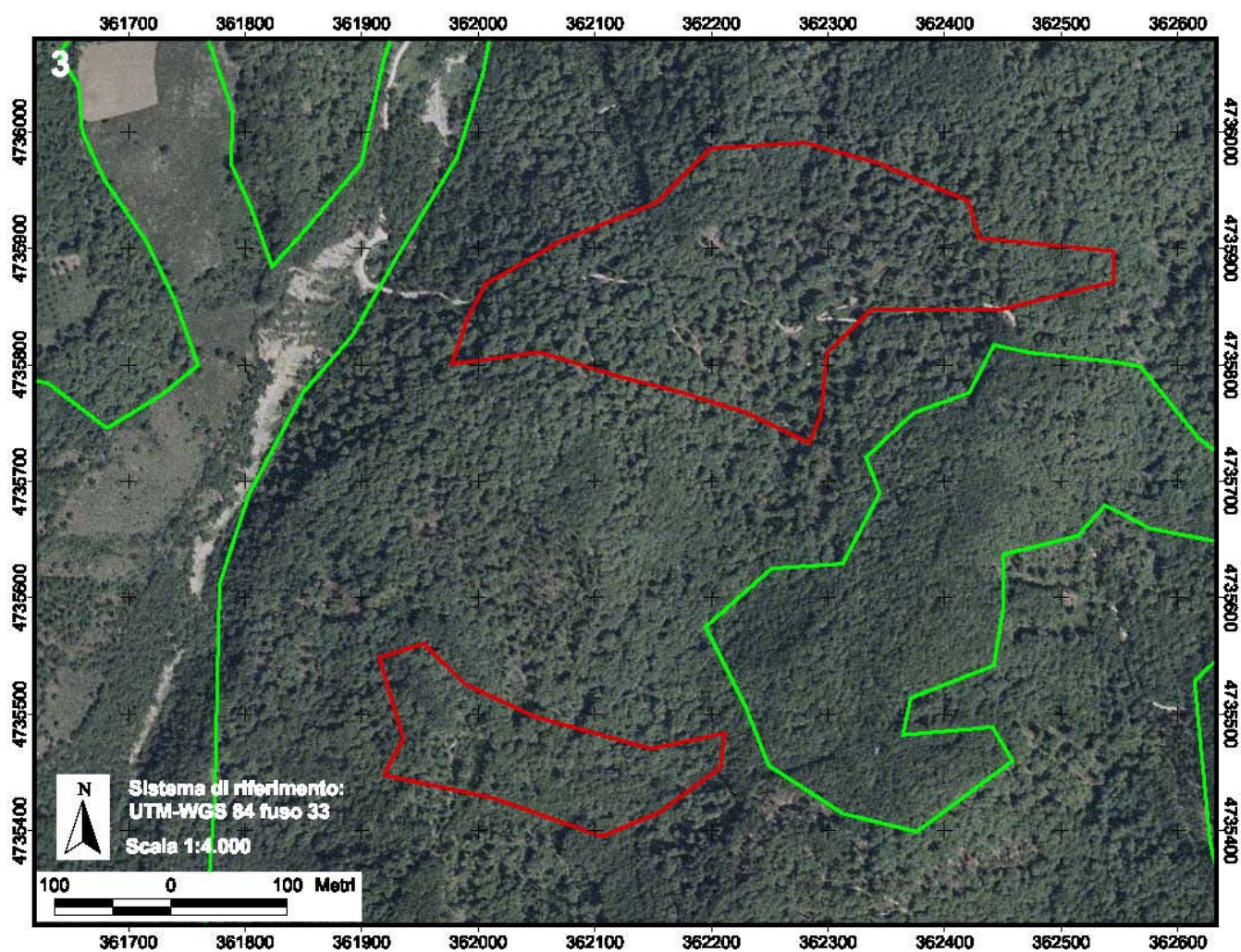


Figura 27: mappa tematica che individua i focolai del mal dell'inchostro (in rosso) nel Comune di Arquata del Tronto (AP). In verde le aree castanicole. Il numero in alto a sinistra si rifà alla Figura 24 per un inquadramento geografico della distribuzione della malattia

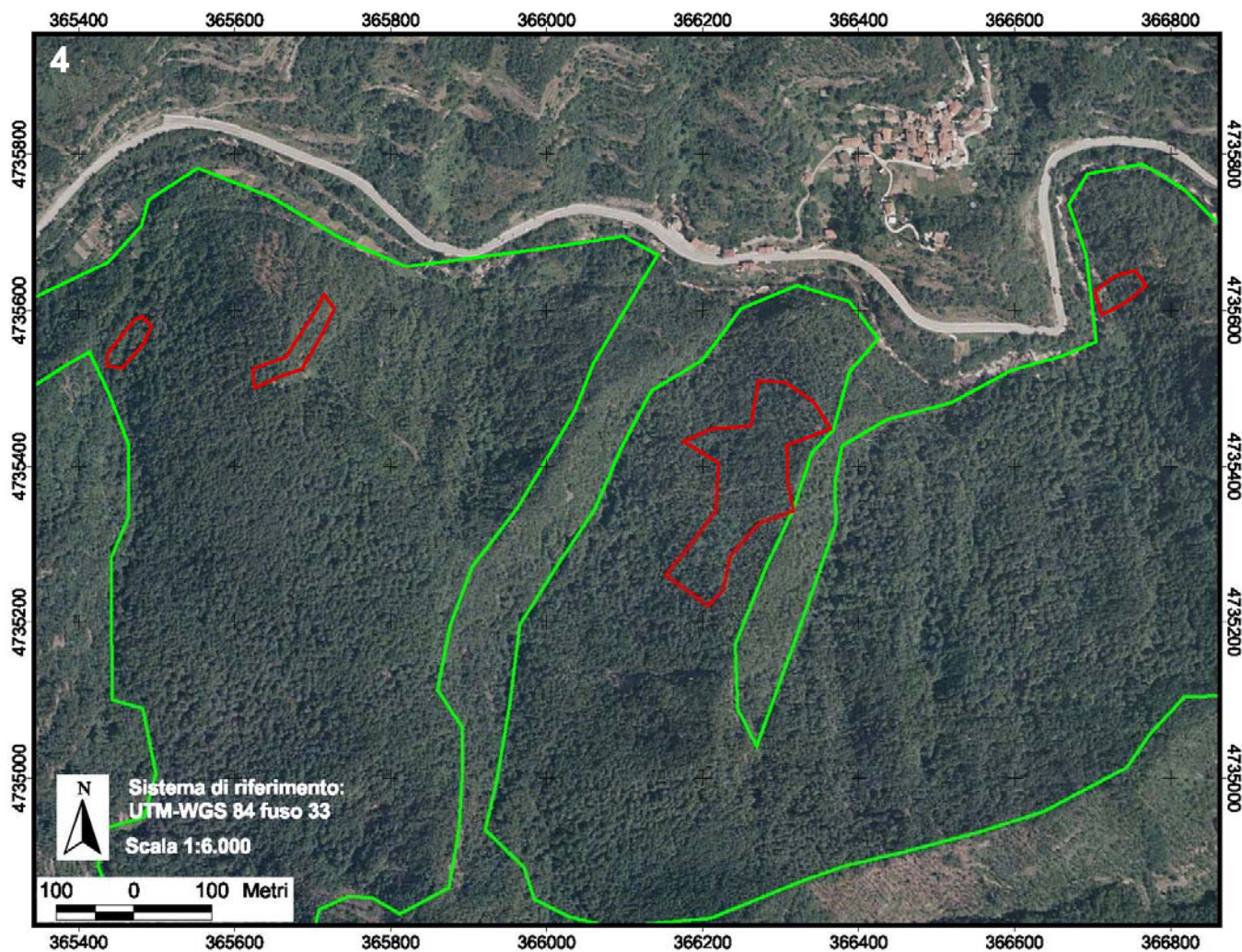


Figura 28: mappa tematica che individua i focolai del mal dell'inchiostro (in rosso) nel Comune di Acquasanta Terme (AP). In verde le aree castanicole. Il numero in alto a sinistra si rifà alla Figura 24 per un inquadramento geografico della distribuzione della malattia

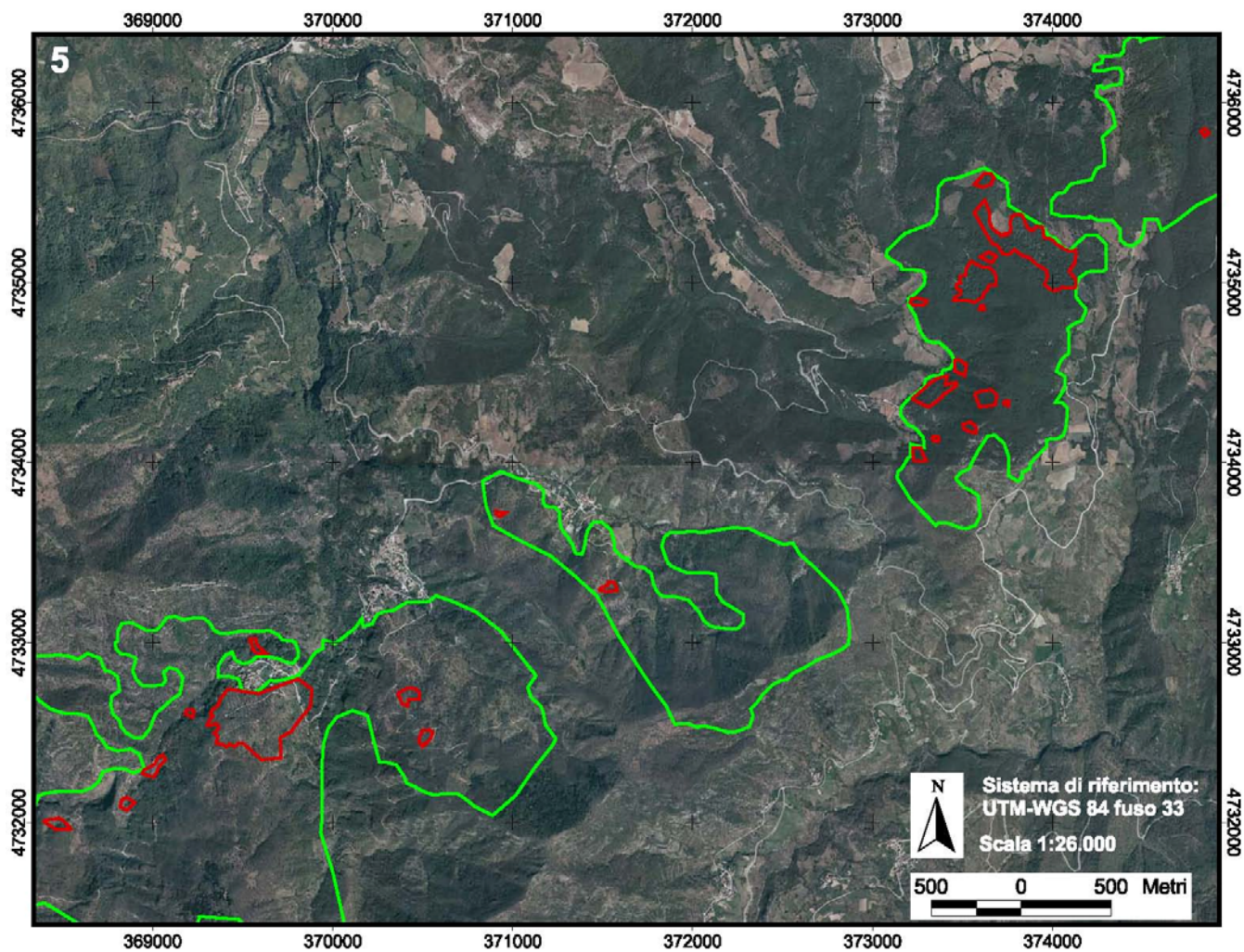


Figura 29: mappa tematica che individua i focolai del mal dell'inchiostro (in rosso) nel Comune di Acquasanta Terme (AP). In verde le aree castanicole. Il numero in alto a sinistra si rifà alla Figura 24 per un inquadramento geografico della distribuzione della malattia

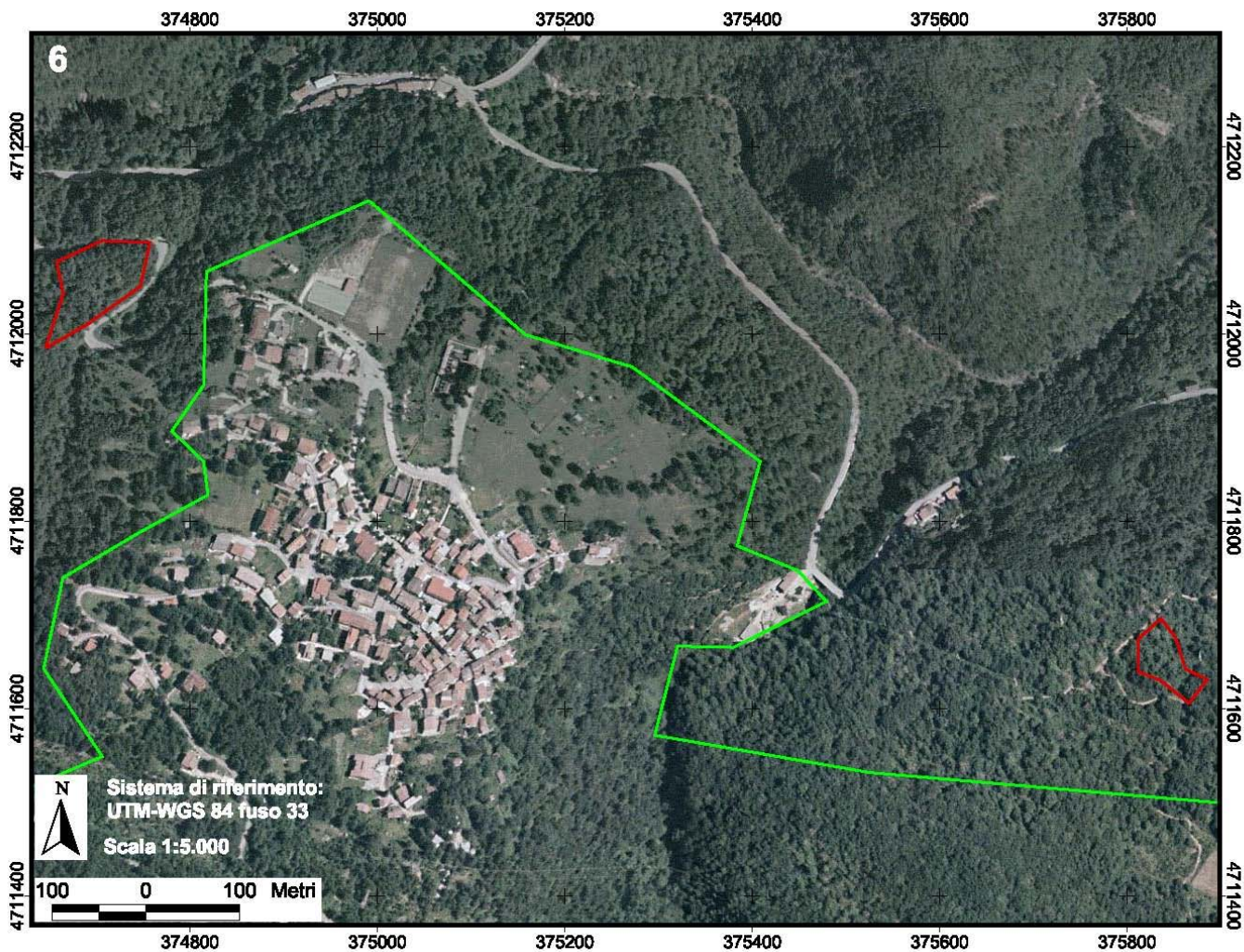


Figura 30: mappa tematica che individua i focolai del mal dell'inchiestro (in rosso) nel Comune di Crognaleto (TE). In verde le aree castanicole. Il numero in alto a sinistra si rifà alla Figura 24 per un inquadramento geografico della distribuzione della malattia

3.2.1.5 Implementazione di strati informativi nel GIS

La diffusione del mal dell'inchiostro è significativamente maggiore nei focolai attraversati da strade e compluvi. In entrambi i casi è stato rilevato che all'aumentare della densità delle strade e dei compluvi, espressa in metri lineari per ettaro, aumenta l'intensità di malattia del focolaio (per le strade: $R^2=0,69$ $P\leq 0,0001$; per i compluvi: $R^2=0,63$ $P\leq 0,0001$) (Figura 31, Figura 32).

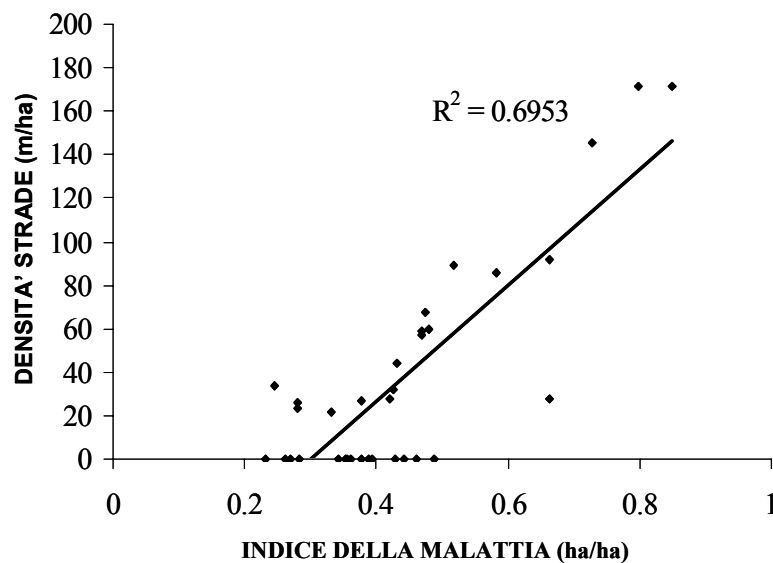


Figura 31: linea di tendenza che mostra la correlazione tra la rete viaria e l'indice di malattia.

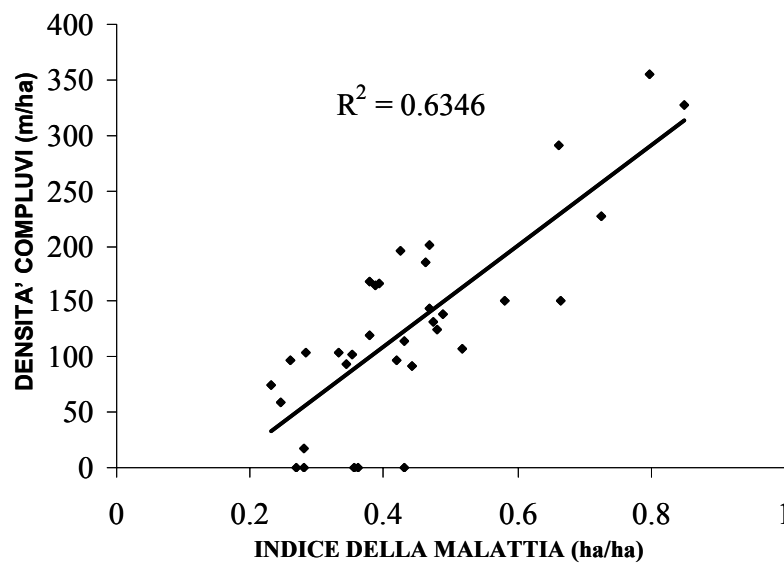


Figura 32: linea di tendenza che mostra la correlazione tra i compluvi e l'indice di malattia.

4 APPLICAZIONE 2

**STUDIO DELLA DINAMICA SPAZIO-TEMPORALE, MEDIANTE ANALISI
GEOSTATISTICA.**

4.1 MATERIALI E METODI

4.1.1 Studio della dinamica spazio-temporale tramite la geostatistica

In questo lavoro, lo studio e l'interpretazione spaziale dell'impatto del mal dell'inchiostro, è stato condotto combinando l'analisi di distribuzione classica e il gradiente di malattia con i sistemi GIS e l'uso della geostatistica. I rilievi sono stati eseguiti nel 2002 e nel 2003 in un'area castanicola nel comprensorio dei Monti Cimini (Viterbo).

4.1.2 Descrizione dell'area studiata

L'area oggetto di studio è ubicata al quarto chilometro della strada comunale Faggeta in località Basso della Sega, nel comune di Soriano nel Cimino, ad un'altitudine compresa tra gli 870 e gli 890 m s.l.m. E' caratterizzata da un'esposizione prevalente Nord-Nord/Ovest ed è da una debole pendenza che varia tra il 9 e l'11%.

Il soprassuolo è costituito da un ceduo matricinato di castagno con occasionale presenza di faggio (*Fagus sylvatica* L.), rovere (*Quercus petraea* L.), cerro (*Quercus cerris* L.), acero (*Acer* spp.), carpino bianco (*Carpinus betulus* L.) e carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.). La densità del popolamento varia da 550 a 750 ceppaie/ha con 2-7 polloni per ceppaia di età, al momento del rilievo, di circa 16-17 anni. Il numero delle matricine ad ettaro variava tra 30 e 70.

In seguito all'estesa riduzione della copertura, a causa dell'espansione del mal dell'inchiostro, si è affermato un sottobosco abbondante e vigoroso. Esso è costituito in prevalenza da rovi (*Rubus* spp.), rosa canina (*Rosa canina* L.), nocciolo (*Corylus avellana* L.) e ginestra dei carbonai (*Cytisus scoparius* L.), che rendono difficoltosa la percorribilità del terreno e compromettono la vitalità dei polloni di castagno.

In questa area, la presenza di *P. cambivora* è stata precedentemente verificata (Vettriano *et al.*, 2001).

4.1.3 Valutazione dei parametri di malattia

L'area oggetto di studio è stata perimetrata tramite GPS e sono state individuate le linee di compluvio. I punti sono stati sottoposti a correzione differenziale tramite la

stazione fissa di Perugia e restituiti su ortofoto AGEA (ex AIMA) (scala 1:10.000 – Italia 2000) tramite il programma Arcview ver. 3.2. Al fine di studiare la distribuzione della malattia e la sua diffusione nel tempo e nello spazio, la zona interessata, tramite l'estensione Edit Tools 3.6 per ArcView 3.2, è stata suddivisa in un reticolo 10 x 10 m per un totale di 168 celle (Figura 33).

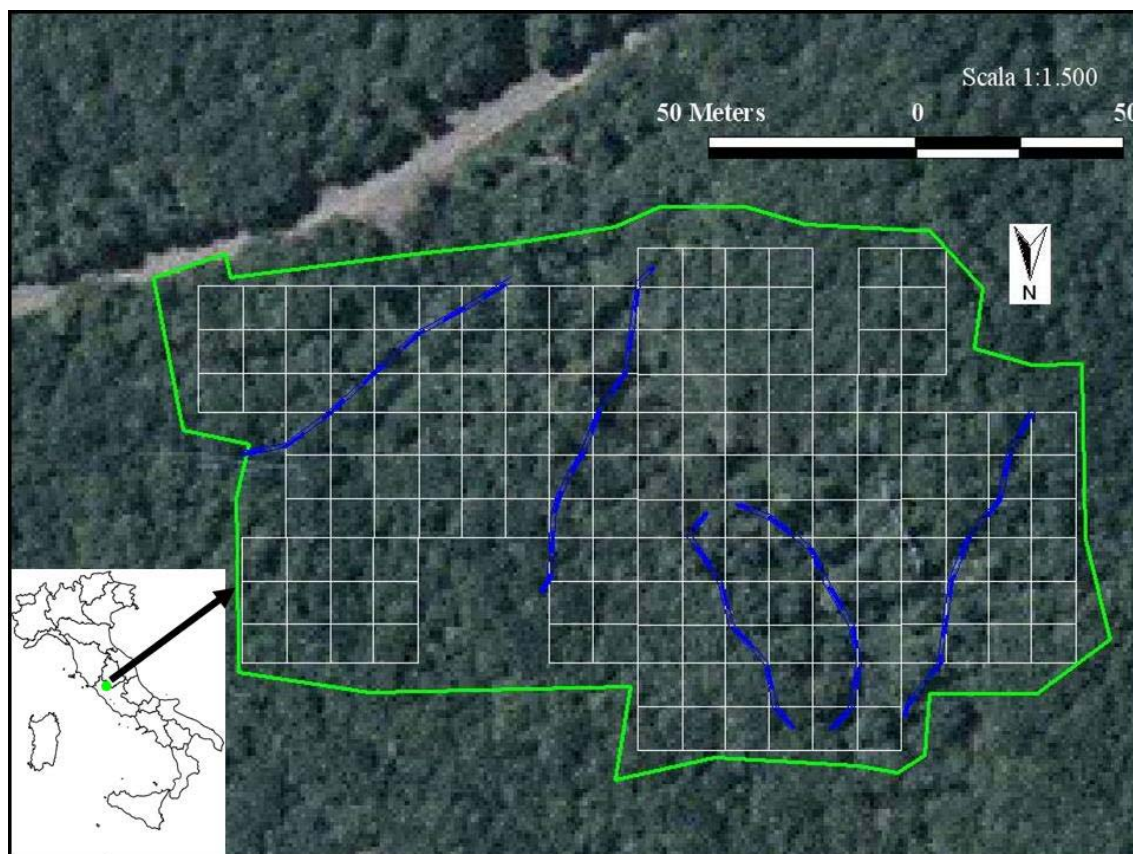


Figura 33: perimetrazione, in verde, dell'area oggetto di studio. In azzurro le linee di compluvio. In bianco le celle (10 x 10 m) all'interno delle quali sono stati valutati i parametri di malattia

La valutazione visiva del grado di malattia è stata eseguita in luglio prendendo in considerazione il grado di defogliazione e la riduzione della dimensione delle foglie (Vannini e Vettrano, 2004). I parametri di malattia sono stati calcolati in accordo con Groth *et al.* (1999) e Cardoso *et al.* (2004). L'incidenza della malattia (I) è definita da:

$$I = n/N$$

dove n è il numero di piante malate e N il numero totale delle piante all'interno della cella stessa.

La severità (S) è espressa dall'equazione:

$$S = \sum(x_i n_i) / n$$

dove x_i rappresenta la classe di defogliazione, n_i è il numero di piante malate nella classe x_i e n è il numero totale di piante malate. Il grado di defogliazione è stato stimato una scala visiva a 10 classi (classe 1: 1-10%, classe 2: 11-20%, classe 3: 21-30%, classe 4: 31-40%, classe 5: 41-50%, classe 6: 51-60%, classe 7: 61-70%, classe 8: 71-80%, classe 9: 81-90%, classe 10: 91-100%).

L'indice di malattia (IMA) è stato stimato come il prodotto tra l'incidenza e la severità in accordo con la formula si seguito riportata (Groth *et al.*, 1999):

$$IMA = \sum(x_i n_i) / N$$

La mortalità è stata calcolata secondo la seguente formula:

$$\text{mortalità} = d / N$$

dove d è il numero di ceppaie morte ed N il numero di piante valutate.

4.1.4 Analisi di distribuzione e gradiente di malattia

Il rapporto tra la varianza e la media (VM) è stato usato per stimare il modello di distribuzione dei dati: regolare, random o cluster (Campbell e Madden, 1990). Questo indice di dispersione è stato ottenuto dividendo la varianza dei dati campione (s^2) per la media dei dati campione ($\bar{x}$):

$$VM = s^2 / \bar{x}$$

per $VM < 1$ si ha un modello spaziale regolare;

per $VM = 1$ si ha un modello spaziale a random:

per $VM > 1$ si ha un modello spaziale aggregato.

In generale, il valore VM aumenta all'aumentare dell'aggregazione dei dati.

Il gradiente di malattia, dalla potenziale sorgente d'inoculo, è stato studiato ricorrendo al modello di dispersione di Kiyosawa e Shiyomi (1972):

$$Y = A^{-BX}$$

dove si assume che Y decresce, in modo esponenziale, con la distanza dall'origine. A rappresenta il valore di Y all'origine e B il tasso di decremento in Y con la distanza, che è la pendenza del gradiente.

4.1.5 Analisi spaziale ed elaborazione degli strati informativi tramite la geostatistica

Per studiare l'andamento della malattia, nel tempo e nello spazio, i dati dei parametri di malattia (incidenza, severità, indice di malattia e mortalità) applicati nei centroidi delle maglie del reticolo, sono stati elaborati tramite il modulo Geostatistical analysis del software ArcGis 9.2.

Il primo step è stato l'analisi esplorativa dei dati territoriali (ESDA tools - exploratory spatial data analysis) per meglio comprendere le proprietà statistiche del database. L'ESDA tools permette di esaminare la distribuzione dei dati, la presenza di outliers e del global trends.

Nel secondo step è stata studiata l'autocorrelazione spaziale dei vari parametri di malattia calcolati usando l'Ordinary Kriging (OK) o l'Indicator Kriging (IK). L'equazione dell'OK è descritta dalla seguente formula:

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s)$$

dove s rappresenta la posizione, Z(s) il valore del parametro studiato in quel punto (es: indice di malattia), μ una costante e $\varepsilon(s)$ un errore casuale con dipendenza

spaziale che viene assunto stazionario, in quanto si suppone non soggetto ad una significativa variazione all'interno di una certa area (Johnston *et al.*, 2001).

L'equazione dell'IK è espressa come:

$$I(s) = m + e(s)$$

dove m è una costante non nota e $I(s)$ è una variabile binaria (Isaaks e Srivastava, 1989; Johnston *et al.*, 2001). La creazione di dati binari viene eseguita attraverso l'individuazione di un valore di soglia per i dati continui, o alternativamente, assegnando zero o uno ai dati osservati in campo. Il ricorso all'IK è indicato quando i dati non sono normalmente distribuiti.

L'OK è stato utilizzato per studiare i parametri di severità e l'indice di malattia, mentre l'IK è stato impiegato per l'incidenza e la mortalità.

L'analisi del variogramma è stata condotta utilizzando il software GS+ 7.0 (Gamma Design Software, LLC, Plainwell, MI, USA). Il variogramma è il mezzo attraverso il quale viene esaminata l'autocorrelazione spaziale, si tratta di un funzione che caratterizza le variazioni spaziali dell'insieme di dati in funzione della distanza e della direzione.

La stima del variogramma viene eseguita sulla base dei dati provenienti dal campionamento del fenomeno studiato. Nel nostro caso, disegno sperimentale a maglia regolare con passo pari a r , il variogramma è dato dalla media aritmetica degli incrementi quadrati misurati a distanza h . Definito r il lato della maglia e X_i, X_{i+r} la posizione di due punti distanti r e allineati secondo la direzione X , il variogramma alla distanza r nella direzione X è dato da:

$$\gamma(r) = \sum_{i=1}^{N_r} [z(x_{i+r}) - z(x_i)]^2$$

Dove N_r è il numero di coppie di punti aventi tra di loro distanza r e allineati secondo la direzione X . Analogamente è possibile calcolare, secondo la stessa direzione X il variogramma sperimentale per $h = 2r, h = 3r$ e così via. Tale analisi è ripetibile per

la direzione Y e per la direzione a 45° , i valori di h sono pari a $r\sqrt{2}$, $2r\sqrt{2}$, $3r\sqrt{2}$ (Figura 34). Il semivariogramma è la metà del variogramma (Johnston *et al.*, 2001).

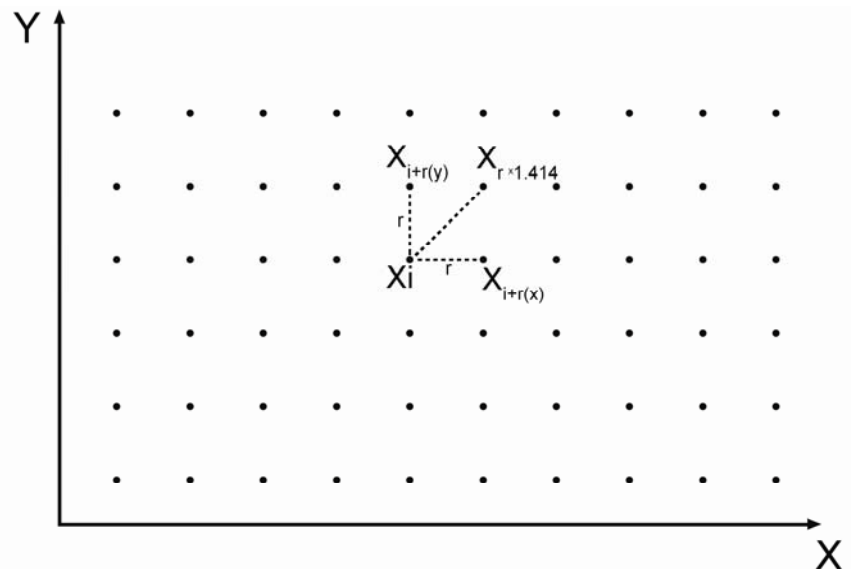


Figura 34: nel disegno sperimentale con campionamento a maglia regolare, il variogramma è dato dalla media aritmetica degli incrementi quadrati misurati a distanza r (lato della maglia) delle coppie presenti sulla direzione x , y e a 45° .

Tramite il variogramma è quindi possibile evidenziare, sia in maniera qualitativa che quantitativa, il grado di dipendenza spaziale, vale a dire l'autocorrelazione, sulla base della “Legge di Tobler” secondo la quale, “tutti gli oggetti sono relazionati tra loro, ma quelli più vicini sono più rapportati rispetto agli oggetti più distanti”. Utilizzando nozioni statistiche è quindi possibile valutare l'autocorrelazione spaziale dei dati, allo scopo di verificare se osservazioni effettuate tra punti vicini presentano una variabilità minore rispetto ad osservazioni effettuate tra punti distanti, e da qui ottenere regole per un modello di riferimento, così da risolvere problematiche specifiche su fenomeni naturali che si manifestano sul territorio (Fiorentino, 1995).

Il variogramma dipende da un'accurata analisi delle distanze fra i punti. Si assume la stazionarietà, così che l'autocorrelazione possa essere stimata e quantificata. Questa analisi, in Geostatistica, è chiamata modellazione spaziale, analisi strutturale o variografia, il cui obiettivo è quello di esplorare e quantificare le dipendenze spaziali, o

autocorrelazioni, che quantificano l'assunzione che oggetti più vicini sono più simili di oggetti più distanti tra loro (Fiorentino, 1995) (Figura 35).

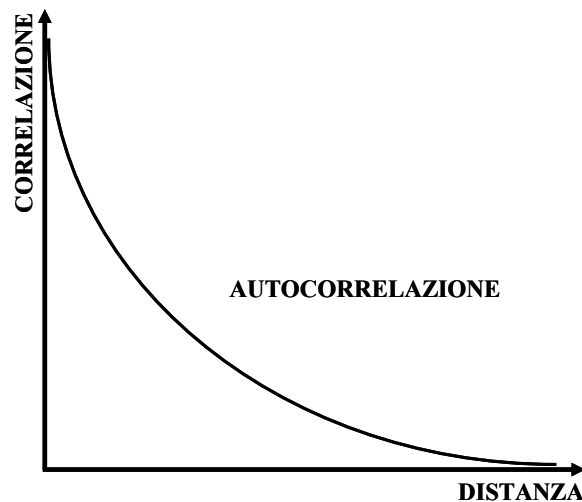


Figura 35: rappresentazione dell'autocorrelazione in funzione della distanza. Due variabili campionate sono tanto più correlate quanto minore è la distanza che le separa.

Per costruire un variogramma, esprimibile graficamente, le coppie di posizioni vengono raggruppate in base alla loro distanza. Questo raggruppamento segue due operazioni; la prima è la formazione di coppie di posizione e la seconda il raggruppamento nel caso di distanze simili, questo processo continua per ogni possibile coppia (Fiorentino, 1995).

L'andamento della curva del variogramma gode delle seguenti proprietà matematiche:

- è una funzione che assume valori sempre positivi ($\gamma(h) \geq 0$)
- per $h=0$ si ha sempre $\gamma(0)=0$
- il variogramma è una funzione pari [$\gamma(h) = \gamma(-h)$]

In termini pratici quanto detto sopra sta ad indicare che il variogramma presenta una discontinuità nell'origine tale che $\gamma(h)$ non tende a zero quando h tende a zero, pur dovendo essere sempre per definizione $\gamma(0) = 0$. Inoltre, l'andamento della curva risulta essere non continuo nel primo tratto, così che la variabilità tra due valori $z(x)$ e $z(x+h)$ presi in due punti molto vicini può essere piuttosto elevata e questo quanto più è elevata la discontinuità all'origine. Infine all'aumentare della distanza h , la variabilità può

diventare più continua e questo si riflette nella continuità di $\gamma(h)$ per $h>0$. Questa discontinuità del variogramma nell'origine viene chiamata nugget effect (effetto pepita). La presenza del nugget effect può essere attribuita ad errori di misurazione e/o alla presenza di fonti di variazione spaziale a distanze minori rispetto alla distanza di campionamento. Al crescere di h , il variogramma aumenta di valore fino a un punto di soglia. Tale valore (riportato sull'asse delle Y) e la distanza (riportata sull'asse delle X) alla quale esso è raggiunto vengono chiamati rispettivamente Sill e Range. Il valore del Sill sottratto a quello del nugget è definito come Partial Sill. Il Range descrive la distanza alla quale è presente l'autocorrelazione tra le coppie di punti investigati, distanza oltre la quale i valori ottenuti non risultano statisticamente correlati (Figura 36).

Quando il rapporto tra il nugget e il sill tende a zero esiste una autocorrelazione spaziale e quindi una larga porzione dei campioni analizzati è spazialmente dipendente. Con un rapporto tendente a uno la dipendenza spaziale è bassa e i campioni non sono spazialmente correlati (Woldewahid *et al.*, 2004).

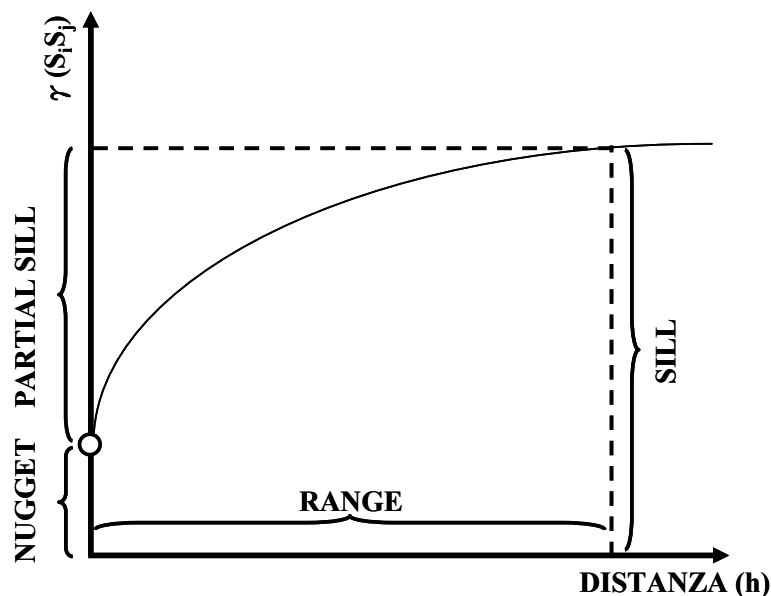


Figura 36: la curva del variogramma quantifica, graficamente, l'autocorrelazione, in funzione della distanza e della direzione. Il variogramma generalmente aumenta con la distanza e l'andamento della curva viene descritto dai parametri del nugget, sill e range.

E' possibile scegliere la funzione semivariogramma tra più modelli: Circular, Spherical, Tetraspherical, Pentaspherical, Exponential, Gaussian, Rational Quadratic, Hole Effect, K-Bessel, J-Bessel e Stable. La scelta del modello si basa sul fatto che il coefficiente di determinazione (R^2) sia massimo e che l'indice residual sum of squares (RSS) sia minimo (Isaaks e Srivastava, 1989).

I punti del semivariogramma possono presentare un'influenza direzionale, ossia in alcune direzioni, cose vicine, possono essere più simili che in altre direzioni. L'influenza direzionale viene indicata con il termine di anisotropia che può essere definita come la caratteristica di un processo random che mostra un'elevata autocorrelazione in una direzione piuttosto che in un'altra (Johnston *et al.*, 2001). L'anisotropia può essere determinata dalla presenza di vento, struttura geologica e così via. In geostatistical analyst è possibile determinare l'eventuale presenza di anisotropia.

Tramite la funzione Cross-validation, presente nel modulo geostatistical analyst, è stata determinata la bontà dell'OK e dell'IK. Questa procedura compara i valori misurati con quelli predetti in tutti i punti, ossia il dato viene individualmente rimosso al fine di predire il suo valore sulla base dei valori misurati per l'intero database (Johnston *et al.*, 2001). La Cross-validation calcola degli indici che permettono di valutare la bontà del modello scelto: Mean Standardized Prediction Error (MPE), Root-Mean-Squared Standardized Prediction Error (RMSSE). MPE deve essere prossimo allo zero. RMSSE deve essere prossimo ad 1, valori superiori sono determinati da una sottostima della variabilità della predizione, mentre valori inferiori ad 1 sono determinati da una sovrastima della variabilità della predizione (Johnston *et al.*, 2001).

L'ultimo step è stata la produzione delle prediction maps, per l'indice di malattia, per il 2002 e 2003.

Attraverso la digitalizzazione delle curve di livello della CTR e la loro successiva elaborazione con lo Spatial Analyst, del software ArcGis 9.2, si è creato un DEM, in formato Grid, con celle regolari di 10 m di lato.

Le prediction maps ottenute sono state importate nel modulo ArcScene del software ArcGis 9.2, dove gli è stata attribuita una quota tramite dem, per ottenere delle immagini tridimensionali. A questo strato è stato sovrapposto quello corrispondente alle linee di compluvio che attraversano l'area di studio, al fine di evidenziare come questo fattore può influenzare la distribuzione della malattia.

Infine tramite le funzioni di editing, del software ArcView 3.2 della ESRI, è stato evidenziato l'incremento di malattia dal 2002 al 2003.

4.1.6 Elaborazione statistica

La statistica descrittiva, skewness e kurtosis, il test per la normalità di Kolmogorov-Smirnov (KS), la correlazione parametrica di Pearson e la non parametrica di Spearman, l'ANOVA ed il test non parametrico di Kruskal-Wallis, l'analisi di regressione non lineare, incluso il test runs, sono stati condotti attraverso i software Graphpad Prism® 4.00 e Systat 7.0 (Spss Inc., Richmond, CA, USA).

4.2 RISULTATI

4.2.1 Analisi di distribuzione e gradiente di malattia

Complessivamente 851 individui, tra polloni e matricine, sono stati sottoposti ad analisi visiva in campo per valutarne il grado di malattia. I dati d'incidenza (I) e di mortalità sono stati analizzati con la statistica non parametrica mentre i dati di severità (S) e l'indice di malattia (IMA) sono stati esaminati con la statistica parametrica. L'incidenza media del mal dell'inchiostro è passata da 68.3% a 76.9% dal 2002 al 2003 con un incremento statisticamente significativo dell'8.6% (test non parametrico dei Mann-Whitney, $p < 0.01$). La mediana è passata da 80.0 ad 83.3 dal 2002 al 2003 indicando un alto livello di malattia attraverso l'area di studio. Questi risultati sono rafforzati dai valori di VM, inferiori ad 1, sia nel 2002 sia nel 2003 suggerendo una distribuzione regolare dell'incidenza nell'area di studio. La mortalità media nell'area era di 16.7 nel 2002 e di 18.9 nel 2003 con un incremento di 2.2 ($p > 0.05$). La mediana è passata da 8.3% a 10.8% dal 2002 al 2003. Il valore di VM superiore ad 1 indica un modello aggregato di distribuzione della mortalità. La media della severità è passata da 3.6 a 4.1 dal 2002 al 2003, il valore di VM superiore ad 1 indica un modello di distribuzione aggregato. Anche per l'indice di malattia (IMA), il valore di VM superiore ad 1 evidenzia un modello di distribuzione della malattia aggregato (Tabella 8).

Una correlazione negativa è stata trovata, sia nel 2002 sia nel 2003, tra ognuno dei quattro parametri considerati e la loro distanza lineare dai compluvi (Tabella 8) suggerendo la presenza di un gradiente di malattia. L'incidenza era debolmente correlata ai compluvi in entrambi gli anni e non sono state trovate differenze tra i valori d'incidenza entro i 10 m dai drenaggi (Kruskal-Wallis; $p > 0.05$). Effetti significativi entro i 10 m dai compluvi sono invece stati evidenziati per la severità (ANOVA, $F = 16.7$, $p \leq 0.0001$), l'indice di malattia (ANOVA, $F = 14.5$, $p \leq 0.0001$) e la mortalità (Kruskal-Wallis, $p \leq 0.0001$) (Figura 37).

Tabella 8: VM e correlazione con la distanza lineare dai compluvi per i parametri di malattia: incidenza media (I), severità (S), indice di malattia (IMA) e mortalità (n = 168). (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montagni A., Vettrano A.M. Forest Pathology. 2009).

Anno e parametri di malattia	Media $\pm$ (SE)	VM	Intervallo dei valori (percentile)			Correlazione con la distanza lineare dai compluvi	
			25%	50%	75%	γ	p
2002							
I (%)	68.3 (2.5)	0.16	50.0	80.0	100	-0.28 ¹	≤ 0.001
S	3.6	1.8	1.7	3.5	5.5	-0.57 ²	≤ 0.0001
IMA	2.9	1.9	1.0	2.4	4.2	-0.58 ²	≤ 0.0001
Mortalità (%)	16.7	25.7	0.0	8.3	25.4	-0.57 ¹	≤ 0.0001
2003							
I (%)	76.9	0.11	58.6	83.3	100	-0.15 ¹	≤ 0.05
S	4.1	1.6	2.0	4.0	6.0	-0.56 ²	≤ 0.0001
IMA	3.4	1.7	1.5	2.8	4.6	-0.57 ²	≤ 0.0001
Mortalità (%)	18.9	24.9	0.0	10.8	30.6	-0.61 ¹	≤ 0.0001
SE, errore standard							
¹ Spearman γ							
² Pearson γ							

Il gradiente di malattia dai compluvi è stato analizzato più accuratamente per i dati di severità e indice di malattia, in quanto soddisfano le condizioni di normalità e di uniformità di varianza. Il modello di Kiyosawa e Shiyomi era svincolato dai parametri A e B. In figura 38 è mostrata la curva che approssima i dati di severità e di indice di malattia per il 2003. Il coefficiente di determinazione (R^2) era di 0.34 per la severità e di 0.32 per l'indice di malattia, indicando che alcune delle variabili non possono essere spiegate con la distanza dai compluvi. L'half-life delle curve, che rappresentano la distanza dai drenaggi alla quale il valore decresce di almeno il 50%, corrisponde al 21.6 m per la severità e 18.4 m per l'indice di malattia. I tests per la regressione non lineare indicano una deviazione non significativa dal modello sia per la severità sia per l'indice di malattia ($p > 0.05$) (tabella 9).

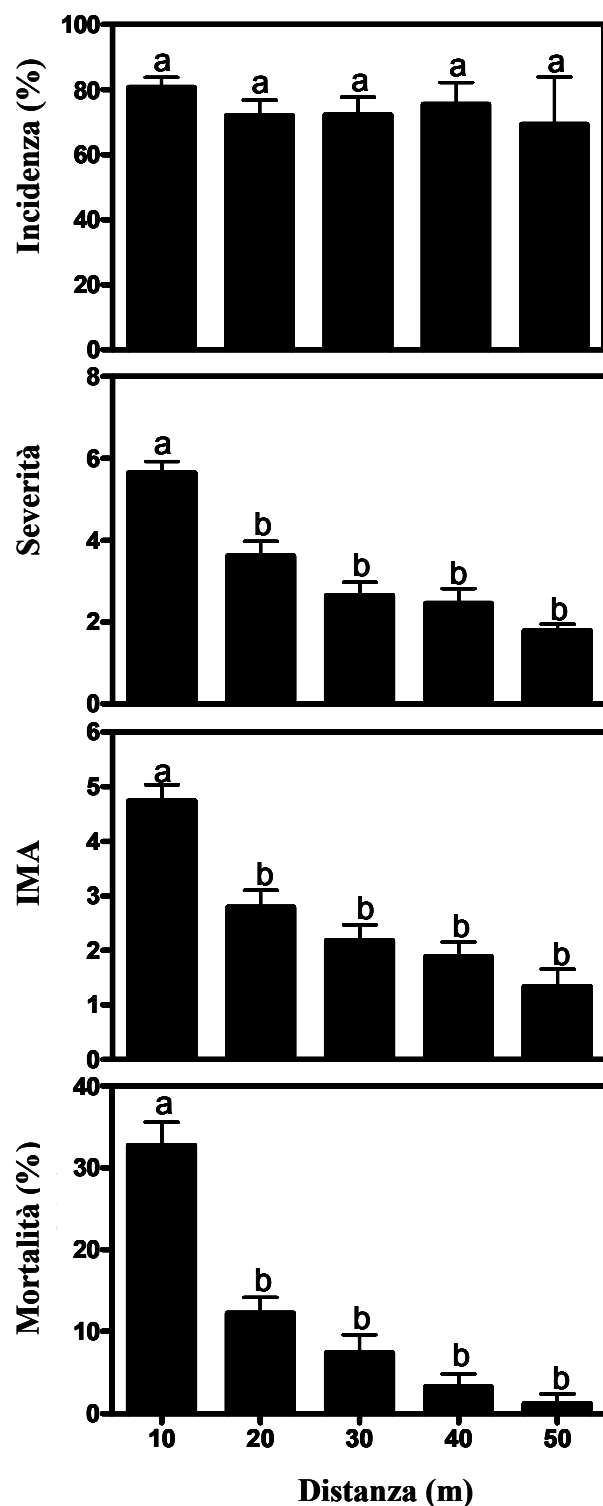


Figura 37: valori dei parametri di malattia (incidenza, severità, indice di malattia e mortalità) a classi di distanza di 10 m dai compluvi per il 2003. Lettere differenti indicano differenze significative al post-test di Tukey's, per i parametri di severità e di indice di malattia, e al post-test di Dunns (analisi non parametrica) per i parametri di incidenza e di mortalità. Le barre verticali indicano la deviazione standard. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montaghi A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

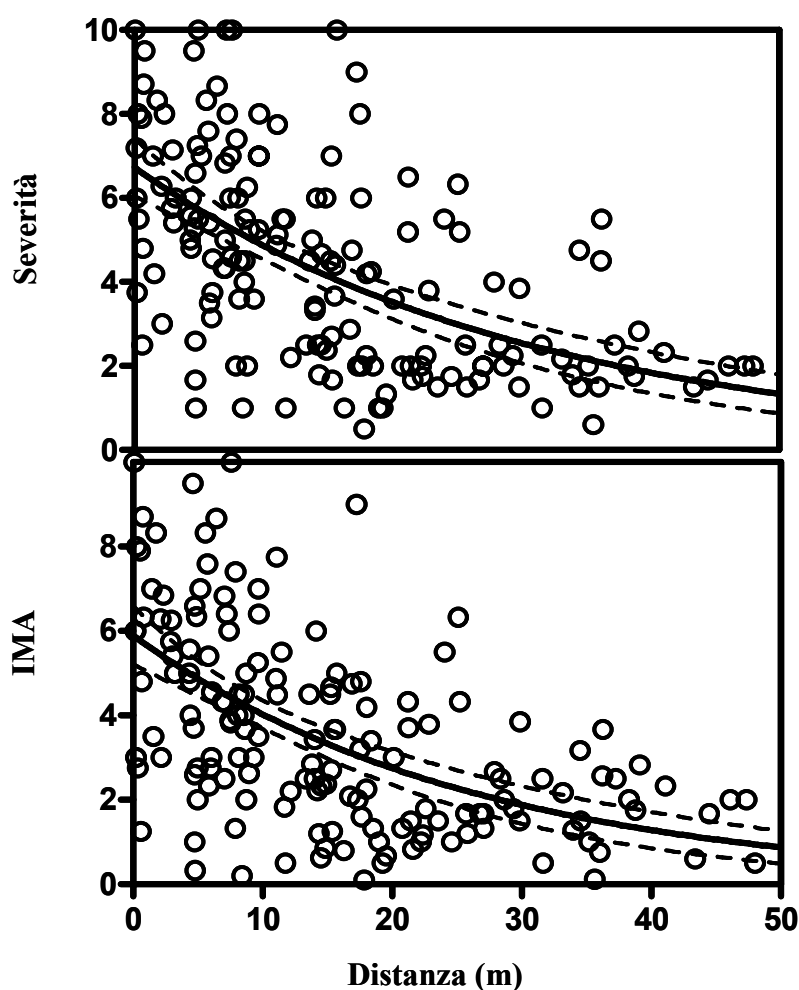


Figura 38: severità e indice di malattia e distanza, per classi di 10 m, dai compluvi per il 2003. La curva in nero rappresenta il gradiente di malattia descritto dal modello di Kiyosawa e Shiyomi. Le linee tratteggiate rappresentano l'intervallo di confidenza del 95%. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montaghi A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

Tabella 9: risultati del modello di regressione di Kiyosawa e Shiyomi per la severità (S) e per l'indice di malattia (IMA) e la distanza lineare, espressa in metri, dai compluvi per il 2003. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montaghi A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

Parametri di malattia	A $\pm$ (SE)	B $\pm$ (SE)	Half-life (m)	R ²	Deviazione dal modello	p
S	6.7 (0.3)	0.03 (0.004)	21.4	0.34	NS	>0.05
IMA	5.9 (0.3)	0.04 (0.005)	18.2	0.32	NS	>0.05

SE, errore standard; NS, non significativa

4.1.2 Analisi spaziale ed elaborazione degli strati informativi tramite la geostatistica

L'OK è stato utilizzato per i dati di Severità e l'indice di malattia. L'IK è stato impiegato per l'incidenza e la mortalità in quanto i dati non erano normalmente distribuiti. I valori di incidenza e di mortalità sono stati considerati come variabili binarie ed espressi come presenza (1) e assenza (0). E' stata individuata la presenza di un global trend. La presenza del global trend viene rappresentata da una polinomiale matematica e come tale può essere rimossa dai dati. Viene quindi eseguita l'analisi statistica e immediatamente prima di elaborare la superficie finale, il trend viene automaticamente ripristinato. In questo modo si ottiene una superficie più accurata in quanto priva dell'influenza del global trend (Johnston *et al.*, 2001).

Il semivariogramma che meglio descrive la correlazione spaziale, per i parametri di malattia studiati, è quello che adotta il modello esponenziale:

$$\gamma(h;\theta) = \theta_s[1-\exp(-3 \|h\|/\theta_r)]$$

dove h è la distanza, $\theta_s \geq 0$ è il partial sill e $\theta_r \geq 0$ è il range. Questo modello mostra un decremento esponenziale dell'autocorrelazione all'aumentare della distanza (Isaaks and Srivastava, 1989; Johnston *et al.*, 2001).

I semivariogramma, per i quattro parametri di malattia, per gli anni 2002 e 2003, sono mostrati in Figura 39.

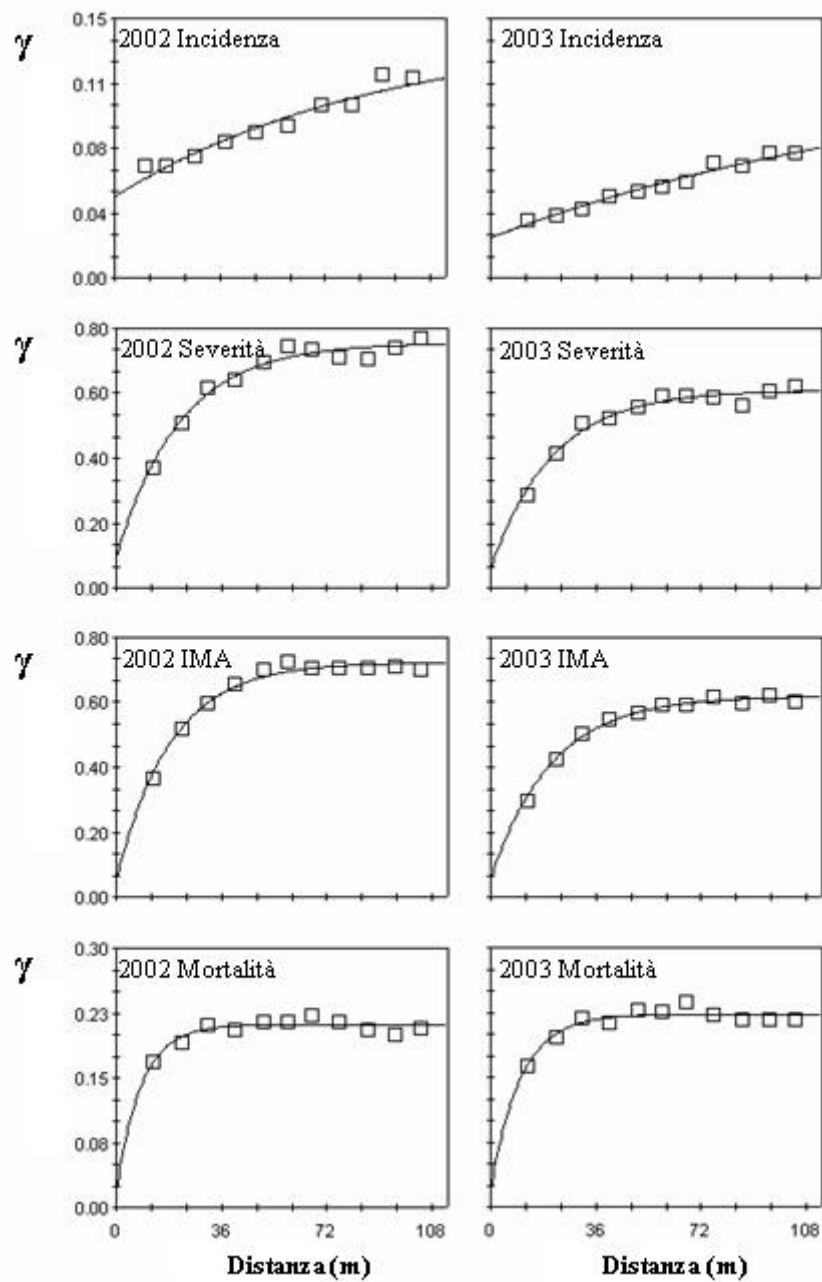


Figura 39: semivariogramma per i parametri di malattia, incidenza, severità, indice di malattia e severità, per gli anni 2002 e 2003. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montagni A., Vettrai A.M. Forest Pathology. 2009).

In tabella 10 sono riportati i parametri di interpolazione e di validazione che definiscono il semivariogramma. I valori migliori per i parametri di interpolazione e validazione sono quelli per l'indice di malattia (IMA) sia per il 2002 sia per il 2003. Anche per la severità i valori, dei parametri di interpolazione e validazione, sono soddisfacenti. Per la mortalità si ha il più basso valore del coefficiente di determinazione. Il valore del range è risultato simile sia per la severità sia per l'indice di malattia

Tabella 10: Parametri di interpolazione e validazione del semivariogramma esponenziale per gli anni 2002 e 2003, per l'incidenza, la severità, l'indice di malattia e la mortalità. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montagni A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

Anno e parametri di malattia	Kriging	Parametri del variogramma						Parametri di validazione	
		Nugget	Sill	Range	Relative nugget	RSS	R ²	MPE	RMSSE
2002									
I (%)	Indicator	0.047	0.14	273	0.32	0.0001	0.97	0.0028	1.124
S	Ordinary	0.094	0.76	65.1	0.12	0.004	0.97	0.0007	1.025
IMA	Ordinary	0.05	0.72	55.5	0.07	0.002	0.98	0.0007	0.995
Mortalità (%)	Indicator	0.016	0.21	25	0.08	0.0004	0.81	0.0022	1.037
2003									
I (%)	Indicator	0.0023	0.12	468	0.19	0.00005	0.97	0.004	2.072
S	Ordinary	0.057	0.61	63.0	0.11	0.003	0.97	0.0013	0.965
IMA	Ordinary	0.054	0.62	62.1	0.09	0.001	0.99	0.0009	0.985
Mortalità (%)	Indicator	0.0194	0.22	30	0.09	0.0005	0.87	0.0037	1.035
R ² , coefficiente di determinazione; RSS, residual sum of squares; MPE, Mean Standardized Prediction Error; RMSSE, Root-Mean-Squared Standardized Prediction Error.									

La distribuzione del mal dell'inchiostro, in funzione dell'indice di malattia, è mostrata nelle prediction maps (Figura 40 e Figura 41) dove è evidente un'alta incidenza della malattia soprattutto lungo i compluvi, in particolare, dove la pendenza decresce. Dal 2002 al 2003 si è assistito ad un incremento dell'incidenza e della diffusione del mal dell'inchiostro (Figura 42), infatti, su una superficie totale di 1.68 ha la malattia ha interessato 1.3 ha nel 2002 e 1.4 ha nel 2003 con un incremento di 0.1 ha (circa il 7%).

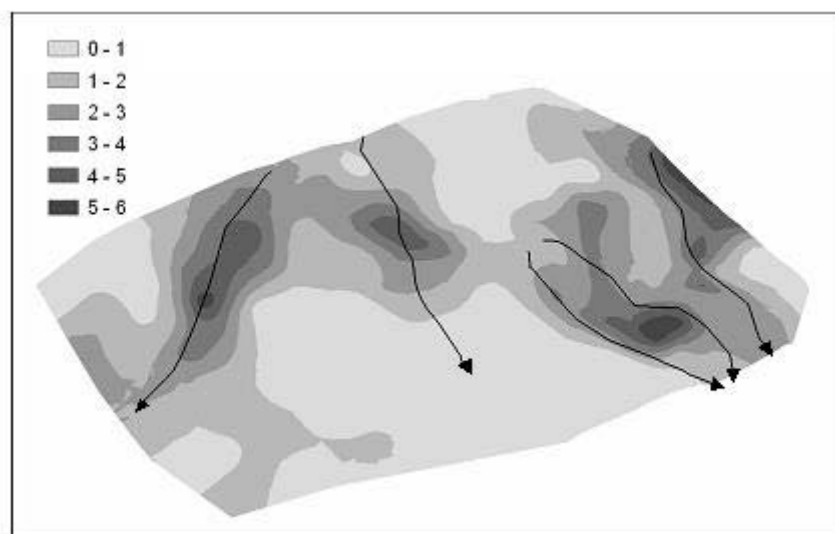


Figura 40: Prediction map, per l'indice di malattia (IMA), del mal dell'inchiostro, per l'anno 2002. Le frecce indicano la direzione delle linee di compluvio. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montaghi A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

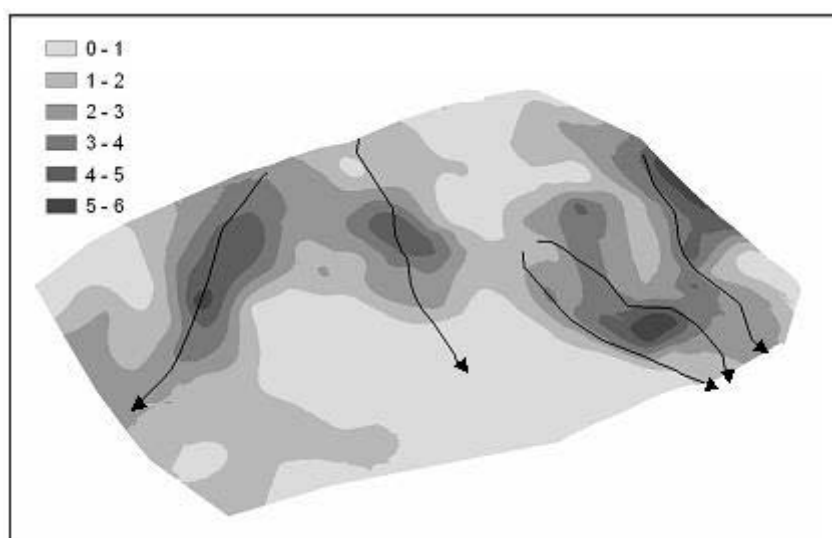


Figura 41: Prediction map, per l'indice di malattia (IMA), per il mal dell'inchiostro, per l'anno 2003. Le frecce indicano la direzione delle linee di compluvio. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montaghi A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

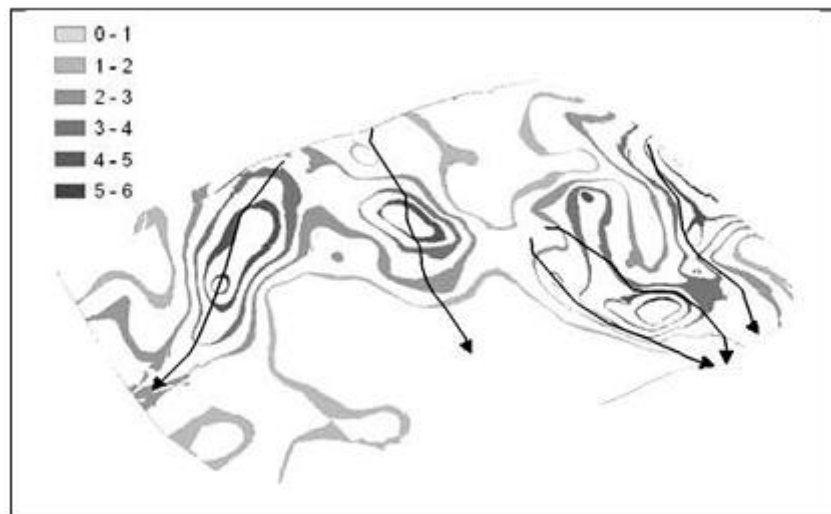


Figura 42: Incremento della diffusione, per l'indice di malattia (IMA), del mal dell'inchiostro, dal 2002 al 2003. (Fonte: Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montaghi A., Vettraino A.M. Forest Pathology. 2009).

5 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Le applicazioni condotte hanno permesso di valutare le potenzialità dei GIS in patologia forestale. In particolare si è cercato di ampliare ed approfondire le conoscenze epidemiologiche del mal dell'inchiostro del castagno.

L'impiego del telerilevamento condotto è il primo che affronta il monitoraggio del mal dell'inchiostro del castagno su grandi estensioni territoriali. Il remote sensing è già stato utilizzato in Portogallo, in impianti di castagno da frutto colpiti dal mal dell'inchiostro, da Martins *et al.* (2007) per determinare, tramite interpretazione visiva di foto aeree ad alta risoluzione, il grado di malattia di piante ricadenti all'interno di aree campione. In questa tesi di dottorato le condizioni fitosanitarie delle piante sono state valutate attraverso l'analisi delle firme spettrali delle classi tematiche d'interesse: piante asintomatiche, piante sintomatiche, piante morte e zone di radura. Dalla ricerca bibliografica condotta è emersa la scarsa separabilità delle firme spettrali per le classi piante morte e zone di radura (Kelly *et al.*, 2004), che anche nel nostro caso viene confermata, infatti, con il metodo Transformed Divergence, si è evinta una scarsa separabilità ($TD = 1690.11$) per le firme spettrali delle classi tematiche sopra menzionate. Tuttavia, un ulteriore approfondimento bibliografico ha permesso di integrare il metodo di classificazione a massima verosimiglianza con la metodologia proposta da Sun *et al.* (2005). È stato così possibile classificare vaste aree castanicole nelle classi tematiche d'interesse e discriminare le zone di radura dalle piante morte. Questa operazione è stata sicuramente favorita dal fatto le aree castanicole italiane sono prevalentemente pure. Questo stesso modello non può essere applicato per condurre studi in boschi disetanei, dove, con le immagini aeree, è possibile rilevare le sole chiome dello strato dominante, o in boschi misti dove è presente una consociazione di più essenze. Infatti, studi condotti da Kelly *et al.*, (2004) in boschi misti della California, attaccati da *P. ramorum*, hanno evidenziato la scarsa accuratezza in seguito all'impiego del metodo a massima verosimiglianza nell'individuare le piante sintomatiche.

Alcune immagini aeree presentavano zone d'ombra che non è stato possibile analizzare. Le zone d'ombra sono attribuibili al fatto che, con il telerilevamento, si

studia una rappresentazione della realtà che dipende dalla situazione fisico-ambientale della ripresa e dalla morfologia del territorio per cui, ad esempio, una tipologia di bosco a latifoglie appare in modo diverso a seconda della stagione e dell'ora di ripresa (altezza e azimut del sole) e a seconda della situazione morfologica su pendii diversi o zone diversamente illuminate. In questo caso, la stessa categoria fitogeografica o non permette di ottenere alcuna informazione o offre informazioni diverse in funzione delle diverse situazioni. Quindi, pur essendo il telerilevamento un ottimo strumento che presenta notevoli vantaggi e agevola determinati studi, presenta dei limiti legati soprattutto alla presenza di forti pendii.

Dall'analisi dei dati riportati nelle matrici di confusione emerge che 314 su 882 unità di campionamento esaminate, sono state classificate sulla mappa come sintomatiche del mal dell'inchiostro quando in realtà non presentavano detta sintomatologia. Di queste 277 erano interessate da segni di deperimento, in particolare erano presenti piante colpite dal cancro corticale. In entrambi i casi è stata rilevata una rarefazione della chioma che induce una variazione simile nella firma spettrale e che rende difficile discriminare una patologia dall'altra. Per quanto riguarda l'interpretazione della classe "asintomatiche" solo 4 unità di campionamento mostravano i sintomi del mal dell'inchiostro. Si trattava di unità in un'area dove erano ancora evidenti e segni di taglio ed esbosco, quindi la malattia potrebbe essere stata portata in un momento successivo alla ripresa delle immagini aeree.

I risultati ottenuti, dimostrano le ottime potenzialità del sistema di telerilevamento adottato nell'accertare la presenza di fenomeni di deperimento caratterizzati da piante morte e deperienti (indice di accuratezza totale = 96,92%, coefficiente $k = 0,94$ in accordo con il valore minimo per l'accuratezza totale dell'85% raccomandato da Foody (2002)). Piante morte e deperienti erano infatti presenti in tutte le 98 aree individuate come sospette. Di queste solo 34 hanno confermato una sintomatologia tipica del mal dell'inchiostro (indice di accuratezza totale = 76,17%, coefficiente $k = 0,53$), ciò, probabilmente, a causa dell'aspecificità di questa tecnica rispetto ai sintomi mostrati dalle piante. Le tecnologie attualmente a disposizione per l'acquisizione, manipolazione ed elaborazione dei dati territoriali per caratterizzare i parametri ambientali coinvolti nelle diverse malattie, possono favorire la costruzione di

modelli epidemiologici che possono costituire un valido aiuto nell'interpretazione del dato.

Nonostante questo limite, l'uso di tale tecnica deve essere considerato come un valido supporto alle decisioni riguardanti problemi di carattere ambientale, inclusi gli studi epidemiologici. Infatti, nonostante questa difficoltà a discriminare perfettamente una patologia dall'altra è da sottolineare il minor tempo necessario a controllare le sole aree sospette rispetto ad intere superfici forestali. Inoltre, la possibilità di monitorare le condizioni fitosanitarie in aree non sempre ben servite da viabilità e quindi non facilmente presidabili da terra è un vantaggio notevole che consente di seguire l'evoluzione di un dato fenomeno nel tempo e nello spazio, permettendo l'attuazione di opportune misure di contenimento.

L'alterazione dei processi fisiologici, in seguito a fitopatia, comporta delle variazioni nelle proprietà biofisiche, biochimiche e strutturali nella vegetazione, quali l'indice di area fogliare (Leaf Area Index, LAI), la concentrazione, la composizione e l'efficienza dei pigmenti fotosintetici. Dette alterazioni potranno essere indagate, tramite l'impiego di diverse tecniche di estrazione di laboratorio, per verificare le principali differenze, tra il mal dell'inchiostro ed il cancro corticale, a livello spettrale rilevabile dai sensori iperspettrali. Le immagini iperspettrali sono state impiegate con successo nello studio della morte improvvisa delle querce (SOD), in boschi misti della California, a causa di *P. ramorum*, da Pu *et al.* (2008).

L'applicazione inerente la dinamica spazio-temporale è la prima che descrive la distribuzione spaziale di *P. cambivora* attraverso il territorio. Strumenti quali il GIS facilitano questi studi permettendo di analizzare più variabili, in questo caso sono stati esaminati parametri territoriali e di malattia. La geostatistica è già stata applicata con successo in Portogallo da Martins *et al.* (2007) per descrivere il mal dell'inchiostro, causato da *P. cinnamomi* in impianti artificiali di castagno, appurando una correlazione spaziale tra la presenza di malattia e una forte attività antropica. In questo studio, il mal dell'inchiostro ed il gradiente, sono stati studiati in foresta dove le condizioni vegetazionali sono molto diverse da quelle caratterizzanti una piantagione. L'analisi dei parametri di malattia studiati fornisce informazioni utili sull'epidemiologia del mal dell'inchiostro in aree castanicole naturalizzate. La distribuzione uniforme dell'incidenza suggerisce la presenza di un meccanismo efficiente nella dispersione

dell'inoculo sull'intera area di studio. Poiché l'incidenza è alta, le variazioni di malattia sono dovute principalmente alle variazioni di severità e mortalità. Severità e mortalità sono state accuratamente predette dai modelli spaziali in funzione dell'eterogeneità del territorio. Ovviamente l'incidenza e la severità sono parametri di malattia che stimano fasi diverse dell'epidemia. Le condizioni stazionali determinano un aumento dell'incidenza (movimenti dell'inoculo, anastomosi radicale, ecc.) che può discostarsi da quello causato dalla severità (elevata presenza di inoculo). Pertanto l'indice di malattia (IMA), ottenuto come prodotto tra l'incidenza e la severità, rappresenta una variabile affidabile per analizzare le differenti condizioni stazionali (Groth *et al.*, 1999; Cardoso *et al.*, 2004).

Vari i fattori di rischio per la diffusione del mal dell'inchiostro, temperatura e precipitazioni (Vannini e Vettraino, 2001), caratteristiche edafiche (Martins *et al.*, 1999). Questo lavoro dimostra che un altro potenziale fattore di diffusione di *P. cambivora*, in un castagneto, dipende anche dalle caratteristiche territoriali. Altri studi condotti, sia in foresta sia in campo agricolo, dimostrano che la diffusione di alcuni patogeni terricoli, appartenenti al genere *Phytophthora*, si diffondono, attraverso il territorio, secondo dei modelli preferenziali (Larkin *et al.*, 1995; Jules *et al.*, 2002; Jung e Blaschke, 2004).

La distribuzione aggregata della malattia, nell'area oggetto di studio può essere spiegata con l'alta densità di inoculo in prossimità dei compluvi, come suggerito anche per altre fitopatie causate dal genere *Phytophthora* (Hansen *et al.*, 2000; Jules *et al.*, 2002; Jung e Blaschke, 2004).

Le condizioni di maggiori gravità sono state individuate in prossimità delle linee di compluvio, infatti, oltre i 10 metri dalle stesse, si assiste ad un netto decremento dell'indice di malattia, della severità e della mortalità. Hansen *et al.*, (2000) riportano che la mortalità di Port Orford Cedar, causata da *Phytophthora lateralis* (Tucker e Milbrath) è massima entro i 3 metri dalle linee di compluvio e si riduce drasticamente oltre i 10/12 metri. I compluvi sono considerati una via preferenziale di diffusione dell'inoculo di *Phytophthora* spp. negli ambienti naturali (Weste *et al.*, 1976; Weste e Marks, 1985; Hansen *et al.*, 2000; Jules *et al.*, 2002; Hwang *et al.*, 2007). Comunque, l'elevata saturazione dei suoli, in vicinanza dei compluvi, aumenta le probabilità di infezione dell'ospite. Sulla base di queste considerazioni si può affermare che le aree in

prossimità delle linee di compluvio sono quelle da cui le infezioni hanno avuto origine e la malattia presenta la maggiore incidenza. Le infezioni primarie, probabilmente, contribuiscono alla diffusione del mal dell'inchiostro man mano che ci si allontana dai drenaggi. Infatti i parametri di malattia, nell'area studiata, sono variabili e fortemente correlati spazialmente. I modelli spaziali sono fortemente dipendenti dai meccanismi di dispersione dell'inoculo e dall'architettura dell'ospite (Ristaino e Gumpertz, 2000)

Quanto asserito è supportato dal confronto tra le prediction maps del 2002 e del 2003, dalla Figura 41 si evince una diffusione centrifuga della malattia a partire dai focolai primari. Pur non essendo in grado di ricostruire cronologicamente la modalità d'invasione del patogeno, il numero elevato di piante morte in prossimità dei compluvi è un ulteriore elemento a sostegno del fatto che queste aree possano costituire un probabile punto di partenza della malattia. Altri fattori sono sicuramente coinvolti nella dispersione centrifuga dell'inoculo. Come riportato per altre specie di *Phytophthora* terricole, il movimento di suolo ad opera dell'attività antropica o animale (Anselmi, 1999; Hansen *et al.*, 2000), il contatto radicale (Weste *et al.*, 1976) e il geotattismo negativo delle zoospore (Erwin e Ribeiro, 1996) possono rappresentare ulteriori modalità di diffusione del patogeno.

La distanza tra le piante infette e quelle sane sembra essere un altro importante fattore nella dispersione dell'inoculo: i semivariogramma, per la severità e l'indice di malattia indicano una correlazione spaziale della malattia, per il 2002 ed il 2003, entro un range di circa 60 metri. Questo range può essere inteso come la distanza oltre la quale due focolai di *Phytophthora* spp. possono essere considerati indipendenti l'uno dell'altro. Questo range può variare in funzione delle caratteristiche del sito. In questo caso l'elevata densità del ceduo castanile, con alta possibilità di contatto radicale ed il movimento dell'inoculo in prossimità degli apparati radicali, rappresentano diverse modalità di diffusione della malattia. L'alta densità del ceduo castanile, oggetto di studio, favorisce sicuramente il movimento dell'inoculo da un ospite all'altro per anastomosi radicale; questo meccanismo di diffusione può spiegare la presenza uniforme della malattia e la sua alta incidenza. Comunque, allontanandosi dalle linee di compluvio, diminuisce la probabilità di saturazione del terreno e la quantità di inoculo e ciò fa diminuire la possibilità di infezioni massicce alle radici principali o al colletto, come indicato dai bassi valori di severità e mortalità. La densità dei popolamenti e la

distanza delle piante dalle fonti di inoculo sono considerati fattori fondamentali nell'epidemiologia di *P. lateralis* su Port Orford Cedar (Jules, 2002).

Assumendo omogenea la distribuzione del ceduo castanile su un territorio variabile è legittimo attendersi una distribuzione del mal dell'inchiostro a macchie in funzione dell'andamento del territorio stesso. Questa ipotesi è suffragata da Vannini *et al.*, (2005) che hanno valutato la diffusione del mal dell'inchiostro su un'estensione di 24 km² nel centro Italia. La mappa, generata dall'attività di remote sensing, evidenzia inequivocabilmente la presenza di focolai distinti sul 7% dell'area castanicola totale. Comunque le analisi condotte dimostrano che la presenza del mal dell'inchiostro era significativamente associata alla densità di strade ed alla eterogeneità del territorio (Noce, 2005). In questo lavoro è stato evidenziato un aumento dell'intensità di malattia dei focolai all'aumentare della densità di strade e compluvi che li attraversano, ciò a conferma dell'importanza degli stessi come fattori di diffusione della malattia. Risultati analoghi erano già stati conseguiti da Jules *et al.*, (2002) nello studio condotto su *P. lateralis* su Port Orford Cedar in Oregon. Gli autori hanno evidenziato l'alta incidenza degli attacchi del patogeno in aree a valle, in particolare dove le strade attraversano i torrenti. Le strade sono considerate delle vie preferenziali per il trasporto dell'inoculo di *P. cinnamomi* negli ecosistemi forestali australiani (Weste e Marks, 1985). Mentre le strade sono considerate un'efficiente via di diffusione dell'inoculo attraverso varie aree, i torrenti e le linee di compluvio possono rappresentare il mezzo principale di diffusione di *Phytophthora* spp. all'interno di aree boscate naturali (Jules *et al.*, 2002).

Per comprendere le modalità di diffusione e approntare le opportune misure di controllo nei confronti di una specie invasiva e letale come *P. cambivora* in un castagneto, è importante individuare i parametri territoriali che favoriscono l'affermazione e la diffusione del mal dell'inchiostro (Shearer e Tippet, 1989). In base alle attuali conoscenze, possiamo affermare che costituiscono fattori ambientali e territoriali di rischio: piogge annuali superiori ai 1000 mm, ridotta siccità estiva, suoli scarsamente areati, alta densità delle strade, torrenti e compluvi. Comunque i fattori stazionali possono agire diversamente sul mal dell'inchiostro in base alle caratteristiche del castagneto. In piantagioni produttive l'attività umana sembra essere il principale fattore di diffusione della malattia, infatti un'associazione significativa è stata evidenziata tra la diffusione della malattia e la frequenza di lavorazioni e fertilizzazioni

squilibrata (Portela *et al.*, 1999; Martins *et al.*, 2007). Nei castagneti naturalizzati, i compluvi, l'anastomosi radicale e l'eterogeneità del territorio sembrano costituire il fattore guida per la diffusione della malattia. In seguito a queste considerazioni possiamo asserire che i dati georeferiti ed i modelli di interpolazione spaziale, integrati in ambiente GIS, consentono di elaborare mappe di rischio fitosanitario e d'individuare le strategie più idonee per applicare le opportune misure di controllo.

6 BIBLIOGRAFIA

- Anselmi, N., Giordano, E., Vannini, A., Troiani, L., Napoli, G., Crivelli, L. 1996. Il Mal dell'inchiostro del castagno in Italia: una vecchia malattia tornata attuale. *Linea Ecologica*, 18:39-44.
- Anselmi, N., Vettraino, A.M., Franco, S., Chiarot, E., Vannini, A. 1999. Recrudescenze del Mal dell'Inchiostro del castagno in Italia: nuove acquisizioni e suggerimenti di lotta. *Linea Ecologica*, 5:53-58.
- Aronoff, S. 1989. *Geographic Information Systems: A Management Perspective*, WDL Publications, Ottawa.
- Asner, G.P., Jones, M.O. Martin, R.E., Knapp, D.E., Hughes, R.F. 2008. Remote sensing of native and invasive species in Hawaiian forests. *Remote Sensing of the Environment*, 112:1912-1926.
- Baret, F., Guyot, G., Major, D. 1991. Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment, *Remote Sensing and the Environment*, 35:161-173.
- Battilani, P. 2004. Ferite alle cariossidi e umidità favoriscono i funghi aflatossigeni. *L'Informatore Agrario*, 14:47.
- Bauer, M.E., Burk, T.E., Ek, A.R., Coppin, P.R., Lime, S.D., Walsh, T.A., Walters, D.K., Befort, W., Heinzen, D.F. 1994. Satellite Inventory of Minnesota Forest Resources. *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, 60 (3):287-298.
- Belli, C., De Otto, G., Gioli, B., Laranci, P., Papale, D. 2008. Il telerilevamento aereo multispettrale per la mappatura degli incendi boschivi. *Mondigis*, 64:22-26.
- Bello-Pineda, J., Liceaga-Correa, M.A., Hernandez-Nunez, H., Ponce-Hernandez, R. 2005. Using aerial video to train the supervised classification of landsat tm imagery for coral reef habitats mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*, 105:145-164.
- Biallo, G., 2002. *Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici*, Roma.
- Boyd, D., Danson, F. 2005. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography* 29 (1):1-26.
- Briosi, G., Farneti, R. 1909. Intorno alla causa della mora dei castagneti (Mal dell'inchiostro) ed ai mezzi per combatterla. *Atti Istituto Bot. D.R., Università di Pavia*.
- Briosi, G., Farneti, R. 1911. Nuove osservazioni intorno alla mora dei castagneti e sua riproduzione artificiale. *Atti Istituto Bot. D.R., Università di Pavia*.
- Brivio, P.A., Lechi, G.M., Zilioli E. 1992.. *Il telerilevamento da aereo e da satellite*. Carlo Delfino Editor.

- Brivio, P.A., Lechi, G.M., Zilioli, E. 2006. Principi e metodi di telerilevamento. CittàStudi Edizioni.
- Brussino, G., Bosio, G., Baudino, M., Giordano, R., Ramello, F., Melika, G. 2002. [The cynipid gall wasp *Dryocosmus kuriphilus*: a dangerous exotic insect for chestnut in Europe.] *Informatore Agrario*, 37:59–61.
- Burrough, P.A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. Oxford University Press, New York: pp. 1-193.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. 2000. Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York.
- Campbell, C.L., Madden, L.V. 1990: Introduction to Plant Disease Epidemiology. Toronto: John Wiley & Sons.
- Cardoso, J.E., Santos, A.A., Rossetti, A.G., Vidal, J.C. 2004. Relationship between incidence and severity of cashew gummosis in semiarid north-eastern Brazil. *Plant Pathol.*, 53:363–367.
- Chen, J.H., Kan, C.E., Tan, C.H., Shih, S.F., 2002. Use of spectral information for wetland evapotranspiration assessment. *Agricultural Water Management*, 55: 239-248.
- Chen, J.M., Pavlic, G., Brown, L., Cihlar, J., Lebalnc, S.G., White, H.P., Hall, R.J., Peddle, D.R., King, D.J., Trofymow, J.A., Swift, E., Van Der Sanden, J., Pellikka, P.K.E. 2002. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote sensing of environment*, 80:165-184.
- Chilar, J., St-Laurent, L., Dyer, J.A. 1991. Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. *Remote Sensing Environment*, 35:279-298.
- Clark, P.E., Seyfried, M.S., Harris, B. 2001. Intermountain plant community classification using Landsat TM and SPOT HRV data. *Journal of Range Management*, 54:152-160.
- Clevers, J.G.P.W., Leewen, H.J.C. 1996. ‘Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring’, *Remote Sens. Environ.*, 56:42–51.
- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of the Environment*, 37:35-46.
- Coops, N.C., Stanford, M., Old, K., Dudzinski, M., Culvenor, D.S., Stone, C. 2003. Assessment of Dothistroma needle blight of *Pinus radiata* using airborne hyperspectral imagery. *Phytopathology*, 93:1524-1532.
- Crandall, B.S., Gravat, G.F., Ryan, M.M. 1945. Root disease of *Castanea* species and some coniferous and broadleaf nursery stocks, caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Phytopathology*, 3:162–180.

- Curran, P.J. 1981. Multispectral remote sensing for estimate biomass and productivity. In: Smith, H. Ed. *Plants and the Daylight Spectrum*. Academic Press, London: 65-69.
- Darrieutort, G., Lecomte, P. 2007. Evaluation of a trunk injection technique to control grapevine wood diseases. *Phytopathol. Mediterr.*, 46:50–57.
- Deering, D.W., Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. 1975. Measuring “Forage Production” of Grazing Units From Landsat MSS, *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, II, 1169-1178.
- Delacroix, G. 1897. La maladie des chataigniers en France (A disease of chestnut trees in France). *Soc. Mycol.*, Fr.13:242-252 (In french) (Cited in Turker 1931).
- Eobem Project. 2001. Earth Observation for grassland, shrubland and woodland Biomass Estimate and Management. Training document, Advanced Computer System S.p.A. e ENEA.
- Erwin, D.C., Ribiero, O.K. 1996. *Phytophthora Disease Worldwide*. APS press, The American Phytopathology Society, St. Paul, Minnesota, 561 pp.
- Everitt, J.H., Escobar, D.E., Appel, D.N., Riggs, W.G., Davis, M.R. 1999. Using airborne digital imagery for detecting oak wilt disease, *Plant Disease*, 83:502–505.
- FAO. 1999a. Satellite Imagery to Assist Forest Management – Pilot study in Morocco. *Fao Remote Sensing for Decision-makers Series*, no. 15
- FAO. 1999b. Satellite Imagery for Rangeland Assessment and Monitoring – Pilot study in Morocco. *Fao Remote Sensing for Decision-makers Series*, no. 16
- Fernández-Escobar R., Gallego F.J., Benlloch M., Membrillo J., Infante J. e de Algaba A.P. 1999 – Treatment of oak decline using pressurized injection capsule of antifungal materials. *European Journal of Forest Pathology* 29: 29-38.
- Fisher, T.R., Wales, R.Q. 1990. 3-D solid modelling of sandstone reservoirs using NURBS: a case study of Noonan Ranch field, Denver basin, Colorado. *Geobyte*, 5(1):39-41.
- Floyd, F.S. Jr. 1978. Remote sensing.
- Foody, G.M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80:185– 201.
- Gergel, S.E., Stange, Y., Coops, N.C., Johansen, K., Kirby, K.R. 2007. What is the value of a good map? An example using high spatial resolution imagery to aid riparian restoration. *Ecosystems*, 10:688-702.
- Gibelli, G. 1879. La malattia del castagno. *Observazioni ed esperienze*. Modena.
- Gibelli, G. 1882. Nuovi studi sulla malattia del castagno detta dell’inchiestro. *Accad. Science, Istit. Di Bologna*, 80-98.

- Gibelli, G. 1883. Nuovi studi sulla malattia del Castagno detta dell'inchiostro. Mem. Acc. Sc. Bologna.
- Gomasasca, A.M. 1997. Introduzione a telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali. Editore AIT (Associazione Italiana di telerilevamento), pp. 250.
- Gomasasca, M.A. 2004. Elementi di Geomatica, Edizioni AIT.
- Goward, S.N. 1989. Satellite bioclimatology. *Journal of Climate*, 2 (7):710-720.
- Groth, J.V., Ozmon, E.A., Bush, R.H. 1999. Repeatability and relationship of incidence and severity measures of scab of wheat caused by *Fusarium graminearum* in inoculated nurseries. *Plant Dis.*, 83:1033–1038.
- Hansen, E.M., Goheen, D.J., Jules, E.S., Ullian, B. 2000. Managing Port-Orford-Cedar and the introduced pathogen *Phytophthora lateralis*. *Plant Dis.*, 84:4-10.
- Helfert, M.R., Lulla, K.P. 1990. Mapping continental scale biomass burning and smoke palls over the Amazon basin as observed from the Space Shuttle. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56, 1367–73.
- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *IJRS*, v. 7 (11): p. 1417-1434.
- Hosking, R. Grassland Curing Index - A district Model that allows Forecasting, National Parks and Wildlife Service, Braidwood NSW.
- Hwang, J., Oak, S.W., Jeffers, S.N. 2007. Detecting *Phytophthora ramorum* and other species of *Phytophthora* in streams in natural ecosystems using baiting and filtration methods. In: Proceedings of the sudden oak death third science symposium. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-214 Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, pp. 55–58.
- Ikeda, H., Okamoto, K., Fukuhara, M. 1999. Estimation of aboveground grassland phytomass with a growth model using Landsat TM and climate data. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (11):2283-2294.
- Isaaks, E.H. Srivastava, R.M. 1989: Applied Geostatistics: Oxford University Press, New York.
- ISTAT. 1996. Annuario di statistiche forestali
- Jensen, J.R. 1996a. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Jensen, J.R. 1996b. Introductory image processing: a remote sensing perspective (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., Lucas, N. 2001. Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Environmental Systems Research Institute, New York.

- Jules, E.S., Kauffman, M.J., Ritts, D.R., Carrol, A.L. 2002. Spread of an invasive pathogen over a variable landscape: a nonnative root rot on Port Orford Cedar. *Ecology*, 83:3167-3181.
- Jung, T., Blaschke, M. 2004. *Phytophthora* root and collar rot of alders in Bavaria: distribution, modes of spread and possible management strategies. *Plant Pathol.*, 53:197–208.
- Jung, T., Blaschke, H., Neumann, P. 1996. Isolation, identification and pathogenicity of *Phytophthora* species from declining oak stands. *Eur. J. For. Path.*, 26:253-272.
- Kallas, M.A., Reich, R.M., Jacobi, W.R., Lundquist, J.E. 2003. Modeling the probability of observing Armillaria root disease in the Black Hills. *Forest Pathology*, 33:241-252.
- Kawabata, A., Ichii, K., Yamaguchi, Y. 2001. Global monitorino of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *Int. J. Remote Sensing*, 7:1377-1382.
- Kelly, N.M., Meentemeyer, R. 2002. Landscape dynamics of the spread of Sudden Oak Death, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68:1001–1009.
- Kelly, M., Shaari, D., Guo, Q., Liu, D. 2004. A comparison of standard and hybrid classifier methods for mapping hardwood mortality in areas affected by sudden oak death, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (11):1229–123.
- Langley, S.K., Cheshire, H.M., Humes, K.S. 2001. A comparison of single date and multitemporal satellite image classifications in a semi-arid grassland. *Journal of Arid Environments*, 49:401-411.
- Larkin, R.P., Gumpertz, M.L. Ristaino, J.B. 1995. Geostatistical analysis of *Phytophthora* epidemic development in commercial bell pepper fields. *Phytopathology*, 85:191–203.
- Lasaponara, R., Lanorte, A. 2007. Remotely sensed characterization of forest fuel types by using satellite ASTER data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9:225–234.
- Lee, S.B., Taylor, J.W. 1990. Isolation of DNA from fungal mycelia and single spores. In: *PCR protocols: a guide to methods and applications*. Eds. Innis et al., Academic Press, New York. pp 282-287. (Review of *Applied Mycology*, 1954, 758).
- Leone, A. 2004. Ambiente e territorio agroforestale: linee guida per la pianificazione sostenibile e gli studi di impatto ambientale. Franco Angeli Editore, pp. 432
- Li, Z., Khananian, A., Fraser, R., Cihlar, J. 2001. Automatic Detection of Fire Smoke Using Artificial Neural Networks and Threshold Approaches Applied to AVHRR Imagery, *IEEE T. Geoscience and Remote Sensing* 39:1859–1870.
- Lionetti, L. 1991. Su alcuni problemi campionari connessi al telerilevamento. Relazione presentata alle Giornate di Studio “La Statistica per le analisi territoriali e spaziali”, Parma 14-15 ottobre.

- Loukas, G.A., Ramachandran, B., Brackett, D.P., Rasol, H.A., Xuesong, D. 2000. Multiresource inventories incorporating GIS, GPS and database management systems: a conceptual model. *Computers and electronics in agriculture*, 28:88-100.
- Lucas, K.L., Carter, G.A. 2008. The use of remote sensing to assess vascular plant species richness on Horn Island, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, 112:3908–3915.
- Lung-Escarmant, B., Guyon, D. 2004. Temporal and spatial dynamics of primary and secondary infection by *Armillaria ostoyae* in a *Pinus pinaster* plantation. *Phytopathology*, 94:125-131.
- Luque, J., Parladé, J., Pera, J. 2002. Seasonal changes in the susceptibility of *Quercus suber* to *Botryosphaeria stevensii* and *Phytophthora cinnamomi*. *Plant Pathology*, 51:338-345.
- Macomber, S., Woodcock, C. 1994. Mapping and monitoring conifer mortality using remote sensing in the Lake Tahoe basin. *Remote Sensing of Environment*, 50:255–266.
- Maguire, D.J. 1990. *Il computer nello studio del territorio*. Franco Angeli editore.
- Malingreau, J.P. 1989. The vegetation index and the study of vegetation dynamics. In: Toselli, F. Ed., *Application of Remote Sensing to Agrometeorology*. ECSC. Brussels, 285-303.
- Mangin, L., 1903. Sur la maladie du châtaigner causée par le *Mycelophagus castanae*. *CR.Acad.Sc.Paris*.
- Martins, L.M., Oliveira, M.T., Abre, C.G. 1999. Soils and climatic characteristic of chestnut stands that differ in the presence of the Ink disease. *Acta Horti*, 494:447–449.
- Martins, L., Castro, J., Macedo, W., Marques, C., Abreu, C. 2007. Assessment of the spread of chestnut Ink disease using remote sensing and geostatistical methods. *Eur. J. Plant Pathol.*, 119:159–164.
- Maselli, F. 2004. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 89:423-433.
- Mather, P.M. 1999. *Computer processing of Remotely-sensed images. An introduction*. John Wiley and Sons, Baffins Lane, England.
- Moran, M.S., Jackson, R.D. 1991. Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs. *Journal Environmental Quality*, 20:725-737.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., Nemani, R.R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386:698-702.

- Nelson, M.R., Orum, T., Jalme-Garcia, R. 1999. Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. *Plant disease*, 83 (4):308-319.
- Noce, S. 2005. Nuove tecniche di monitoraggio del Mal dell'Inchiostro del castagno e studi sulla dinamica dell'inoculo dell'agente causale *Phytophthora cambivora*. Rel. Vannini A. Università degli Studi della Tuscia, Viterbo.
- Perry, C.Jr, Lautenschlager, L.F. 1984. Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices, Remote Sensing and the Environment, 14:169-182.
- Petri, L. 1917. Studi sulla malattia del castagno detta "dell'inchiostro". *Annali del R. Istituto superiore forestale nazionale* II pp. 1-181.
- Petri, L. 1917a. Studi sulla malattia del castagno detta "dell'inchiostro". Firenze, Ricci M:182.
- Petri, L. 1917b. Studi sulla malattia del castagno detta "dell'inchiostro". *Annali del R. Istituto Superiore Forestale Nazionale*, Firenze, 2, 181 pp.
- Petri, L. 1918. Studi sulla malattia del castagno detta dell'inchiostro. Morfologia e biologia del micelio parassita. *Annali del R. Istituto Superiore Forestale Nazionale*, Firenze, 3:3-35.
- Petri, L. 1925. Osservazioni biologiche sulla "*Blepharospora cambivora*". *Annali del R. Istituto Superiore Forestale Nazionale*, Firenze. Ser 2.a, 1:157-161.
- Petri, L. 1930. La formazione degli organi della riproduzione sessuale della *Phytophthora* (*Blepharospora cambivora*) in culture pure. *Boll. Staz. Pat. Veg.* Roma, 10:361-365.
- Petri, L. 1936. Rassegna dei casi fitopatologici osservati nel 1935. *Boll. Staz. Pat. Veg.* Roma, N.S. 16: 1, 1-25.
- Piccioli, L. 1922. Malattia dell'inchiostro, Monografia del Castagno. Firenze.
- Pouliot, D., Latifovic, R., Olthof, I. 2009. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985-2006. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (1):149-168.
- Portela, E., Aranha, J., Martins, A., Pires, A.L. 1999. Soil factors, farmers practices and chestnut Ink disease: some interactions. *Acta Hortic. (ISHS)*, 494:433-442.
- Pu, R., Kelly, M., Anderson, G. L., Gong, P. 2008. Using CASI Hyperspectral Imagery to Detect Mortality and Vegetation Stress Associated with a New Hardwood Forest Disease. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 74 (1):65-75.
- Raspa, G. 1995. Dispense di Geostatistica Applicata. Sito internet: <http://w3.uniroma1.it/geostatistica/Geostatistica/Dispense.pdf>

- Richardson, A.J., Wiegand, C.L. 1977. Distinguishing Vegetation From Soil Background Information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43 (12):1541-1552.
- Ristaino, J.B., Gumpertz, M.C. 2000. New frontiers in the study of dispersal and spatial analysis of epidemics caused by species in the genus *Phytophthora*. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 38:541–576.
- Rouse, J.W.Jr., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C. 1974. Monitoring the Veronal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD., 371.
- Shearer, B.L., Tippet, J.T. 1989. Jarrah Dieback: the dynamics and management of *Phytophthora cinnamomi* in the Jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest of southwestern Australia. Department of Conservation and Land Management, Como, Western Australia, Research Bulletin n° 3.
- Shearer, B.L., Fairman R.G., Grant, M.J. 2006. Effective concentration of phosphite in controlling *Phytophthora cinnamomi* following stem injection of Banksia species and *Eucalyptus marginata*. *For. Path.*, 36:119–135.
- Singh, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely sensed data. *Int. J. Remote Sens.*, 10:989–1003.
- Stamps, D.J., Waterhouse, G.M., Newhook, F.J., Hall, G.S. 1990. Revised tabular key to the species of *Phytophthora*. *Mycol. Pap.*, 162:1-28.
- Stehman, S.V., Czaplewski, R.L. 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of the Environment*, 64:331–344.
- Sun, W., Kelly, M., Gong P. 2005. Separation of Dead Tree Crowns from the Oak Woodland Forest Mosaic by Integrating Spatial Information. *Geocarto International*, 20(2):15-20.
- Swain, P.J. 1978. Fundamentals of Pattern Recognition in Remote Sensing. In Swain, P.H. and Davis, S.M. editors, 1978. *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. McGraw-Hill, Inc., New York, 396 pp.
- Thiam, A.K. 1997. Geographic Information System and Remote Sensing Methods for Assessing and Monitoring Land Degradation in the Sahel: The Case of Southern Mauritania. Doctoral Dissertation, Clark University, Worcester Massachusetts.
- Thomidis, T., Elena, K. 2001. Effects of Metalaxyl, Fosetyl-Al, Dimethomorph and Cymoxanil on *Phytophthora cactorum* of Peach Tree J. *Phytopathology*, 149:97-101.
- Tomlinson, R., Petchenik, B. 1988. Reflections on a Revolution: The Transition from Analogue to Digital Representations of Space, 1958-1988, in “The American Cartographer”, 15 (3 special issue).

- Thomson, M.C., Connor, S.J. 2000. Environmental information systems for the control of arthropod vectors of disease. *Med. Vet. Ent.*, 14:227-244.
- Townsend, P.A., Walsh, S. 2001. Remote sensing of forested wetlands: application of multitemporal and multispectral satellite imagery to determine plant community composition and structure in southeastern USA. *Plant Ecology*, 157:129-149.
- Tramontana, G. 2005. Elaborazione di mappe di diffusione del mal dell'inchiostro utilizzando attività di remote sensing ed elaborazioni GIS. Elaborato finale del corso di laurea primo livello in Scienze Forestali ed Ambientali. Rel. Vannini A. Università degli Studi della Tuscia, Viterbo.
- Trianni, G., 2006. Introduzione al telerilevamento per l'osservazione della terra. Dispense. Università degli Studi di Pavia, Facoltà di Ingegneria.
- Vannini A., Vettraino A.M. 2001. Ink disease of chestnut: impact on European chestnut. *Forest Snow and Landscape Research*, 76:345-350.
- Vannini, A., Vettraino, A.M. 2004: Aspetti di epidemiologia e difesa relativi alle principali avversità patologiche del castagno. *Inf. Fitopatol.*, 54:20-24.
- Vannini, A., Vettraino, A.M., Fabi, A., Montagni, A., Valentini, R., Belli, C. 2005. Monitoring Ink Disease of Chestnut with the Airborne Multispectral System A.S.P.I.S.. *Acta Hort.*, 693:529-533.
- Vannini, A., Franceschini, S., Vuono, G., Natili, G., Paganini, R., Vettraino, A.M. 2009. Integrated Control Protocol to Mitigate and Eradicate Ink Disease in Chestnut Orchards. *Acta Hort.*, 844:461-464.
- Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montagni A., Vettraino A.M. 2009. Distribution and gradient analysis of Ink disease in chestnut forests. *Forest Pathology*, doi: 10.1111/j.1439-0329.2009.00609.x
- Vettraino, A.M., Natili, G., Anselmi, N., Vannini, A. 2001. Recovery and pathogenicity of *Phytophthora* species associated with resurgence of ink disease on *Castanea sativa* in Italy. *Plant Pathology*, 50:90-96.
- Vettraino, A.M., Morel, O., Perlerou, C., Robin, C., Diamandis, S., Vannini, A. 2005. Occurrence and distribution of *Phytophthora* species in European chestnut stands, and their association with Ink Disease and crown decline. *European Journal of Plant Pathology*, 86.
- Wang, Q., Adikua, S., Tenhunena, J., Granier, A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote sensing of Environment*, 94:244-255.
- Watson, D.F. 1981. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytypes. *The Computer Journal*, 8(2):167-172.
- Weste, G., Ruppin, P., Vithanage, K. 1976. *Phytophthora cinnamomi* in the Brisbane Ranges: Patterns of Disease Extension. *Australian Journal of Botany*, 24:201-208.

- Weste, G., Marks, G.C. 1985. The Biology of *Phytophthora cinnamomi* in Australasian Forests. Annual Review of Phytopathology, 25:207-229.
- Whiley, A.W., Saranah, J.B., Langdon, P.W., Hargreaves, P.A., Pegg, K.G. Ruddle, L.J. 1992. Timing of Phosphonate Trunk Injections for *Phytophthora* Root Rot Control in Avocado Trees Proc. of Second World Avocado Congress pp.75-78.
- White, T.J., Bruns, T., Lee, S.B., Taylor, J.W. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand, D.H., Sninsky, J.J., White, T.J., eds. PCR Protocols, A Guide to Methods and Applications. San Diego, USA: Academic Press, 315-22.
- Wicks, T. 1988. Effect of Metalaxyl on the control of *Phytophthora* crown rot of almonds. Australian Journal of experimental Agriculture, 28 (4):547-552.
- Wicks, T., Hall, B. 1990. Evaluation of phosphonic (phosphorous) acid for the control of *Phytophthora cambivora* on almond and cherry in South Australia. Australasian Plant Pathology, 19 (4):132-133.
- Woldewahid, G., Van Der Werf, W., Van Huls, A., Stein, A. 2004. Spatial distribution of solitarious adult desert locust (*Schistocerca gregaria* Forsk.) on coastal plain of Sudan. Agric. For. Entomol., 6:181-191.
- Yang, L., Wylie, B.K., Tieszen, L.L., Reed, B.C. 1998. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U. S. northern and central Great Plains, Remote Sens. Environ., 65:25–37.
- Yoon, C.S., Glawe, D.A., Shaw, P.D. 1991. A method for rapid small-scale preparation of fungal DNA. Mycologia, 83:835-838.
- Zwankhuizen, M.J., Govers, F. Zadoks, J.C. 1998. Development of Potato Late Blight Epidemics: Disease Foci, Disease Gradients, and Infection Sources. Phytopathology, 88:754-763.

Siti internet:

www.cscrs.itu.edu.tr

www.csc.noaa.gov

www.ccrs.nrcan.gc.ca

www.geotecnologie.unisi.it

www.physics.gatech.edu

7 ALLEGATI

Si allegano, alla presente, le pubblicazioni prodotte nel corso del dottorato di ricerca:

- Vannini, A., Natili G., Anselmi N., Montagli A., Vettraino A.M. 2009. Distribution and gradient analysis of Ink disease in chestnut forests. *Forest Pathology*, doi: 10.1111/j.1439-0329.2009.00609.x
- Vannini, A., Franceschini, S., Vuono, G., Natili, G., Paganini, R., Vettraino, A.M. 2009. Integrated Control Protocol to Mitigate and Eradicate Ink Disease in Chestnut Orchards. *Acta Hort.*, 844:461-464.
- Vannini A., Vettraino A.M., Montagli A., Natili G., Belli C. 2005. Nuove tecnologie di telerilevamento per il monitoraggio fitopatologico: l'applicazione al mal dell'inchiostro del castagno. In "Italus Hortus" Pubblicata dalla Società Orticola Italiana (SOI), 12(5):24-26.

Distribution and gradient analysis of Ink disease in chestnut forests

By A. VANNINI¹, G. NATILI, N. ANSELMi, A. MONTAGHI and A. M. VETTRAIINO

Department of Plant Protection, University of Studies of Tuscia, Via S. Camillo de Lellis,
01100 Viterbo, Italy. ¹E-mail: vannini@unitus.it (for correspondence)

Summary

Distribution and gradient analysis of Ink disease caused by *Phytophthora cambivora* were studied over a 2 years period in a chestnut forest in Italy. Ink disease incidence, severity and tree mortality increased during the period over the studied chestnut forest. Disease descriptors and landform datasets were analysed by Geographic Information System software and displayed as a multilayer thematic map. Indices of dispersion and empirical dispersion models were used to study spatial distribution of disease in the investigated area. Semivariograms were used to interpolate spatial data and to map Ink disease. A logical spatial dependence of the studied variables was found. Ink disease occurred preferentially along natural drainages routes where multicyclic inoculum build up was likely to occur. A negative relationship was found between Ink disease incidence, severity and tree mortality with respect to distance from the drainage.

1 Introduction

Ink disease is one of the most destructive diseases of sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) in Europe (VETTRAIINO et al. 2001, 2005). It causes root and/or collar rot of trees and seedlings in nurseries, plantations and forests (VANNINI and VETTRAIINO 2001). Disease symptoms include crown decline and the presence of flame-shaped necroses in the bark tissues at the collar. Disease progression can be slow, as shown for European oak and beech decline (JUNG et al. 2000, 2005; VETTRAIINO et al. 2002; BALCI and HALMSCHLAGER 2003), or extremely severe and rapid killing large trees in one or two growing seasons. Ink disease is caused by two *Phytophthora* species, *P. cambivora* and *P. cinnamomi* (VANNINI and VETTRAIINO 2001). The first species is the main cause of the disease in Italy and Greece, while the more aggressive *P. cinnamomi* is widely prevalent in Spain, Portugal and France, especially in areas characterized by limited frost events during the winter (VETTRAIINO et al. 2005). Furthermore a number of additional *Phytophthora* species are commonly found associated with the root system of chestnut in Europe (VETTRAIINO et al. 2005). Their involvement in decline is still unclear but may be limited to fine root losses as demonstrated for walnut, oak and beech decline (JUNG et al. 2000, 2005; VETTRAIINO et al. 2003). Zoospores are the main source of *Phytophthora* inoculum for dispersal in the environment through flowing water and/or movement of soil particles (ERWIN and RIBEIRO 1996). Site factors and human practices also represent key factors in determining the progression of Ink disease. Chestnut areas with average annual precipitation above 1000 mm and limited summer droughts are particularly vulnerable to *Phytophthora* spp. attacks (VETTRAIINO et al. 2005). Poorly aerated soils (MARTINS et al. 1999), as well as the network of rural and public roads that transverse chestnut forests, are factors contributing to the disease (ANSELMi et al. 1999). Association of Ink disease with intense human activities and intense tillage was recently demonstrated in chestnut plantations in Portugal by MARTINS et al.

Received: 29.10.2008; accepted: 13.4.2009; editor: S. Woodward

(2007) by application of remote sensing and geostatistics methods at a large scale. However, little information is actually available in the literature describing the disease distribution and gradient in natural chestnut forests where human activities are limited. Studies carried out in natural environments have shown that spread of soil-borne *Phytophthora* through heterogeneous landscape follows preferential patterns (JULES et al. 2002; JUNG and BLASCHKE 2004).

The objective of this study was to combine classical distribution and disease gradient analyses with Geographic Information System (GIS) and geostatistic tools to study, and spatially interpret the impact of Ink disease in an infected chestnut area in Central Italy over a 2-year period.

2 Materials and methods

2.1 Area investigated

The chestnut forests investigated were located in Central Italy, in Northern Latium on the Monti Cimini (latitude 42°25'N; longitude 12°12'E). This area is characterized by extensive coppice forest, ranging in altitude from 500 to 1000 m above sea level (a.s.l.). Although Ink disease is not uniformly distributed in these areas, an increasing number of infection foci are detected and recorded every year, and in some forests the incidence of Ink disease is particularly alarming (VETTRAINO et al. 2001). In order to study the temporal and spatial patterns of spread of Ink disease, a heavily affected chestnut plot of approximately 2 ha was selected. At the time of the investigation (2002 and 2003), the coppice was 16–18 year old, with 506 trees per hectare. Age of the stumps was difficult to assess but exceeded 100 years. The area was located at an altitude ranging from 870 to 890 a.s.l., with a slope of approximately 9–11% and a north-west exposure.

2.2 Elaboration of the thematic layers

Up to 27 geographic coordinates (UTM ED50 zone 33) were acquired along plot the perimeter using GPS (model GS20 Leica Geosystems, Inc., Heerbrugg, Switzerland) with resolution of ± 0.5 m. GPS coordinates were stored in files using *Leica GIS DataPRO v. 3.00*, and imported on a orthophoto at scale of 1:10000 with the program *Arcview ver. 3.2* (Environmental Systems Research Institute, ESRI, Inc., Redlands, CA, USA). The experimental plot was then subdivided into 10×10 m cells using the extension *Edit Tools 3.6* software (ET Spatial Techniques, Pretoria, South Africa). The 168 cells comprising the grid were considered single geographic elements (Fig. 1). The number of stumps per cell ranged between five and eight. The total area of the grid was 1.68 ha.

Disease estimations were carried out on each cell of the grid in July 2002 and 2003. The GIS database used for mapping and spatial analysis comprised of 10 information layers. Eight layers were obtained by mapping the four disease descriptors, severity (*S*), incidence (*I*), disease index (*DI*) and tree mortality values in 2002 and 2003, to the centroid of each cell, respectively. Centroid calculation was carried out with the *XTools 6/1/01* extension of *Arcview 3.2*. These data layers were analysed for spatial dependence as described below. A ninth data layer represented the network of natural drainages for surface water present in the investigated area; this layer was obtained with the *Hydrology* extension of *ArcGis 9.0* (ESRI, Inc., Redlands, CA, USA). A tenth data layer represented the altitude of the centroid of each cell in the grid. Altitude values expressed in m a.s.l. were interpolated using the Triangular Irregular Network of the *3D Analyst tool* of *ArcGis 9.0* to obtain a Digital Earth Model.

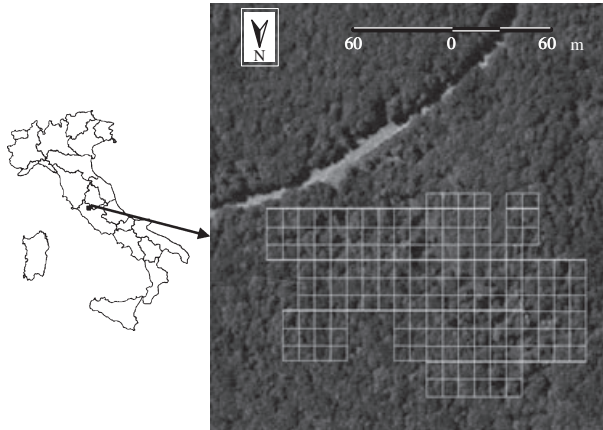


Fig. 1. Map of the study chestnut area and localization of the 168 cells (10 × 10 m) where disease descriptors were assessed in 2002 and 2003.

2.3 Disease assessment

Ink disease assessment was carried out in July by considering typical defoliation associated with yellowing of crown and reduced leaf size (VANNINI and VETTRAINO 2004). Disease descriptors were calculated according to GROTH et al. (1999) and CARDOSO et al. (2004). Disease incidence ($I = n/N$) was calculated as the number of diseased trees (n) amongst the total number of evaluated trees (N). Severity (S) was calculated using the equation $S = \Sigma(x_i n_i)/n$ where x_i represents the defoliation class, n_i the number of diseased trees in class x_i , and n the total number of diseased trees. Defoliation was estimated using a 1–10 scale at constant interval where: class 1 = 1–10% defoliation and class 10 = 91–100%. DI was estimated as the incidence-severity product according to the formula $DI = \Sigma(x_i n_i)/N$ (GROTH et al. 1999). Mortality was estimated as the number of dead stumps (d) amongst the total number of evaluated trees (N).

2.4 Sampling, isolation and species identification

In order to confirm the aetiology of the symptoms, soil and tissue samples were collected in spring 2002 from 36 trees arbitrarily selected in the area. To avoid disturbance to trees and to not affect disease assessment, evaluation of collar lesions and collection of tissue samples were carried out on the same trees in autumn 2003 after the last estimation of disease descriptors. Sampling, isolation and *Phytophthora* species identification were carried out according to VETTRAINO et al. (2005).

2.5 Distribution and disease gradient analyses

The variance-to-mean ratio was used to estimate the type of distribution patterns (regular, random or clustered) of the data (CAMPBELL and MADDEN 1990). This index of dispersion was calculated by dividing the sample variance by the sample mean: $VM = s^2/\bar{x}$ where s^2 is the sample variance and $\bar{x}$ the sample mean. VM is expected to be <1 for regular spatial patterns, = 1 for random patterns and >1 for aggregated patterns. The expected value of one for a random pattern is related to the idea that the Poisson distribution (by definition population mean = population variance) is appropriate for describing frequency count data for a random pattern. In general, the value of VM increases as aggregation increases.

Disease gradients from potential sources of inoculum were studied with the empirical dispersed Kiyosawa and Shiomi (1972) model. It assumes that Y decreases exponentially with distance from the source: $Y = A^{-KX}$ where A represents the value of Y at the source and K the rate of decrease in Y with distance, that is the steepness of the gradient.

2.6 Geostatistical analyses

Semivariogram analysis was carried out using *GS+ 7.0* software (Gamma Design Software, LLC, Plainwell, MI, USA) and the *Geostatistical Analysis* module of *ArcGis ver. 9.0*. In the first step, data were subjected to an exploratory spatial data analysis including data distribution and presence of outliers. The spatial autocorrelation of disease descriptors was calculated using Ordinary Kriging (OK) or Indicator Kriging (IK) models. The OK model, $Z(s) = \mu + \epsilon(s)$, where $Z(s)$ is an intrinsic stationary process (Attorre et al. 2007), is the most flexible kriging model because it works under the assumption that the mean μ is an unknown constant, and thus, random errors at the data locations are unknown (Isaaks and Srivastava 1989; Johnston et al. 2001). The IK assumes the model, $I(s) = m + e(s)$, where m is an unknown constant and $I(s)$ is a binary variable (Isaaks and Srivastava 1989; Johnston et al. 2001). The creation of binary data may be through the use of a threshold for continuous data, or alternatively, the observed data may be zero or one. Use of IK is appropriate when continuous data is not non-normally distributed. OK was used for S and DI data and IK was used for I and tree mortality datasets. Semivariograms $\gamma(h)$ were calculated with *GS+ 7.0* according to the formula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

where h is distance, $N(h)$ is the total number of pairs of cells with lag distance h , $Z(x_i)$ and $Z(x_i + h)$ are the disease values measured at centroids x_i and $x_i + h$ respectively.

Variograms show how changes in variances and enable quantification of spatial association. In geostatistics, variogram values derived from the data (experimental variograms) are fitted with model variogram functions using three parameters called the range, nugget, and sill. The range is the distance over which spatial autocorrelation occurs. The nugget and sill estimate the magnitude of the variability that occurs: the nugget estimating very short-range variability and measurement error and the sill estimating the additional total variability over the range. The relative nugget, defined as the ratio nugget/sill, was used to quantify the relative importance of spatially unexplained error, the nugget (C_0) with respect to the total variance, the sill ($C_0 + C$). If the relative nugget approaches zero, a large proportion of the total sample variance is spatially dependent. If it approaches one, the data are not spatially autocorrelated. Spatial interpolation is possible only if the spatial dependence is high (Isaaks and Srivastava 1989; Johnston et al. 2001).

Exponential, spherical, Gaussian models were fitted to the semivariograms to describe the relationship between the semivariance and the lag distance. The best model for a data set was chosen based on the maximum coefficient of determination (R^2), minimum residual sum of squares (RSS) and relative nugget for the fit as well as through cross-validation parameters (Isaaks and Srivastava 1989).

In a third step cross-validation was used to determine how well interpolated disease values were when predicted using OK or IK. For all points, this procedure compares the measured and the predicted values. In cross-validation analysis, the disease value at each site was individually removed from the data in order to predict its value on the basis of the measured value in the entire dataset. For a model that provides accurate predictions, the mean standardized prediction error should be close to zero and the root-mean-square,

2.7 Statistics

3 Results

A total of 851 trees were inspected. Incidence and mortality datasets were difficult to normalize but were analysed with non-parametric statistics. Severity and DI datasets passed the KS test for normality. Mean incidence of Ink disease was 68.3 and 76.9 in 2002 and 2003, respectively, a significant increase of 8.6% (Mann–Whitney non-parametric test, $p < 0.01$). Median values were 80.0 and 83.3 in 2002 and 2003, respectively, suggesting a relevant presence of Ink disease throughout the studied area. This result was supported by the VM values of <1 in both 2002 and 2003, suggesting a regular distribution for incidence in the studied area (Table 1). Mean mortality in the area was 16.7 in 2002 and 18.9 in 2003,

Year/descriptor	Average $\pm$ (SE)	Variance to-mean ratio ¹	Range of values (percentiles)			Correlation with distance from drainages	
			25%	50%	75%	<i>r</i>	p
2002							
<i>I</i> (%)	68.3 (2.5)	0.16	50.0	80.0	100	-0.28 ²	≤ 0.001
<i>S</i>	3.6 (0.2)	1.8	1.7	3.5	5.5	-0.57 ³	≤ 0.0001
DI	2.9 (0.2)	1.9	1.0	2.4	4.2	-0.58 ³	≤ 0.0001
Mortality (%)	16.7 (1.6)	25.7	0.0	8.3	25.4	-0.57 ²	≤ 0.0001
2003							
<i>I</i> (%)	76.9 (2.2)	0.11	58.6	83.3	100	-0.15 ²	≤ 0.05
<i>S</i>	4.1 (0.2)	1.6	2.0	4.0	6.0	-0.56 ³	≤ 0.0001
DI	3.4 (0.2)	1.7	1.5	2.8	4.8	-0.57 ³	≤ 0.0001
Mortality (%)	18.9 (1.7)	24.9	0.0	10.8	30.6	-0.61 ²	≤ 0.0001

Incidence and tree mortality did not pass the KS test for normality and were analysed with non-parametric statistics.

¹Variation-to-mean ratio = s^2/x , where s^2 = sample variance and x = sample mean.

²Spearman r .

³Pearson r .

DI, disease index; KS, Kolmogorov-Smirnov test; SE, standard error.

with an increase of 2.2 ($p > 0.05$) (Table 1). Median values were 8.3% and 10.8% in 2002 and 2003, respectively. VM values >1 indicated aggregated patterns of distribution of mortality. Mean S was 3.6 and 4.1 in 2002 and 2003, respectively (unpaired t -test $p > 0.05$). VM values for severity were also >1 indicative of aggregated patterns of distribution. The product incidence $\times$ severity (DI) also displayed an aggregated pattern of distribution for both 2002 and 2003. Values were 2.9 and 3.4 in the 2 years respectively (unpaired t -test $p > 0.05$).

A negative correlation was found in 2002 and 2003 between each of the four disease descriptors and their distance from the closest natural source of surface water drainage (Table 1) suggesting the presence of a disease gradient. However, incidence was weakly correlated to distance from drainages channels in both 2002 and 2003. Furthermore no differences were found between incidence values at distance classes of 10 m from natural drainage channels (Kruskal–Wallis; $p > 0.05$), while significant effects of proximity on S (ANOVA, $F = 16.7$, $p \leq 0.0001$), DI (ANOVA, $F = 14.5$, $p \leq 0.0001$) and tree mortality (Kruskal–Wallis, $p \leq 0.0001$) were evident within 10 m of the natural drainages channels (Fig. 2). Disease gradients from drainage were more accurately analysed for the S and DI datasets, that satisfied the condition of normal distribution and uniformity of variance. Kiyosawa and Shiyomi's model was unconstrained for A and B parameters. The best fit curves for severity and DI datasets for 2003 are shown in Fig. 3. Coefficients of determination (R^2) were 0.34 and 0.32 for severity and DI, respectively, indicating that some of the variability was not explained by distance from drainage channels. The 95% confidence interval was narrow for both curves, however (Table 2). Half-life of the curves, representing distance from drainage at which the value of the descriptor decreased by at least 50%, corresponded to 21.6 and 18.4 m for S and DI respectively (Table 2). Tests for non-linear regression indicated a non-significant deviation from the model for both S and DI ($p > 0.05$).

3.1 Sample variogram

Ordinary Kriging was used for S and DI data. IK was used for I and tree mortality as the datasets were not normally distributed. In order to conduct a spatial analysis of I and tree mortality datasets, both were considered as binary variables and expressed as presence (=1), absence (=0).

Spatial dependence (autocorrelation) was observed for all the disease descriptors and it was possible to describe the semivariograms using spherical, exponential and Gaussian models (data not shown).

The exponential model:

$$\gamma(h; \theta) = \theta_s [1 - \exp(-3\|h\|/\theta_r)]$$

where h is distance, $\theta_s \geq 0$ is the partial sill parameter and $\theta_r \geq 0$ is the range parameter, provided the best fit for semivariograms describing disease variables, based on R^2 , RSS values and relative nugget. This model shows an exponential decrease in autocorrelation with increasing distance (ISAACS and SRIVASTAVA 1989; JOHNSTON et al. 2001). Semivariograms of I , S , DI and tree mortality for the years 2002 and 2003 are shown in Fig. 4. Variogram interpolation and validation parameters are shown in Table 3. The semivariogram for the DI data showed the best values of interpolation and validation parameters in both 2002 and 2003. Interpolation and validation parameter values, however, indicated that S models also offered a good fit and a satisfactory prediction. Semivariograms of tree mortality gave the lowest R^2 values (0.81 and 0.87 in 2002 and 2003 respectively) compared with the other semivariograms; mean predictor error (MPE) and RMSSE values also showed lower accuracy in prediction, with a tendency to underestimate mortality. The incidence model produced a high RMSSE value indicating unsatisfactory accuracy in prediction.

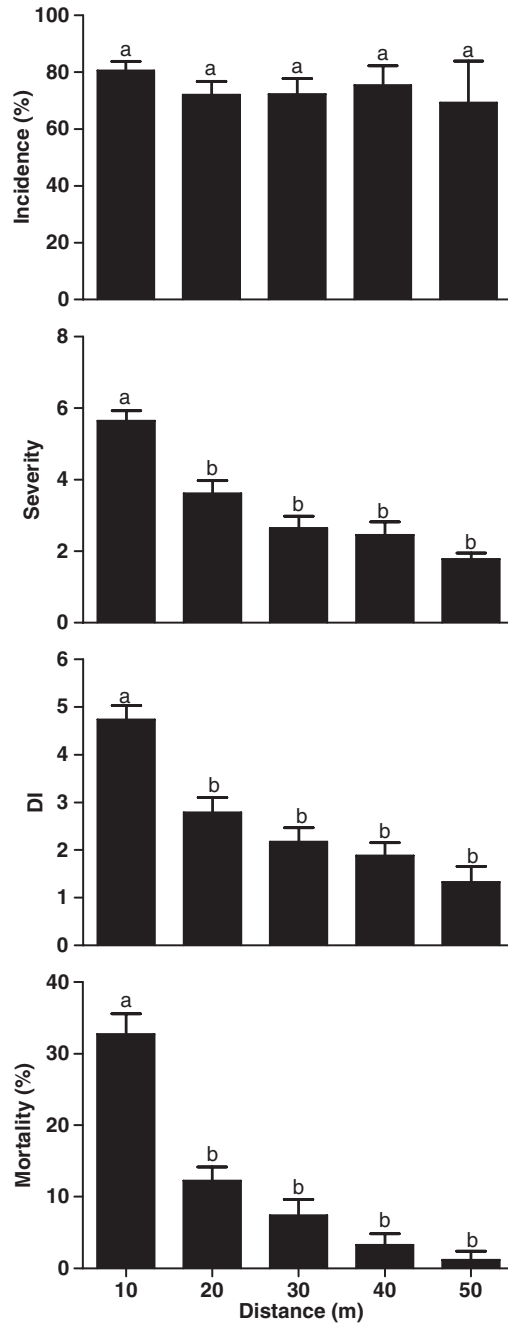


Fig. 2. Values of disease descriptors (incidence, severity, DI and tree mortality) at distance classes of 10 m from natural drainages for the year 2003. Different letters indicate significant differences at the Tukey's Multiple Comparison Test (severity and DI) and Dunns post-test (non-parametric) (incidence and tree mortality); vertical bar represent SD.

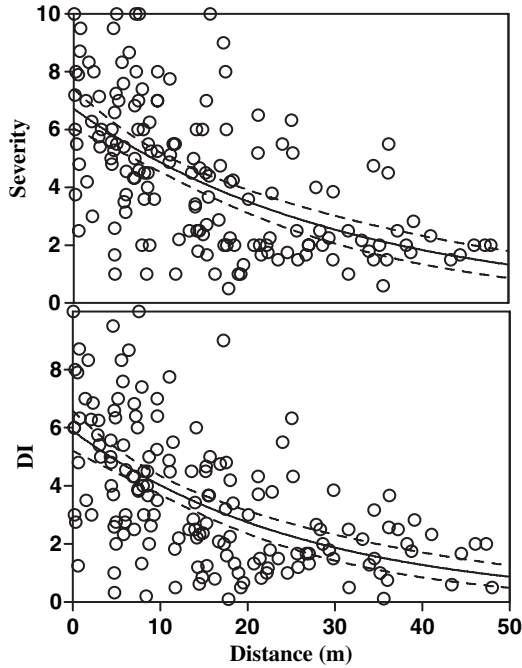


Fig. 3. Plot of severity and DI (incidence $\times$ severity) on distance from natural drainages. Solid curves represent the disease gradient described by the Kiyosawa and Shiyomi's model. Dashed lines represent the 95% confidence interval.

Table 2. Results of the Kiyosawa and Shiyomi's model regression of severity (S), and severity $\times$ incidence (DI), on distance from natural drainages (m) in 2003.

Descriptor	$A \pm (SE)^1$	$B \pm (SE)^1$	Half-life (m)	R^2	Deviation from the model	p
S	6.7 (0.3)	0.03 (0.004)	21.4	0.34	Not significant	>0.05
DI	5.9 (0.3)	0.04 (0.005)	18.2	0.32	Not significant	>0.05

¹ $Y = AX^{-B}$ where A represents Y when $X = 1$, B is dimensionless and X is the distance from the source.

Furthermore, the low values of relative nugget semivariograms from S , DI and tree mortality suggested that approximately 90% of the total variability resulted from the spatial component. Range values of semivariograms of S , DI and tree mortality were contained within the study area (Table 3). Severity and DI semivariograms in 2002 and 2003 had similar range values of between 55.5 (DI in 2002) and 65.1 m (S in 2002). Range values for mortality were 25 and 30 m in 2002 and 2003 respectively. Finally range values of I were largely beyond the dimensions of the study area (Table 3). The kriged maps of DI (incidence $\times$ severity) are shown in Fig. 5. High DI values were evident in close proximity to the natural surface water drainage. A detectable increase in disease was evident between the 2002 and 2003 (Fig. 6).

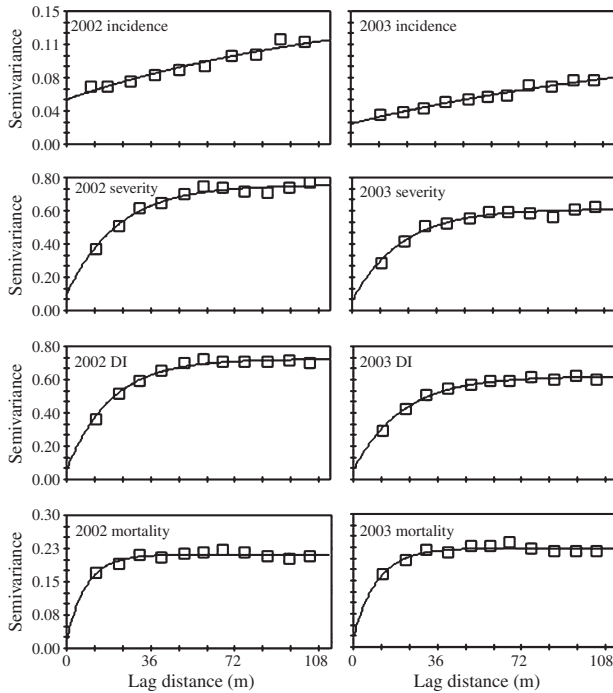


Fig. 4. Sampled and fitted semivariograms as function of lag distance on 2002 and 2003 data for incidence, severity, DI (incidence $\times$ severity) and tree mortality.

4 Discussion

This is the first report describing the spatial distribution of *P. cambivora* causing Ink disease of chestnut across a variable landscape. Geographic Informative Systems tools greatly facilitated these studies providing multiple information and data from the analysis of thematic layers, in this case landform and disease variables. Remote sensing and geostatistics were previously applied successfully in Portugal by MARTINS et al. (2007) to describe Ink disease caused by *P. cinnamomi* in chestnut plantations. These authors demonstrated spatial correlations of Ink DI in chestnut plantations in areas characterized by intense tillage and other related human activities. In the present study, Ink disease distribution and gradient were studied in a forest over a heterogeneous landscape in a completely different situation than a plantation. The analysis of disease descriptors provided useful information on the epidemiology of Ink disease in naturalized chestnut areas. The uniform distribution of incidence suggests the presence of efficient mechanisms of inoculum dispersal over the area and/or disease transmission between trees. Furthermore as incidence reaches high proportion, disease variation is mainly due to variation in severity (and mortality). Severity and tree mortality were accurately predicted by the spatial models and their values dependant on landscape heterogeneity. Obviously incidence and severity are disease descriptors measuring different phases of the disease epidemics. Environmental and site factors promoting an increase of incidence (movement of inoculum, root to root contact, etc.) could not correspond to those promoting an increase of severity (saturation events and inoculum build-up). Then the product of incidence-severity (DI) represents a reliable variable for dampening the effect of different site situations (GROTH et al. 1999; CARDOSO et al. 2004).

Table 3. Parameters of the exponential model sample variograms in 2002 and 2003 for incidence (I) severity (S), tree mortality and disease index (DI).

Year/variable	Method	Interpolation set						Validation set	
		Nugget	Sill	Practical range ¹ (m)	Relative nugget	RSS	R ²	MPE	RMSSE
2002									
I	IK	0.047	0.14	273	0.32	0.0001	0.97	0.0028	1.124
S	OK	0.094	0.76	65.1	0.12	0.004	0.97	0.0007	1.025
DI	OK	0.05	0.72	55.5	0.07	0.002	0.98	0.0007	0.995
Mortality (%)	IK	0.016	0.21	25	0.08	0.0004	0.81	0.0022	1.037
2003									
I	IK	0.0023	0.12	468	0.19	0.00005	0.97	0.004	2.072
S	OK	0.057	0.61	63.0	0.11	0.003	0.97	0.0013	0.965
DI	OK	0.054	0.62	62.1	0.09	0.001	0.99	0.0009	0.985
Mortality (%)	IK	0.0194	0.22	30	0.09	0.0005	0.87	0.0037	1.035

¹In exponential model, the range equals the distance at which the variogram value is at 95% of the sill.
MPE, mean predictor error; RMSSE, root-mean-square standardized prediction error; IK, Indicator Kriging; OK, Ordinary Kriging; RSS, residual sum of squares.

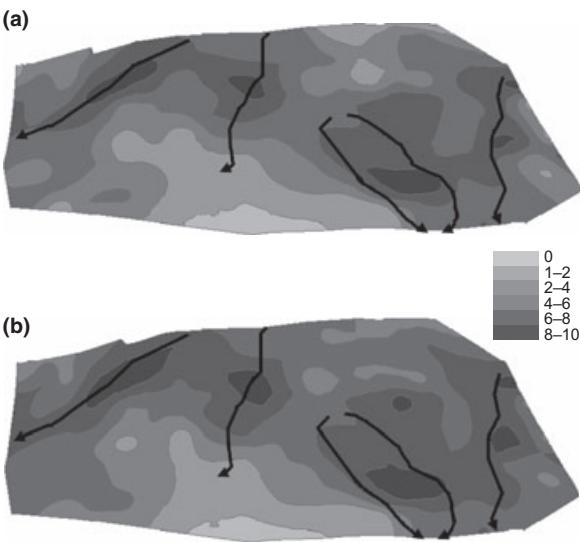


Fig. 5. Kriged map of Ink disease DI (incidence × severity) across the area in 2002 (a) and 2003 (b). Arrows indicate the patterns of drainage lines.

According to various reports the potential for *P. cambivora*, or *P. cinnamomi* to spread over an area and to cause Ink disease depends on risk factors, such as favourable temperature and precipitation (VANNINI and VETTRAINO 2001), edaphic features (MARTINS et al. 1999), and variation in the susceptibility of host populations (ROBIN et al. 2006). This study showed that the potential for the spread of *P. cambivora* in a chestnut forest also



Fig. 6. Patterns of increase of Ink disease DI (incidence $\times$ severity) on the investigated area between 2002 and 2003.

depends on the landform features and heterogeneity. Other studies carried out in forest and agriculture system have shown that the spread of some soil-borne *Phytophthora* spp. through heterogeneous landscapes follows preferential patterns (LARKIN et al. 1995; JULES et al. 2002; JUNG and BLASCHKE 2004).

Generally, the aggregated (non-uniform) distribution patterns of Ink disease in the area studied in this work could be explained by the high density of inoculum challenging the trees in close proximity to the natural surface water drainage points as suggested for other *Phytophthora* spp. diseases (HANSEN et al. 2000; JULES et al. 2002; JUNG and BLASCHKE 2004). The effect of proximity was particularly significant within 10 m of a water course. Beyond this distance severity and mortality (and DI) strongly decreased. Similarly, HANSEN et al. (2000) reported that mortality of Port Orford Cedar caused by *P. lateralis* infection was highest within 3 m of streams and drastically decreased at a distance over 10–12 m. The network of creeks or natural drainages channels is a potential dispersal route for *Phytophthora* spp. (including *P. cambivora*) inoculum in natural ecosystems (WESTE et al. 1976; WESTE and MARKS 1985; HANSEN et al. 2000; JULES et al. 2002; HWANG et al. 2007). Furthermore, the higher probability of flooding or soil saturation events in close proximity to drainage areas increases the probability of host infection. Based on these considerations, the areas in close proximity to drainage channels corresponded with the locations where the earliest infections occurred and where the disease was expressed at the highest incidence. These earliest infection foci probably contributed to the patterns of spatial distribution of Ink disease outside the drainage lines. In fact Ink disease descriptors in the investigated area were variable and largely spatially correlated. The expected intensity of Ink disease at a given site, therefore, was highly dependent on the intensity of Ink disease present in neighbouring sites. Spatial patterns are common features of *Phytophthora* epidemics and are strictly dependant on inoculum dispersal mechanisms and architecture of the host crop (RISTAINO and GUMPERTZ 2000). Patterns of disease spread between 2002 and 2003 showed an increase of disease level centrifugally from the initial infection foci in proximity to drainage lines. Such a pattern cannot be explained exclusively by gravitational movement of inoculum with water. Although the natural drainages net can be considered an important mechanism for passive inoculum dispersal, additional factors may be involved. As reported for other soil-borne *Phytophthora* species human and/or animal activities, the movement of soil particles (ANSELMi et al. 1999; HANSEN et al. 2000), root-to-root contact (WESTE et al. 1976) and negative geotaxis of zoospores (ERWIN and RIBEIRO 1996) could account for dispersal of *Phytophthora* spp. out of the drainage areas. The present study was conducted within chestnut coppices with a high host abundance in which root-to-root contact and root growth into inoculum, and/or movement of inoculum to roots, could represent an important mechanism of *P. cambivora* dispersal explaining the uniform presence of the disease (high incidence). However, moving out of the natural drainage lines, the probability of saturation events and inoculum build-up decreases as well

as the risk of massive infection of coarse root and collar (low severity and low tree mortality). According to the above consideration, in the area studied in the present work Ink disease was distinguished by (i) a rapid and severe host decline in proximity to drainage lines due to abundance of fine roots and multicyclic inoculum build-up that facilitated massive infection of coarse roots and the collar; (ii) slow host decline mainly due to infection localised in the fine roots on sites characterized by different conditions, particularly few or no soil saturation events (VETTRAINO et al. 2005). The latter situation has been observed in oak and beech decline associated with *Phytophthora* spp. (JUNG et al. 2000, 2005; VETTRAINO et al. 2002; BALCI and HALMSCHLAGER 2003).

Assuming the homogeneous distribution of chestnut forest in a variable landscape, the distribution of Ink disease patches is expected to depend strictly on the local landform characteristics. This assumption is supported by VANNINI et al. (2005) who assessed the diffusion of Ink disease over an area of 24 square kilometres area in Central Italy. The Ink disease map, elaborated from remote sensing data, clearly displayed the presence of defined and separated disease foci covering about 7% of the total chestnut area. Further analyses showed that the presence of Ink disease was significantly correlated with road density and landscape heterogeneity (NOCE 2005). Similar results were previously reported by JULES et al. (2002) with the *P. lateralis*-Port Orford Cedar interaction in Oregon. These authors highlighted the high incidence of root and collar root of Port Orford Cedar by *P. lateralis* in areas downhill from points where roads crossed creeks. Roads are also considered the main pathways for movement of *P. cinnamomi* in Australian forest ecosystems (WESTE and MARKS 1985; SHEARER and TIPPETT 1989) and, generally speaking, are important corridors for the spatial spread of invasive species (HASTING et al. 2005). While roads could be considered as potential pathway for the long distance transport of inoculum across areas, creeks and natural drainage may represent the main localized pathway for spread and establishment of soil-borne *Phytophthora* spp. within natural or naturalized forest areas (JULES et al. 2002). Depending on host abundance and density *Phytophthora* spp. could then disseminate from the drainage lines utilizing alternative mechanisms of inoculum dispersal.

Understanding the patterns of spread of an invasive and lethal species, such as *P. cambivora* in a chestnut ecosystem, is of relevance to ranking of areas for hazard of Ink disease (SHEARER and TIPPETT 1989) and to identify possible control measures. On the basis of current knowledge it can be assumed that high hazard chestnut areas are characterized by annual rainfall higher than 1000 mm and limited summer drought (VETTRAINO et al. 2005), poorly aerated soils (MARTINS et al. 1999), high road density (ANSELMi et al. 1999), and abundant creeks and drainages channels. However, the site factors may differently affect the epidemiology of Ink disease based on the type of chestnut cultivation. In productive plantations human activities seems to be the main factor of disease spread. In fact a significant association has been evidenced between disease spread patterns and frequency of tillage and unbalanced fertilization (PORTELA et al. 1999; MARTINS et al. 2007). In naturalized chestnut areas the net of natural drainages, the contact between root systems and the heterogeneity of the landscape seem to represent the main factors driving the spread of the disease. In this respect, the combination of hazard mapping activities with risk maps based on the presence of the disease (VANNINI et al. 2005) represents a potential tool to rank areas for the application of control and management procedures.

Acknowledgements

This work was supported by grants from the Ministry of University and Scientific Research and Latium Region within the frame of PRAL and Obiettivo 5b.

References

- ANSELMINI, N.; VETTRAINO, A. M.; FRANCO, S.; CHIAROT, E.; VANNINI, A., 1999: Recrudescenze del "Mal dell'Inchiostro" del castagno in Italia: nuove acquisizioni e suggerimenti di lotta. *Linea Ecologica* **XXXI**, 53–58.
- ATTORRE, F.; ALFO, M.; DE SANCTIS, M.; FRANCESCONI, F.; BRUNO, F., 2007: Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. *Int. J. Climatol.* **27**, 1825–1843.
- BALCI, Y.; HALMSCHLAGER, E., 2003: Incidence of *Phytophthora* species in oak forests in Austria and their possible involvement in oak decline. *For. Pathol.* **33**, 157–174.
- CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V., 1990: *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. Toronto: John Wiley & Sons.
- CARDOSO, J. E.; SANTOS, A. A.; ROSSETTI, A. G.; VIDAL, J. C., 2004: Relationship between incidence and severity of cashew gummosis in semiarid north-eastern Brazil. *Plant Pathol.* **53**, 363–367.
- ERWIN, D. C.; RIBEIRO, O. K., 1996: *Phytophthora* Diseases Worldwide. St. Paul, MN: The American Phytopathological Society.
- GROTH, J. V.; OZMON, E. A.; BUSH, R. H., 1999: Repeatability and relationship of incidence and severity measures of scab of wheat caused by *Fusarium graminearum* in inoculated nurseries. *Plant Dis.* **83**, 1033–1038.
- HANSEN, E. M.; GOHEEN, D. J.; JULES, E. S.; ULLIAN, B., 2000: Managing Port-Orford-Cedar and the introduced pathogen *Phytophthora lateralis*. *Plant Dis.* **84**, 4–10.
- HASTING, A.; CUDDINGTON, K.; DAVIES, K. F.; DUGAW, C. J.; ELMENDORF, S.; FREESTONE, A.; HARRISON, S.; HOLLAND, M.; LAMBRIONS, J.; MALVADKAR, U.; MELBOURNE, B. A.; MOORE, K.; TAYLOR, C.; THOMSON, D., 2005: The spatial spread of invasions: new developments in theory and evidence. *Ecol. Lett.* **8**, 91–101.
- HWANG, J.; OAK, S. W.; JEFFERS, S. N., 2007/2008: Detecting *Phytophthora ramorum* and other species of *Phytophthora* in streams in natural ecosystems using baiting and filtration methods. In: *Proceedings of the sudden oak death third science symposium*. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-214 Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, pp. 55–58.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M., 1989: *Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- JOHNSTON, K.; VER HOEF, J. M.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N., 2001: *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. New York: Environmental Systems Research Institute.
- JULES, E. S.; KAUFFMAN, M. J.; RITTS, D. R.; CARROL, A. L., 2002: Spread of an invasive pathogen over a variable landscape: a nonnative root rot on Port Orford Cedar. *Ecology* **83**, 3167–3181.
- JUNG, T.; BLASCHKE, M., 2004: *Phytophthora* root and collar rot of alders in Bavaria: distribution, modes of spread and possible management strategies. *Plant Pathol.* **53**, 197–208.
- JUNG, T.; BLASCHKE, H.; OSSWALD, W., 2000: Involvement of *Phytophthora* species in Central European oak decline and the effect of site factors on the disease. *Plant Pathol.* **49**, 706–718.
- JUNG, T.; HUDLER, G. W.; JENSEN-TRACY, S. L.; GRIFFITHS, H. M.; FLEISCHMANN, F.; OSSWALD, W., 2005: Involvement of *Phytophthora* spp. in the decline of European beech in Europe and USA. *Mycologist* **19**, 159–166.
- KIYOSAWA, S.; SHIYOMI, M., 1972: A theoretical evaluation of the effect of mixing resistant variety with susceptible variety for controlling plant diseases. *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn* **38**, 41–51.
- LARKIN, R. P.; GUMPERTZ, M. L.; RISTAINO, J. B., 1995: Geostatistical analysis of *Phytophthora* epidemic development in commercial bell pepper fields. *Phytopathology* **85**, 191–203.
- MARTINS, L. M.; OLIVEIRA, M. T.; ABRE, C. G., 1999: Soils and climatic characteristic of chestnut stands that differ in the presence of the Ink disease. *Acta Hortic.* **494**, 447–449.
- MARTINS, L.; CASTRO, J.; MACEDO, W.; MARQUES, C.; ABREU, C., 2007: Assessment of the spread of chestnut Ink disease using remote sensing and geostatistical methods. *Eur. J. Plant Pathol.* **119**, 159–164.
- NOCE, S., 2005: Nuove tecniche di monitoraggio del Mal dell'Inchiostro del castagno e studi sulla dinamica dell'inoculo dell'agente causale *Phytophthora cambivora*. MSc Thesis, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italy.
- PORTELA, E.; ARANHA, J.; MARTINS, A.; PIRES, A. L., 1999: Soil factors, farmer's practices and chestnut Ink disease: some interactions. *Acta Hortic. (ISHS)* **494**, 433–442.
- RISTAINO, J. B.; GUMPERTZ, M. C., 2000: New frontiers in the study of dispersal and spatial analysis of epidemics caused by species in the genus *Phytophthora*. *Annu. Rev. Phytopathol.* **38**, 541–576.
- ROBIN, C.; MOREL, O.; VETTRAINO, A. M.; VANNINI, A.; PERLEROU, C.; DIAMANDIS, S., 2006: Genetic variation in susceptibility to *Phytophthora cambivora* in European chestnut (*Castanea sativa*). *For. Ecol. Manage.* **226**, 199–207.

- SHEARER, B. L.; TIPPETT, J. T., 1989: Jarrah Dieback: the dynamics and management of *Phytophthora cinnamomi* in the jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest of south-western Australia. Western Australia: Department of Conservation and Land Management, Como, Research Bulletin no. 3.
- VANNINI, A.; VETTRAINO, A. M., 2001: Ink disease of chestnut: impact on European chestnut. For. Snow Landsc. Res. **76**, 345–350.
- VANNINI, A.; VETTRAINO, A. M., 2004: Aspetti di epidemiologia e difesa relativi alle principali avversità patologiche del castagno. Inf. Fitopatol. **54**, 20–24.
- VANNINI, A.; VETTRAINO, A. M.; FABI, A.; MONTAGHI, A.; VALENTINI, R.; BELLÌ, C., 2005: Monitoring Ink disease of chestnut with the airborne multispectral system A.S.P.I.S. Acta Hort. **693**, 529–533.
- VETTRAINO, A. M.; NATILI, G.; ANSELM, N.; VANNINI, A., 2001: Recovery and pathogenicity of *Phytophthora* species associated with a resurgence of Ink disease on *Castanea sativa* in Italy. Plant Pathol. **50**, 90–96.
- VETTRAINO, A. M.; BARZANTI, B. P.; BIANCO, M. C.; RAGAZZI, A.; CAPRETTI, P.; PAOLETTO, E.; LUISI, N.; ANSELM, N.; VANNINI, A., 2002: Occurrence of *Phytophthora* species in oak stand in Italy and their association with declining oak trees. For. Pathol. **32**, 19–28.
- VETTRAINO, A. M.; BELISARIO, A.; MACCARONI, M.; VANNINI, A., 2003: Evaluation of root damage to English walnut caused by 5 *Phytophthora* species. Plant Pathol. **52**, 491–495.
- VETTRAINO, A. M.; MOREL, O.; PERLEROU, C.; ROBIN, C.; DIAMANDIS, S.; VANNINI, A., 2005: Occurrence and distribution of *Phytophthora* species in European chestnut stands, and their association with Ink Disease and crown decline. Eur. J. Plant Pathol. **111**, 169–180.
- WESTE, G.; MARKS, G. C., 1985: The Biology of *Phytophthora cinnamomi* in Australasian Forests. Annu. Rev. Phytopathol. **25**, 207–229.
- WESTE, G.; RUPPIN, P.; VITHANAGE, K., 1976: *Phytophthora cinnamomi* in the Brisbane ranges: patterns of disease extension. Aust. J. Bot. **24**, 201–208.

Integrated Control Protocol to Mitigate and Eradicate Ink Disease in Chestnut Orchards

A. Vannini^{1, a}, S. Franceschini¹, G. Vuono¹, G. Natili¹, R. Paganini² and A.M. Vettraino¹

¹Laboratory of Mycology and Forest Pathology, Department of Plant Protection, University of Tuscia, Via S. Camillo de Lellis, Viterbo, Italy

²Studio Ambiente e Sicurezza, Via dei Tirreni, 4, Sutri, Viterbo, Italy

Keywords: chestnut, ink disease, *Phytophthora cambivora*, potassium phosphite, fungicides

Abstract

Ink disease caused by *Phytophthora* spp. represents a serious emergence in chestnut groves in Italy. On the basis of acquired knowledges, an integrated control protocol has been elaborated and applied in affected orchards in Central Italy. It implies, the use of potassium phosphite as inhibitor of *Phytophthora* spp. and inducer of acquired resistance in chestnut; the use of classical copper compounds or systemic fungicides to stop the inoculum spread; the hydrology restoration and watershed management to avoid inoculum spread via flowing water; public awareness through appropriate behaviour in entering and exit infected areas. Evaluation of efficacy of the integrated protocol has been carried out by monitoring inoculum consistency and patterns of disease spread.

INTRODUCTION

Ink disease of sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) represents the limiting factor for chestnut cultivation in several European regions (Vannini and Vettraino, 2001). It causes root and collar rot of trees and seedlings in nurseries, plantation and forests. Disease symptoms include crown decline, leaf chlorosis and the presence at the collar of flame shaped necrosis of bark tissues (Fig. 1). The disease is caused by the soil-borne pathogens *Phytophthora cambivora* (Buisman, Petri) and *Phytophthora cinnamomi* Rands (Vettraino et al., 2005). Under favourable conditions, ink disease rapidly spreads by zoospores through uncontrolled flow of infected water and transport of contaminated soil particles by humans and animals. Roads represent one of the main pathway of the pathogen spread. The control of ink disease is based on both preventive and curative measures aiming to decrease inoculum production and spread, to manage superficial water flow and the rural roads as well as to increase resistance and protection of threatened trees. These measures have been combined in an Integrated Control Protocol (ICP). We report the preliminary results of the application of ICP at small and large scale in chestnut groves in Central Italy.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in 5 areas in the Latium Region and 1 area in the Marche Region in Central Italy. The description of each area is reported in Table 1. The position of chestnut trees in the experimental areas, was acquired with a submetric precision, GPS GS20 (Leica Geosystems, Inc. Heerbrugg, Switzerland) and imported on a national orthophoto 1:10.000 (Italia 2000) with the software Arcview ver. 3.2 of the ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, USA). Each tree in the experimental areas was tagged and coded.

Disease severity and incidence was evaluated on the base of presence of symptoms typically associated with ink disease. A 5 classes visual scale was developed: class 0=healthy trees; class 1=trees with yellowing of the crown; class 2=trees with yellowing and defoliation up to 30% of the crown; class 3=trees with yellowing and defoliation between 30% and 80% presence of collar and/or main root lesions; class 4 =

^avannini@unitus.it

dead tree.

ICP was applied in the areas E and F in 2005 and in the areas A, B, C and D in 2008.

ICP consisted in the following measures: 1) Restriction of humans and machines transit through infected groves and along rural roads crossing or bordering the groves; 2) Disinfection of tires and shoes in exit of infected areas; 3) Management of superficial water flows and rural roads by channelling water in a drainage net; 4) Treatments of diseased plants with Metalaxyl (Ridomil Gold® SL, Syngenta, Basel, Switzerland) (classes 1, 2 and 3) or copper sulphate (class 4) in trenches dug around trees (Fig. 2); 5) Treatments of drainage net with copper sulphate; 6) Flow-injection with potassium phosphite (Kalex®, AlbaMilagro International, Parabiago, Italy) of asymptomatic trees and diseased trees in class 1, 2 and 3 (Fig. 3). Treatments were repeated twice a year, in spring and fall. Untreated areas were delimited in each chestnut grove as control.

RESULTS AND DISCUSSION

Preliminary results reported for areas E and F include a general improvement of the visual healthy status of the trees obtained in all the areas treated, and a sensible decrease of tree mortality (Fig. 4). The effect of the ICP in the other sites will be evaluated during the next 2 years. Similar practices or protocols have showed to be efficient in controlling *Phytophthora* diseases on hosts as like *Eucalyptus marginata* (Donn, Smith) and *Persea americana* Mill. (Coffey, 1987; Suddaby and Edward, 2008). However the application of ICP protocol on Italian chestnut orchards, characterized by a high level of fragmentation of properties, presents some difficulties related especially to people awareness (point 1 and 2 of ICP are very difficult to be achieved) and costs of some activities which are particularly required in remote areas (construction of drainage net, roads maintenance).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by the Regional Agency for rural development of the Latium Region (ARSIAL); the Gran Sasso-Laga National Park; the Rieti Province; the Varrone Foundation. A special thank to local chestnut growers: Mr Felli, Mr. Alicicco, Mr. Della Valle, Ms. Ercoli and Mr Bruzziches.

Literature Cited

- Coffey, M.D. 1987. *Phytophthora* root rot of avocado: an integrated approach to control in California. Plant Disease 71:1046-1052.
- Suddaby, T. and Edward, L. 2008. Best practice management guidelines for *Phytophthora cinnamomi* within the Sydney metropolitan catchment management authority area. Sydney Metropolitan Catchment Management Authority p.33.
- Vannini, A. and Vettraino, A.M. 2001. Ink disease in chestnuts: impact on the European chestnut. For. Snow Landsc. Res. 76:345-350.
- Vettraino, A.M., Morel, O., Perlerou, C., Robin, C., Diamandis, S. and Vannini, A. 2005. Occurrence and distribution of *Phytophthora* species in European chestnut stands, and their association with Ink Disease and crown decline. European J. Plant Pathol. 111:169-180.

Tables

Table 1. Characteristics of study areas.

Study area	Localization	Extension (ha)	Elevation (m a.s.l.)	Slope (%)	Predominant aspect	Number trees	Soil texture
A	Carbognano Latium region	5	410	9.53	S-E	217	Clay-sandy
B	Leofreni Latium region	0.71	907	22	S	85	Sand-clay
C	Pescorocchiano Latium region	0.63	772	33	S-E	67	Sand-clay
D	Arola Marche region	7.5	980	44.64	S-E	647	Sandy
E	Caprarola Latium region	0.7	400	12	S	80	Clay-sandy
F	Caprarola Lazio region	1.2	435	10	S-E	120	Clay-sandy

Figures



Fig. 1. Flame shaped necrosis of bark tissues caused by *Phytophthora cambivora* on a chestnut tree.



Fig. 2. Trench dug around a diseased plant.



Fig. 3. Stem injection with potassium phosphate.

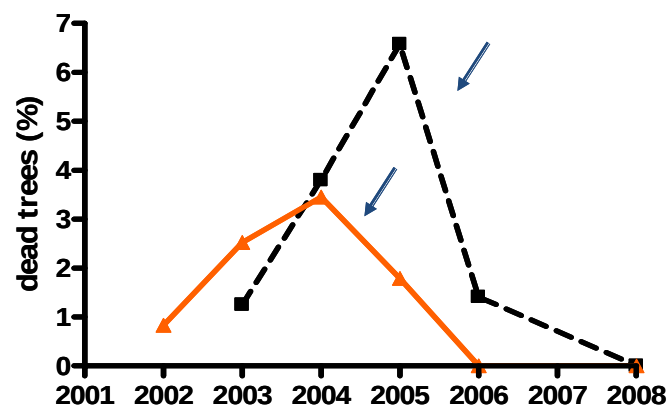


Fig. 4. Percentage of dead trees affected by ink disease during the period 2002-2008 in the area E (black line) and F (orange line). Arrows indicate the year of ICP application.

Italus Hortus

Rivista scientifica di
orticoltura, floricoltura e frutticoltura

Fondata nel 1993

Riassunti degli Atti del

IV Convegno Nazionale - CASTAGNO 2005

Montella (AV), 20-22 ottobre 2005



Pubblicata dalla Società Orticola Italiana (SOI)

Nuove tecnologie di telerilevamento per il monitoraggio fitopatologico: l'applicazione al mal dell'inchiostro del castagno

New technologies of remote sensing in phytosanitary monitoring: application to Ink disease of chestnut

Vannini A.^{1*}, Vettrai A.M.¹, Belli C.², Montagni A.¹ e Natili G.¹

¹Dipartimento di Protezione delle Piante, Università della Tuscia, Viterbo

²Terrasystem s.r.l.

Abstract. The present work introduces the utilisation of multi-spectral high resolution images to distinguish diseased plants and foci on the base of crown reflectance signature and to produce a map of the disease over large surface areas. Images were acquired with of digital sensor mounted on an aircraft. The study was conducted over a total area of about 2500 hectares in the Province of Rieti (Italy). The delivered product was a distribution map of Ink disease of chestnut that was validated with random ground activities. Individual infected plants could be distinguished. After georeferentiation and orthoprojection, the images were introduced in a GIS system and overlap to other informative layers. A statistical association was found between disease spread and presence of roads. A second approach regarded the application of geostatistic analysis (ordinary kriging) to study and evaluate the spatial continuity of Ink disease distribution starting from discrete sets of data evaluated at different locations. This study was carried out in a coppice in the Province of Viterbo (Italy). A grid of 10 x 10 meter cell was delimited over an area of about 2 hectares. The disease incidence was calculated in each cell during 1996 and 1997. The data points for each year have been submitted to spatial analysis with the Geostatistical Analysis module of *ArcGis* ver. 8.3 using ordinary kriging. Two disease map have been elaborated for 1996 and 1997. An interesting association have been highlighted between incidence of the disease and proximity to surface water flow lines.

Il monitoraggio fitopatologico rappresenta uno degli strumenti più efficaci per garantire il presidio del territorio, fornire informazioni aggiornate e aggiornabili sull'insorgere di nuovi problemi fitopatologici o sull'andamento di quelli già esistenti, per studiare i modelli di sviluppo di una malattia, infine per pianificare le strategie di intervento su scala comprensoriale.

Le attività di monitoraggio tramite telerilevamento presentano numerosi vantaggi rispetto ai metodi tradi-

zionali di rilievo a terra, quali la possibilità di copertura integrale del territorio anche di aree difficilmente raggiungibili via terra, tempi estremamente ridotti di rilievo anche su vaste superfici, tempi di elaborazione del dato sufficientemente brevi. Certamente questi metodi necessitano anche nelle applicazioni routinarie di una attività di validazione del dato qualitativo tramite rilievo a terra, ma su superfici identificabili a posteriori in base al dato telerilevato. Altra peculiarità delle immagini telerilevate è la possibilità di restituzione e ortoproiezione su cartografie già esistenti e quindi la loro integrazione e gestione nei Sistemi Informativi Territoriali (SIT). Il SIT è un insieme di tecnologie di informazione, dati e procedure utilizzabili per raccogliere, manipolare, analizzare e produrre mappe e altri tipi di rappresentazioni in grado di fornire informazioni descrittive e numeriche di elementi presenti sul territorio (Cowen, 1988; Nelson *et al.*, 1999). Ogni strato informativo in un SIT ha una sua collocazione spaziale sul territorio (dato georeferenziato) e possiede specifici attributi compilati in apposite banche dati (*geodata-base*); i SIT integrano la capacità di effettuare operazioni sui data-base, come interrogazioni e analisi statistiche, con la visualizzazione e l'analisi geografica, caratteristici delle mappe.

Nel presente lavoro s'illustra l'applicazione di metodologie di telerilevamento tramite piattaforme aviotrasportate al fine di ottenere immagini digitali spettrali utilizzabili per lo sviluppo di mappe di diffusione del Mal dell'Inchiostro del castagno su vaste aree castanicole.

Da alcuni anni l'Università degli Studi della Tuscia in collaborazione con la società Terrasystem s.r.l. e altri Enti di ricerca pubblico e privata hanno sviluppato una linea di ricerca finalizzata alla progettazione e allo sviluppo di alcuni sensori digitali spettrali aviotrasportati come l'APSYS (*Advanced Spectroscopic Imaging System*) e il sistema DFR (*Duncan-Flir-Riegl*).

Entrambi i sistemi, in alternativa, sono alloggiati a bordo dell'aereo SKY ARROW 650 TC costruito

*vannini@unitus.it

dalle Iniziative Industriali Italiane. Estremamente maneggevole e flessibile nell'uso può decollare e atterrare da aeroporti, aviosuperfici e campi di volo con lunghezza della pista di appena 500 m. I sorvoli possono essere effettuati ad quota compresa tra i 300 e i 4.000 m s.l.m.

La possibilità di identificare eventi di disturbo sulla copertura vegetale si basa sulla valutazione della risposta spettrale delle chiome a seguito della sovrapposizione di immagini acquisite in 3 bande di colore, 550 (verde), 680 (rosso), 780 (infrarosso vicino) nm.

Le immagini, con risoluzione spaziale di 1 m e radiometrica di 16 bit, opportunamente ortoproiettate ed elaborate in falsi colori sono rese gestibili in ambiente GIS. Le piante malate appaiono con colori sfumati dal rosso al grigio e sono facilmente identificabili fino al singolo individuo. Un'attività di controllo a terra su alcune delle aree individuate come malate permette la validazione del dato telerilevato: La gestione delle immagini in ambiente SIT rende possibile inoltre di mettere in relazione la presenza della malattia (o del danno) con altre variabili territoriali quali l'uso del suolo, l'orografia del territorio, il substrato geologico e, se disponibile, pedologico, l'altitudine, l'esposizione, ecc.

L'uso di questa metodologia per il monitoraggio del Mal dell'Inchiostro del castagno è stata applicata nel comprensorio del Cicolano in Provincia di Rieti su una superficie totale di circa 24 chilometri quadrati comprendente i comuni di Marcellino e Pescocostanzo. Si tratta di un territorio prevalentemente montano non sempre ben servito da viabilità e quindi con aree castanicole difficilmente presidabili a terra. Le attività di telerilevamento e restituzione cartografica hanno permesso di elaborare una mappa tematica che individua la superficie a castagno e al suo interno la localizzazione dei focolai del Mal dell'Inchiostro. La validazione del dato con attività di controllo a terra ha mostrato un'affidabilità prossima al 100%. Nel caso di studio in esame è stato anche possibile trovare un'associazione statistica tra la presenza di strade e la diffusione della malattia. Su una superficie a castagno di circa 832 ettari il Mal dell'Inchiostro è diffuso su circa 58 ettari corrispondenti al 7% della superficie totale.

A conclusione di questa prima parte, si può asserire che il telerilevamento tramite piattaforma aerea trasportata utilizzando la tecnologia ASPIS e DFR ha grandi possibilità di essere esteso al monitoraggio di altre malattie sia in ambienti naturali che in piantagioni. Un notevole vantaggio è dato dalla possibilità di monitorare aree anche scarsamente servite dalla rete

viaria e quindi difficilmente raggiungibili con attività di monitoraggio a terra. Questa tecnica di monitoraggio permette di seguire l'evoluzione di fenomeni naturali, come lo sviluppo epidemico di una malattia, attraverso immagini perfettamente collocabili nello spazio e nel tempo.

E' indubbio che uno dei limiti del telerilevamento per monitoraggi fitopatologici è l'aspecificità del dato telerilevato: in definitiva si tratta della difficoltà di attribuire il danno ad una causa piuttosto che ad un'altra. A questo scopo la conoscenza dei modelli epidemiologici delle diverse malattie aiuta nell'interpretazione del dato. L'integrazione d'applicazioni di geostatistica integrate a sistemi SIT risulta di grande supporto negli studi epidemiologici. La geostatistica permette di descrivere la continuità spaziale che è caratteristica tipica di molti fenomeni naturali. Partendo da set di dati puntuali misurati, essa permette di attribuire un valore alla variabile considerata anche in punti non campionati permettendo una stima dell'errore (Isaaks e Srivastava, 1989). Le applicazioni geostatistiche in patologia vegetale hanno ricevuto un forte impulso negli ultimi anni nello studio della struttura genetica delle popolazioni dei patogeni e, più di frequente, nello studio epidemiologico (Nelson *et al.*, 1994, 1999; Lung-Escarmant e Guvon, 2004).

Le applicazioni geostatistiche integrate al SIT sono state utilizzate nel presente lavoro per creare mappe di diffusione del Mal dell'Inchiostro del castagno e valutare le relazioni tra la diffusione della malattia e le variabili territoriali. I dati puntuali di partenza per lo sviluppo di mappe spazializzate possono essere sia dati telerilevati che misurati a terra. Nel nostro caso si è partiti da un set di valori di indice di malattia rilevati in due anni successivi su una superficie a castagno di circa 2,5 ettari. Il prodotto ottenuto è una mappa che descrive ed illustra in modo continuo la diffusione e l'intensità della malattia sul territorio monitorato. La sovrapposizione dello strato informativo relativo alla malattia con altri strati informativi territoriali ha permesso di evidenziare anisotropie nella diffusione del mal dell'Inchiostro associate alla presenza di aree di compluvio ove prevalentemente si concentra il fenomeno. Inoltre il confronto tra mappe relative ad anni successivi permette di misurare la velocità e direzione di diffusione della malattia. E' evidente il contributo che tali metodologie offrono alla comprensione dei meccanismi di diffusione delle malattie sul territorio e quindi anche all'interpretazione dei dati provenienti da attività di monitoraggio tramite telerilevamento.

In conclusione le tecnologie oggi a disposizione per l'acquisizione dei dati territoriali e la loro manipo-

lazione, elaborazione ed integrazione, offrono un importante supporto alle attività di monitoraggio fitopatologico e alle attività di pianificazione volte alla protezione e difesa dei soprassuoli forestali.

Bibliografia

- COWEN D.J., 1988. *GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54: 1551-1554.
- ISAAKS E.H., SRIVASTAVA R.M., 1989. *An Introduction to Applied*

- Geostatistics*. Oxford University Press.
- LUNG-ESCAARMANT B., GUYON D., 2004. *Temporal and spatial dynamics of primary and secondary infection by Armillaria ostoyae in a Pinus pinaster plantation*. Phytopathology 94: 125-131.
- NELSON M.R., FELIX-GASTELUM R., ORUM T.V., STOWELL L.J., MYERS, D.E. 1994. *Geographic information systems and geostatistics in the design and validation of regional plant virus management programs*. Phytopathology 84: 898-905.
- NELSON M.R., ORUM T.V., JAIME-GARCIA R., NADEEM A., 1999. *Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management*. Plant Disease 83: 308-319.