



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI, DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO

**MONITORAGGIO DELLE FITOPATIE NEI  
CASTAGNETI CON IL SUPPORTO DI  
SENSORISTICA SU PIATTAFORMA UAV**

**MONITORING OF PLANT DISEASES IN  
CHESTNUT FORESTS WITH THE SUPPORT  
OF SENSORS ON A UAV PLATFORM**

TIPO TESI: sperimentale

Studente:  
FEDERICO PESCI

Relatore:  
PROF. ALESSANDRO VITALI

Correlatore:  
DOTT. MATTIA BALESTRA  
PROF. ROBERTO PIERDICCA

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

# INDICE

|  |    |
|--|----|
| ABSTRACT .....   | 3  |
| SINTESI .....  | 4  |
| INTRODUZIONE .....   | 5  |
| 1.1 Ecologia e distribuzione del castagno ( <i>Castanea sativa</i> Mill. 1768) .....       | 5  |
| 1.2 Cambiamento demografico e abbandono culturale della montagna.....                      | 8  |
| 1.3 Principali disturbi biotici.....   | 9  |
| 1.3.1 Cancro corticale del castagno.....   | 9  |
| 1.3.2 Il mal dell'inchiostro del castagno.....   | 11 |
| 1.4 Applicazioni del telerilevamento per la mappatura ed il monitoraggio di fitopatie..... | 15 |
| 1.5 Obiettivi della tesi.....  | 17 |
| MATERIALI E METODI .....   | 18 |
| 2.1 Area di studio .....   | 18 |
| 2.2 Raccolta dati in campo .....   | 19 |
| 2.3 Rilievo con drone.....   | 22 |
| 2.4 Creazione ortofoto.....  | 23 |
| 2.5 Segmentazione delle chiome.....  | 24 |
| 2.6 Indici multispettrali.....   | 25 |
| 2.7 Relazione tra dati di campo e da UAV.....  | 26 |
| RISULTATI.....   | 28 |
| 3.1 Mappatura e segmentazione delle chiome .....   | 28 |
| 3.2 Indici spettrali della vegetazione.....  | 30 |
| 3.3 Output relazione tra dati di campo e da UAV.....                                       | 33 |
| DISCUSSIONI .....  | 38 |
| CONCLUSIONI .....  | 41 |
| BIBLIOGRAFIA .....   | 42 |

## ABSTRACT

The sweet chestnut, *Castanea sativa* Mill., is a fundamental component of the landscapes and culture across the European continent. For centuries, the fruits and wood of this species have characterized and identified vast areas, deeply integrating into their popular culture. The Marche region is among the Italian regions with the highest chestnut production, primarily concentrated in the province of Ascoli Piceno (AP). Demographic changes, the abandonment of mountainous areas and biotic disturbances, intensified by a rapidly changing climate, threaten the survival of the species.

This thesis, after describing the main current threats to the sweet chestnut, presents an in-depth analysis of a chestnut grove in Altino di Montemonaco (AP) affected by Ink Disease, a disease caused by pathogens of the genus *Phytophthora spp.* Managing the disease requires the use of new technologies that can actively contribute to mitigate the phytosanitary emergency. This study utilizes phytosanitary monitoring sheets, compiled in the field following visual analyses of the canopy of 87 trees, and a multispectral sensor mounted on a UAV platform (*DJI Mavic 3M*). The 425 images captured by the drone for each band (R, G, NIR, and Red-Edge) were processed using Agisoft Metashape software to obtain the multispectral orthophoto of the study area (4.1 ha in extent with a ground sampling distance of 1.85 cm).

Subsequently, QGIS was employed to both manually segment the canopies of the trees surveyed through the monitoring sheets and to integrate the field data with those acquired by the UAV. Thanks to the bands acquired by the sensor used, median values of different vegetation indices (NDVI, NDRE, GNDVI, MCARI, and LCI) were processed for each plant, providing useful information for monitoring the phytosanitary status. The results highlighted a decreasing trend of these indices with the increase in the state of decline recorded in the field and demonstrated that the use of innovative sensors can improve the monitoring of the Ink Disease. In the next future, by repeating the survey annually, the use of this technology could actively contribute to the *early detection* of the disease itself, allowing for rapid and timely intervention on the overstory.

## SINTESI

Il Castagno europeo, *Castanea sativa* Mill., è una componente fondamentale dei paesaggi e della cultura di gran parte del continente europeo. Da secoli, i frutti e il legno di questa specie arborea caratterizzano e identificano ampie porzioni di territorio, integrandosi profondamente nella cultura popolare delle stesse aree. La regione Marche è tra le regioni italiane con maggior produzione castanicola, concentrata prevalentemente nella provincia di Ascoli Piceno (AP). Il cambiamento demografico, l'abbandono delle aree montane e i disturbi biotici, aggravati da un clima in rapida evoluzione, compromettono la sopravvivenza della specie.

Questa tesi, dopo aver descritto le principali minacce attuali del castagno europeo, mostra un'analisi approfondita in un castagneto ad Altino di Montemonaco (AP) colpito dal Mal dell'inchiostro, malattia causata da patogeni del genere *Phytophthora spp.* La gestione della malattia richiede l'ausilio di nuove tecnologie, che possano contribuire attivamente a mitigare l'emergenza fitosanitaria. Il presente studio utilizza schede per il monitoraggio fitosanitario, compilate in campo a seguito di analisi visive sulla chioma di 87 piante, e un sensore multispettrale su piattaforma UAV (*DJI Mavic 3M*). Le 425 immagini catturate dal drone per ogni banda (R, G, NIR e Red-Edge) sono state elaborate utilizzando il software Agisoft Metashape per ottenere l'ortofoto multispettrale dell'area di studio (4.1 ha di estensione con un ground sampling distance di 1.85 cm).

Successivamente, QGIS è stato impiegato per segmentare manualmente le chiome delle piante censite tramite le schede di monitoraggio ed integrare i dati di campo con quelli acquisiti dal UAV. Grazie alle bande acquisite dalla sensoristica utilizzata, per ciascuna pianta si è proceduto all'elaborazione di valori mediani di differenti indici vegetazionali (NDVI, NDRE, GNDVI, MCARI e LCI) che forniscono informazioni utili per il monitoraggio dello stato fitosanitario. I risultati hanno evidenziato un trend decrescente di tali indici all'aumentare dello stato di deperimento censito nella scheda di campo e dimostrano che l'uso di sensori innovativi può migliorare il monitoraggio del Mal dell'inchiostro. In futuro, ripetendo con cadenza annuale il rilievo, l'uso di questa tecnologia potrebbe contribuire attivamente all'*early detection* della malattia stessa, consentendo un rapido e tempestivo intervento sul soprassuolo.

# INTRODUZIONE

## 1.1 Ecologia e distribuzione del castagno (*Castanea sativa* Mill. 1768)

Il Castagno europeo (*Castanea sativa* Mill. 1768) è una specie arborea di considerevole importanza paesaggistica, ecologica e produttiva, che da secoli caratterizza il paesaggio collinare e montano di vaste aree della penisola italiana. Nonostante la sua ampia diffusione, secondo la carta della distribuzione, il castagno non risulta essere una specie autoctona (Figura 1).

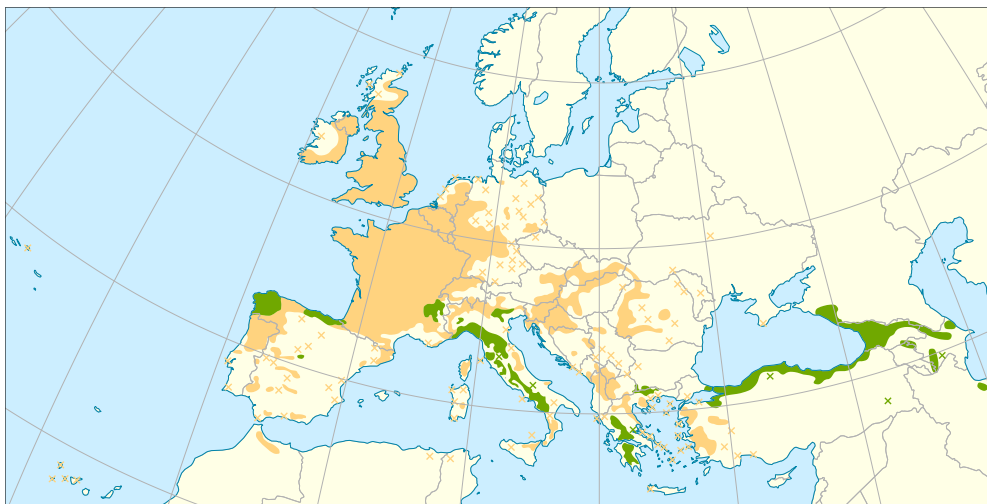


Figura 1. Carta della distribuzione della *Castanea sativa* Mill. 1768. In verde si indicano le probabili aree native della specie, in arancio le zone in cui è stata introdotta e naturalizzata.

Il termine *Kàstanon* deriva da “kastania”, villaggio della Tessaglia, in Grecia, luogo da cui la specie del castagno venne importata dai Romani (Conedera et al., 2004). Nella regione Mediterranea la specie del castagno si trova dal livello del mare fino ai 1000 metri (con picchi di 1500m). La diffusione europea si intensificò nel Medioevo, grazie all’opera dei monaci che ne favorirono la piantumazione in zone montane. Il castagno, per lo sviluppo economico rurale, ha svolto un ruolo chiave, fornendo legna da ardere, materiale per costruzione e cibo (Marzocchi et al., 2024). Predilige zone con precipitazioni annuali intorno ai 600mm con un periodo di siccità estiva non superiore ai tre mesi. Ai fini produttivi da frutto le temperature non devono scendere sotto i 10° C per un minimo di sei mesi all’anno (Josefa Fernández-

López & Ricardo Alía, 2003). Le caratteristiche pedologiche sono il principale elemento che partecipa a rendere idoneo o meno un sito per la coltura del castagno. La *C. sativa* prospera su terreni franchi, permeabili e con reazione subacida (pH 5-6,5) con presenza di sostanza organica maggiore del 2%, fertili e con buon contenuto di fosforo e potassio. Il castagno ha bassa tolleranza nei confronti di suoli con presenza di calcare attivo e suoli a reazione alcalina, nei quali deperisce rapidamente e muore. Substrati pesanti, asfittici e argillosi, soggetti a ristagni idrici risultano ugualmente nocivi, in quanto ottime condizioni per la proliferazione di marciumi radicali causati da *Armillaria sp.* e *Phytophthora sp.*, più avanti ben approfondita (Freitas et al., 2021). Nell’ambito italiano, vista la sua funzione nutritiva, venne anche ribattezzato” “albero del pane”, proprio per la possibilità di produrre farina dai suoi frutti e soddisfare il fabbisogno di cibo invernale anche nelle aree più svantaggiate e nei periodi più bui. La produzione di castagne, come quella di ogni frutto, non è ovviamente omogenea per tutta la penisola italiana, ma è strettamente legata alla vocazionalità dell’area e alla tradizione popolare regione Marche è tra le sei regioni italiane con maggiore produzione castanicola, assieme a Campania, Piemonte, Calabria, Toscana e Lazio (Fonte ISTAT 2023). La quasi totalità dei castagneti marchigiani è concentrata nell’entroterra ascolano, come riscontrabile da “IPLA-I tipi forestali delle Marche (2001-2002)”, dove vocazionalità e folklore si fondono alla perfezione, divenendo la culla della castanicoltura regionale (Figura 2).

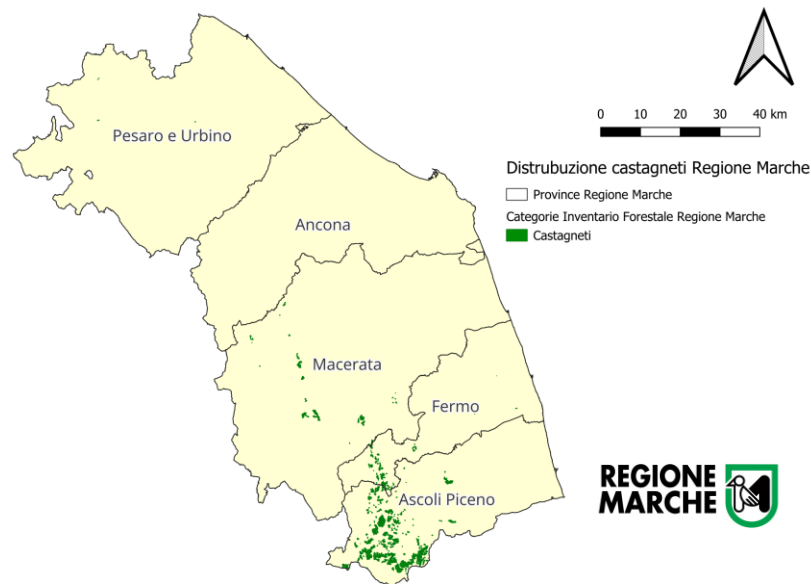


Figura 2. Distribuzione dei castagneti nella Regione Marche, concentrati maggiormente nella provincia di Ascoli Piceno (Carta Forestale Regione Marche).

Non sono poche le documentazioni che concorrono a chiarire l’infinita importanza del castagno nelle aree montane. Scavando nell’archivio di Stato di Ascoli Piceno ci si può

facilmente imbattere con scritti e lettere che trattano l'argomento. Si nota ad esempio, una lettera del 1812 che il sindaco di Acquasanta Terme (AP) scrive al viceprefetto del Tronto, sollecitando il rifacimento di un ponte sulla strada romana, sottolineando come questo fosse necessario per la vendita di castagne e legno da parte degli abitanti di Acquasanta e Quintodecimo (vicina frazione). La castanicoltura andava inoltre a scontrarsi con le attività pascolive: il pascolo in bosco dopo il periodo di raccolta negava la "spigolatura" delle castagne rimanenti ai più poveri. Nel febbraio 1813 il ministro dell'Interno, a conoscenza delle condizioni di miseria montane e dell'importanza delle castagne, dirama l'esclusione delle capre dai pascoli montani per seminativi e "selve da lavoro", tra le quali i castagneti. Altre testimonianze scritte, come quella del 1816 del governatore di Acquasanta Terme, riportano vere e proprie rapine a mano armata avvenute in castagneti (Perna Maria Rosaria, 2012). Ad oggi fortunatamente la sopravvivenza rurale non è più vincolata dalla produzione castanicola. Come spesso accade per prodotti derivanti dalla cultura povera e popolare (ad esempio per le farine integrali) oggi la castagna ha visto una forte rivalutazione, passando da alimento di sopravvivenza a prodotto alimentare ricercatissimo, soprattutto nel periodo autunnale. Negli anni anche la tutela e l'inquadramento del "castagneto" sono mutati; i boschi di *Castanea sativa*, ad oggi, sono identificati come Habitat 9260 dalla Rete Natura 2000, descritti come: "Boschi mesofili di castagno (*Castanea sativa*)", governati a ceduo o ad alto fusto, talvolta con alberi secolari, favoriti dall'azione dell'uomo. Si sviluppano su substrati da neutri ad acidi (calcarei decalcificati, calcari selciferi, arenarie), su suoli profondi e freschi, nei piani altocollinare e basso-montano. Si tratta di boschi misti con abbondante castagno e dei castagneti favoriti dall'uomo a fini produttivi (da frutto e da legno), con copertura erbacea costituita prevalentemente da specie della classe *Quercus-Fagetea*, condizione che generalmente si verifica quando le chiome degli alberi da frutto sono sufficientemente vicine, ma non si sovrappongono (Rete Natura 2000 Marche). L'Habitat, fortemente condizionato dal substrato, è segnalato in soli 12 siti, quasi tutti, tranne uno, concentrati nella porzione meridionale della regione dove i rilievi sono marnoso arenacei. La superficie complessiva è di 983,13 ha, a fronte dei quasi 4500 ha occupati dalla categoria forestale dei castagneti (Rete Natura 2000 Marche). Ad oggi, oltre alle produzioni di frutti e legno, numerosi individui di castagno rivestono un importante ruolo dal punto di vista ambientale, paesaggistico e turistico-ricreativo. Grazie alla loro maestosità alcuni di loro rientrano infatti nell'elenco degli Alberi Monumentali d'Italia (AMI) fornendo, tra i vari servizi ecosistemici, quello di proteggere l'identità di un paesaggio, il castagneto, forgiato dall'uomo in secoli di storia (Balestra et al., 2023).

## 1.2 Cambiamento demografico e abbandono colturale della montagna

La castanicoltura pone quindi radici profonde nella cultura marchigiana. La presenza secolare della *Castanea sativa* nella regione non la rende però immune a disturbi e minacce nei confronti della specie. L'origine delle criticità può essere varia: abbandono, cambiamenti climatici e fitopatologie (Pezzi et al., 2017). Nonostante il miglioramento delle condizioni socioeconomiche, ad oggi la vita montana resta una vita di sacrifici e scelte. La tendenza demografica negativa delle aree interne, infatti, iniziata a scala europea con la rivoluzione industriale, non accenna ad arrestarsi e continua a spopolare la montagna. Nella regione Marche i Comuni montani sono circa il 20% del totale, ma vi risiede appena il 6,5% della popolazione (ISTAT, 2024). Questo dato è destinato a scendere visto il calo annuo di circa -0,8% (Figura 3).

| Comuni                              | Classi SNAI 2020            | Comune di destinazione prevalente | Tempi medi di percorrenza (minuti) | Popolazione residente ISTAT 2011 | Popolazione residente ISTAT 2020 | Variazione demografica 2011 - 2020 |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Acquasanta Terme                    | C - Cintura                 | Ascoli Piceno                     | 17,7                               | 3.050                            | 2.575                            | -15,57%                            |
| Appignano del Tronto                | C - Cintura                 | Ascoli Piceno                     | 20,2                               | 1.852                            | 1.708                            | -7,78%                             |
| Arquata del Tronto                  | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 30,4                               | 1.287                            | 1.040                            | -19,19%                            |
| Carassai                            | D - Intermedio              | Fermo                             | 31,5                               | 1.116                            | 985                              | -11,74%                            |
| Castignano                          | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 29,8                               | 2.947                            | 2.639                            | -10,45%                            |
| Comunanza                           | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 30,1                               | 3.204                            | 2.981                            | -6,96%                             |
| Cossignano                          | D - Intermedio              | San Benedetto del Tronto          | 28,1                               | 1.015                            | 872                              | -14,09%                            |
| Force                               | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 35,5                               | 1.428                            | 1.175                            | -17,72%                            |
| Montalto delle Marche               | D - Intermedio              | San Benedetto del Tronto          | 37,2                               | 2.260                            | 1.964                            | -13,10%                            |
| Montedinove                         | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 38,9                               | 505                              | 479                              | -5,15%                             |
| Montegallo                          | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 37,8                               | 573                              | 463                              | -19,20%                            |
| Montemonaco                         | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 38,3                               | 635                              | 546                              | -14,02%                            |
| Offida                              | C - Cintura                 | Ascoli Piceno                     | 26,1                               | 5.215                            | 4.770                            | -8,53%                             |
| Palmiano                            | C - Cintura                 | Ascoli Piceno                     | 25,2                               | 214                              | 165                              | -22,90%                            |
| Roccafluvione                       | C - Cintura                 | Ascoli Piceno                     | 14,8                               | 2.061                            | 1.926                            | -6,55%                             |
| Rotella                             | D - Intermedio              | Ascoli Piceno                     | 32,8                               | 936                              | 834                              | -10,90%                            |
| Venarotta                           | C - Cintura                 | Ascoli Piceno                     | 14,6                               | 2.146                            | 1.929                            | -10,11%                            |
| <b>TOTALE AREA<br/>nr 17 comuni</b> | <b>Aree interne<br/>65%</b> |                                   | <b>28,76</b>                       | <b>30.444</b>                    | <b>27.051</b>                    | <b>- 11,15%</b>                    |

Figura 3. Andamento demografico dei comuni in aree montane nella provincia di Ascoli Piceno.

Lo spopolamento progressivo delle aree interne è confermato da tutti gli indicatori specifici: età media più alta e natalità più bassa rispetto alla fascia costiera (Lucchetti & Morettini, 2024). È certo che i tristi fenomeni sismici che tanto hanno segnato il territorio abbiano partecipato attivamente ad un ulteriore diaspora dei residenti, che si sono trovati improvvisamente strapiantati dalla loro terra natia (Dottori, 2024). Le istituzioni, ovviamente a conoscenza della situazione, stanno cercando di invertire la rotta con vari bandi e finanziamenti volti a risollevarne l'entroterra marchigiano. L'abbandono però non consiste semplicemente in una piccola migrazione interna. Lo spopolamento si traduce nella perdita dell'identità sociale, tradizioni, dialetti e cultura. È ormai chiaro come le tradizioni di queste

aree siano profondamente legate al bosco e alle castagne e non è difficile intuire come senza persone questo legame sia destinato a finire. A farne le spese è anche il paesaggio rurale. Quest'ultimo, infatti, per quanto possa apparire naturale e selvaggio, è stato negli anni scolpito dall'azione dell'uomo. Centinaia di habitat tanto protetti e apprezzati, senza l'intervento umano andrebbero in malora, seguendo irrimediabilmente i dinamismi vegetazionali (Fiore et al., 2024). Il castagneto, inteso come Habitat 9260, senza sfalcio e potature, tenderebbe a sviluppare vegetazione dapprima arbustiva poi arborea, giungendo infine al bosco misto di latifoglie. Le dinamiche della vegetazione sono già oggi piuttosto palesi nell'entroterra ascolano, dove i castagneti ancora produttivi sono ormai a macchia di leopardo. La mancanza di ricambio generazionale vincola indissolubilmente il castanicoltore al castagneto che invecchia e muore con lui. Altra criticità è costituita dal cambiamento climatico che, combinato all'abbandono, provoca grossi danni. Il fattore che certamente più negativamente influenza la sopravvivenza del castagno europeo è l'apporto idrico sempre minore che va ad intaccare la capacità di produrre frutti. Il principale disagio però è costituito dal generale cambiamento delle condizioni ecologiche. Negli ultimi decenni abbiamo assistito ad una modificazione delle temperature e delle precipitazioni a scala nazionale. La mutazione delle condizioni ambientali favorisce l'insediamento di specie esotiche già di loro invasive che unitamente alla manutenzione montana calante rischiano di soverchiare rapidamente le specie autoctone, come il castagno (Soler & Izquierdo, 2024; Varricchione et al., 2024). Sempre più spesso si notano ingressioni in bosco di specie come la *Robinia pseudoacacia* e *Ailanthus altissima*.

### 1.3 Principali disturbi biotici

#### 1.3.1 Cancro corticale del castagno

Tra gli agenti patogeni ad oggi più diffusi del castagno europeo, classificati a seconda della porzione di albero che interessano, spesso importati da altri paesi (Romay-Río et al., 2024), risulta la *Cryphonectria parasitica*, fungo ascomicete agente di cancro corticale di varie specie del genere *Quercus*, *Acer*, *Carpinus* e *Castanea*. Tra le specie più interessate dalla *C. parasitica* abbiamo la *Castanea sativa*. Il patogeno in questione, la cui evoluzione è ben analizzata da molteplici studi (Rigling & Prospero, 2018), è stato segnalato per la prima volta negli Stati Uniti nel 1904, anche se la sua introduzione in America viene fatta risalire agli anni Novanta dell'800, probabilmente a causa di piantine da vivaio di *C. crenata* (Cina) e *C. mollissima* (Giappone) di importazione asiatica. In Italia si registra per la prima volta la sua

presenza nel 1938 e in circa 12 anni si diffonde in tutta la penisola. La malattia e lo sviluppo delle lesioni, a seguito di studi, hanno dimostrato una forte stagionalità. A livello sperimentale i patogeni inoculati nei mesi tra maggio e luglio hanno avuto effetti più dannosi sull'ospite (Guérin & Robin, 2003). Altre sperimentazioni hanno approfondito e confermato, mediante analisi dendrocronologiche svolte su individui morti, che il patogeno è più letale quando la pianta è in stress dovuto a condizioni ambientali avverse (Waldboth & Oberhuber, 2009). La malattia si manifesta causando il progressivo disseccamento e morte di rami, branche o intera pianta. Tutti gli organi legnosi della pianta possono essere attaccati, ad eccezione delle radici, esposte comunque a patogeni di cui poi si tratterà. I cancri si mostrano prima con la comparsa di tacche rosso mattone ed in seguito con la formazione di profonde fenditure che possono portare alla morte della pianta (in questo caso si parla di *cancro letale*). In corrispondenza delle fenditure è possibile osservare pustole rosse-arancio di 1,5-2 mm di diametro che rappresentano le fruttificazioni asessuali del patogeno (Keleş et al., 2024) (Figura 4).

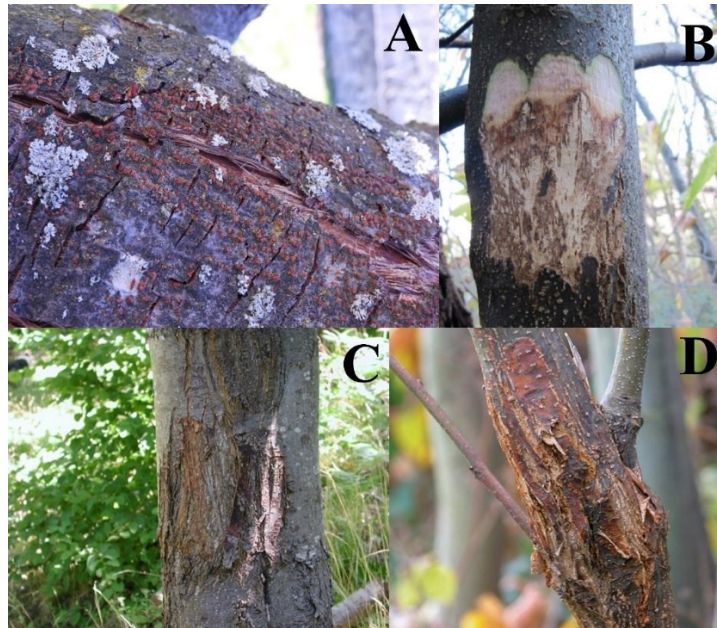


Figura 4. A) Tipiche fruttificazioni rossicce della *Cryphonectria parasitica*; B) *C. parasitica* forma nella corteccia e nel cambio un micelio feltroso di colore cremeo-giallastro a forma di ventaglio; C) Cancro infetto dal virus dell'Ipovirulenza con sviluppo superficiale; D) Cancro corticale su un giovane castagno, il tentativo di rimarginare l'infezione si denota dalla colorazione rossastra (Heiniger & Rigling, 1994)

Al di sotto della corteccia si osservano tessuti necrotici più o meno estesi. Fortunatamente a volte si può avere la tipologia di *cancri non letali* dovuti alla presenza di una forma ipovirulenta del fungo, non in grado di determinare la morte dell'individuo colpito. Da questi

cancri sono stati isolati i ceppi anomali di *C. parasitica*, caratterizzati da una virulenza attenuata (Rigling et al., 2016). Sono infatti cancri più superficiali che danno origine ai così detti cancri “cicatrizzati”. Le forme ipovirulente, capaci di neutralizzare le forme più aggressive, vengono utilizzate per il controllo biologico della malattia (Ahmad et al., 2024). Una delle sperimentazioni compiute a tal proposito è consistita nell’inserire carote di legno infetto dalla forma ipovirulenta della *C. parasitica* (di diametro dai 5 agli 8 mm) in fori (profondi 8mm) realizzati nelle aree colpite da cancro corticale letale di altri individui. L’esperimento si è dimostrato efficace in percentuali variabili dal 20.3% al 83.6% (Juhászová & Bernadovicová, 2001). Non mancano però studi che utilizzano agenti chimici per il trattamento della malattia. Uno tra questi è andato ad applicare varie sostanze sulle aree infette come, l’ossicloruro di rame, benomyl, carbendazim, sia da soli che in combinazione tra loro. I trattamenti, ripetuti 3 volte con intervalli di tempo di 15 giorni, hanno dato i loro risultati dopo sei mesi. Le percentuali di miglioramento maggiori si sono avute con i trattamenti con la combinazione a ossicloruro di rame e Carbendazim (Aksoy & Serdar, 2004). Risultati incoraggianti e innovativi nel mondo dei trattamenti contro la *C. parasitica* arrivano anche da sperimentazioni compiute in Portogallo dove, come in Italia, la castanicoltura è un importante settore. Tra gli studi condotti se ne riporta uno che ha visto l’utilizzo di fertilizzante a base di silicio (SiK®). Una volta isolato il patogeno in piastra Petri si è proceduto alla somministrazione di SiK® in tre diverse concentrazioni: 5 millimoli, 7.5 millimoli e 10 millimoli. I risultati hanno dimostrato che il fertilizzante a base di silicio è stato in grado di rallentare e sopprimere l’avanzamento della malattia in tutti e tre i casi. Con concentrazioni pari a 7.5 e 10 millimoli la soppressione è stata totale. I risultati ci dicono che fertilizzazioni a base di silicio potranno essere tra le possibili tecniche per combattere la *Cryphonectria parasitica* (Carneiro-Carvalho et al., 2020).

### 1.3.2 *Il mal dell’inchiostro*

Altri agenti patogeni, ancor più nocivi per il castagno (Prospero et al., 2023), sono la *Phytophthora cambivora* e la *P. cinnamomi* oomiceti identificati nel 1917 (Petri, Lionello. *Studi sulla malattia del castagno, detta " dell'inchiostro"*, 1917) che causano marciumi radicali, patologia nota come mal dell’inchiostro del castagno (Murolo Sergio et al., 2024; Vannini et al., 2021). Questi microorganismi vivono nel terreno e si diffondono utilizzando l’acqua come mezzo (Brasier, 1999). In condizioni normali, gli altri microorganismi presenti nella rizosfera sarebbero in grado di “controllarne” l’espansione, ma in situazioni di stress (dovuto ad esempio da cause ambientali o climatiche) la *Phytophthora* riesce facilmente a colonizzare le

radichette e risalire verso il colletto (Henkel et al., 2012). Il ciclo biologico della *Phytophthora* è costituito da una fase vegetativa di tipo miceliare e dalla formazione di strutture resistenti, come rigonfiamenti ifali, clamidospore e strutture riproduttive quali sporangi, zoospore e oospore (Hardham, 2001) (Figura 5).

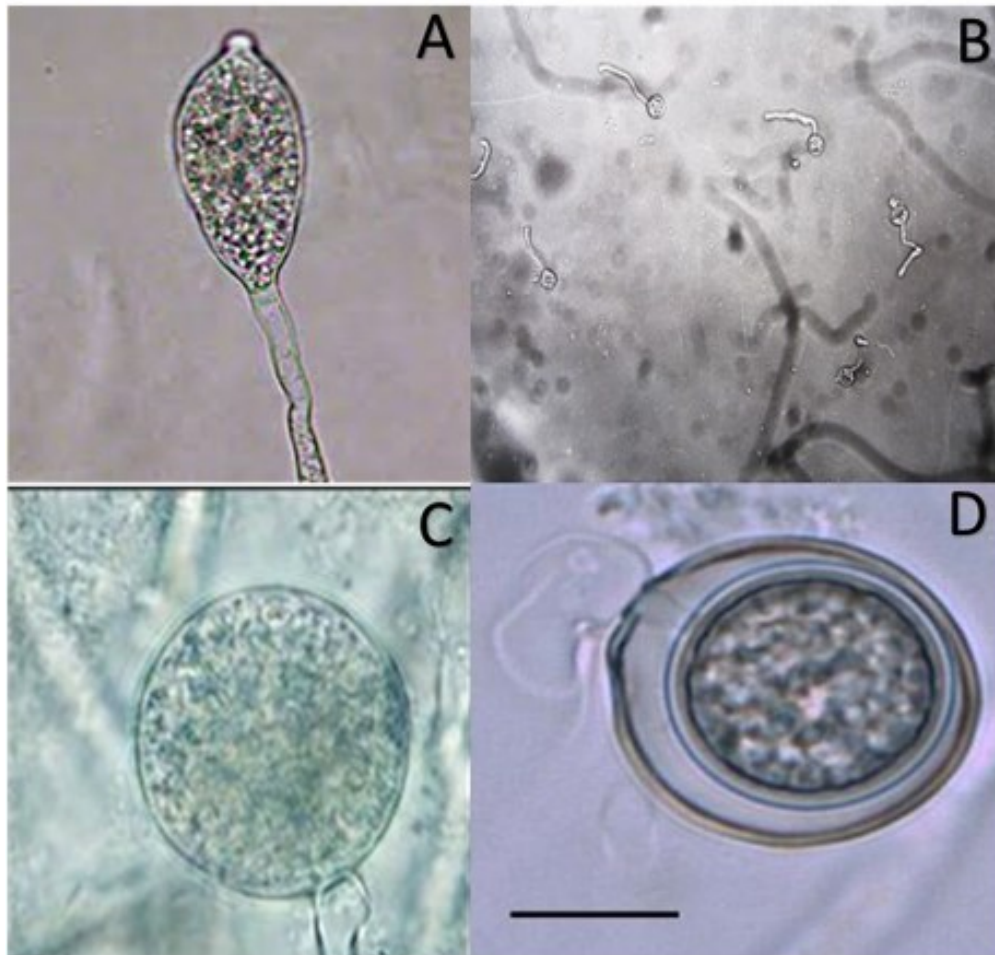


Figura 5. *Phytophthora* spp.: A) Sporangio, B) Zoospore, C) Clamidospore, D) Oospore.

La *P. cambivora* e la *P. cinnamomi*, appaiono morfologicamente simili e sono considerati un unico taxa con struttura genetica diversa, ma medesimo comportamento (Brasier, 1999). Nelle prime fasi della malattia si formano piccole fessure strette e allungate verticalmente; proprio da queste ferite fuoriescono abbondanti quantità di tannino, sintomo che dà il nome alla malattia stessa (Vannini & Vettrano, 2014) (Figura 6).



*Figura 6. Tessuti necrotici al colletto del castagno in presenza del patogeno, sintomo definito come “fiammata” del mal dell’inchostro*

I sintomi a livello sistemico arrivano quando l’albero inizia a manifestare il malfunzionamento radicale, che si traduce in stress idrico e deficienza nutrizionale: le parti più alte della chioma ingialliscono e seccano. Si formano inoltre getti epicormici caratterizzati da microfillia (Carolyn, 2001) (Figura 7).



*Figura 7. A) Foglie di individuo di castagno sano; B) Foglie affette da microfillia (Carolyn, 2001).*

Quando la necrosi basale interessa tutta la circonferenza del fusto, la pianta dissecca completamente. L’infezione ha avuto rapida diffusione principalmente per cause umane, riconducibili al commercio di piante infette e l’utilizzo di strumenti entrati in contatto con i patogeni (Fernandes et al., 2022). A scala più locale l’espansione della *P. cambivora* e *P. cinnamomi* può anche avvenire grazie a vettori animali o idrici (Vannini et al., 2021). Il ciclo

della malattia, se non tamponata fin da subito, è piuttosto breve e nel giro di pochi anni anche gli individui più vigorosi sono destinati a seccare. Ovviamente la produttività dei castagneti è fortemente colpita se non annullata del tutto (L. Martins et al., 2007a). Una chioma più rada si traduce in minore attività fotosintetica, questa porta ad una minore produzione di ricci e castagne. Nel caso del Mal dell'inchiostro del castagno la tempestività di intervento è fondamentale. Trattamenti in caso di infezioni leggere, come pollina o letame, hanno effetti positivi ma sono ancora in via di sperimentazione (Aryantha et al., 2000; Brandano et al., 2023). La manifestazione dei sintomi, quindi, avviene quando l'infezione è già avvenuta e, a causa dell'aggressività del patogeno, la strada della pianta è spesso segnata (*Figura 8*).



*Figura 8. Castagneto fortemente colpito dal mal dell'inchiostro.*

La ricerca sta spingendo per trovare trattamenti che possano effettivamente essere d'aiuto per arginare questi terribili patogeni. In Toscana, ad esempio, una sperimentazione condotta da Turchetti e Maresi si è basata sull'uso di materia organica. A livello operativo si sono andati a fertilizzare individui arborei colpiti da Mal dell'inchiostro con pollina, letame di bovino e altri fertilizzanti organici, sia da soli che in combinazione. I risultati, apprezzati dopo tre anni dell'inizio delle analisi, hanno mostrato che 60 piante su 75 hanno avuto un'ottima ripresa e soltanto sei della sperimentazione sono morte. I migliori effetti si sono avuti con pollina associata a fertilizzanti organici, mentre l'uso di letame ha portato a risultati meno evidenti. Il trattamento si è confermato quindi come valido ed economico (Turchetti & Maresi, 2006). Un altro studio svolto in Italia ha ampliato le ricerche, cercando di contenere non soltanto gli

effetti della *P. cambivora* e *P. cinnamomi*, ma anche di altre cinque specie di *Phytophthora*, ugualmente collegate al Mal dell'inchiostro. L'analisi delle due specie di *P.* più aggressive è stata svolta con due differenti condizioni ambientali (una con temperatura media di 14.5°C e l'altra a 25°C). La sperimentazione si è basata sull'utilizzo dell'endoterapia con fosfonato di potassio, molecola caratterizzata da elevata mobilità nelle piante. L'analisi svolta ha concluso confermando l'efficacia del trattamento, in modo particolare con concentrazioni di fosfonato di potassio di 280 g/L. A differenza dei trattamenti a pollina, l'endoterapia risulta sicuramente più onerosa e impegnativa (Brandano et al., 2023). Studi ancor più innovativi stanno approfondendo l'aspetto del controllo biologico della *Phytophthora*. Uno tra questi, condotto da A. Frascella et al., ha sperimentato in vitro la capacità di 20 specie di *Trichoderma* di rallentare e combattere la *P. cambivora*. Le sei specie di *T.* più performanti sono state analizzate anche per la loro capacità di sintetizzare chitinasi, glucanasi e cellulasi e di agire come micoparassiti nei confronti della *P. cambivora*. Tutte e sei le specie si sono mostrate in grado di controllare e arginare il patogeno, agendo sinergicamente con effetti di antibiosi e micoparassitismo, indipendentemente dalla specie di appartenenza. In particolare, il *T. hamatum SG18* e il *T. koningiopsis SG6* hanno mostrato i risultati più promettenti. Si necessita però di ulteriori approfondimenti in materia (Frascella et al., 2022). La chiave affinché si riesca ad intervenire con successo, indipendentemente dalla metodologia più o meno onerosa o invasiva e la tempestività. Il bisogno principale è la possibilità di individuare la malattia prima che questa si mostri con i classici sintomi. L'individuazione di malattie in ambito forestale il prima possibile è una delle classiche applicazioni del telerilevamento (Huo et al., 2023).

#### **1.4 Applicazioni del telerilevamento per la mappatura ed il monitoraggio delle fitopatie**

Per telerilevamento, o *Remote sensing*, si intendono l'insieme delle tecniche che permettono di ottenere informazioni basandosi sulla raccolta e sull'analisi di dati senza che lo strumento usato per raccogliere i dati stessi sia in contatto diretto con l'oggetto studiato (Sebastiani et al., 2024). Gli elementi essenziali per poter parlare di telerilevamento sono tre: una piattaforma che sostenga lo strumento, uno o più oggetti da osservare, uno strumento o sensore che osservi l'entità studiata (Jafarbiglu & Pourreza, 2022). Le piattaforme che supportano tutte le tipologie di sensoristiche sopra riportate possono essere: satellitari, aeree (aerei, elicotteri, UAV) o terrestri (fisse o mobili). Ogni piattaforma ha pregi e difetti e la scelta di quella più adatta è fortemente correlata al dato che si vuole ottenere. Per elaborazioni e studi a scala provinciale, regionale o nazionale è certamente preferibile utilizzare immagini

derivanti da satellite, con risoluzioni più basse; nel caso in cui la scala sia invece più di dettaglio si opta per UAV o piattaforme terrestri. In ambito forestale, negli ultimi anni, la tipologia di piattaforma utilizzata è prevalentemente quella aerea, con spiccata preferenza nell'uso di droni, più economici e versatili (Marques et al., 2019). Tutte queste tecnologie per la mappatura e l'analisi delle fitopatie spesso vedono un utilizzo coadiuvato al fine di giungere a risultati più accurati possibile. I sensori si dividono in attivi e passivi. Quelli passivi non emettono energia e si limitano a catturare quella riflessa dai corpi (proveniente dal Sole); al contrario i sensori attivi emettono radiazioni che, una volta giunte ai corpi osservati, tornano al sensore. Quando una radiazione elettromagnetica colpisce un corpo viene in parte assorbita, in parte trasmessa e in parte riflessa. Il rapporto percentuale tra radiazione riflessa e radiazione incidente prende il nome di riflettanza (Scotford & Miller, 2005). La rappresentazione delle variazioni della riflettanza al variare delle lunghezze d'onda è detta firma spettrale. I sensori che captano le frequenze del visibile danno come output delle immagini a colori reali, così dette RGB (Red-Green-Blue). Le immagini che si ottengono da questa tipologia di sensori, una volta elaborate tramite tecniche fotogrammetriche, permettono di avere come output dati spaziali e spettrali relativi all'area indagata. A seconda del numero di bande che il sensore riesce a registrare si parla di sensori Multispettrali (qualche decina di bande) o Iperspettrali (centinaia di bande). Ovviamente l'output che si ottiene da rilievi con sensori multispettrali varia a seconda delle bande registrate, e la rappresentazione dell'immagine è in scala di grigi. Ad oggi differenti studi hanno impiegato il telerilevamento per mappare superfici boschive (L. M. Martins et al., 2001) e valutarne lo stato fitosanitario (L. Martins et al., 2007b). Oltre alla mappatura si sono ottenuti validi risultati anche per ciò che riguarda l'*early detection* delle fitopatie, cioè la capacità di individuarle tempestivamente (precedentemente ai sintomi comuni) sfruttando lunghezze d'onda fuori dallo spettro del visibile (Oblinger et al., 2022). Il principio su cui si basano questi studi è la corrispondenza tra presenza di patogeni e conseguenti cambiamenti fisiologici, biochimici, strutturali e funzionali della vegetazione, che hanno a loro volta ricadute sulla riflettanza a specifiche lunghezze d'onda (Liao et al., 2022). Individuare precocemente piante in sofferenza permette di intervenire da subito, massimizzando gli effetti positivi di interventi selvicolturali o di lotta biologica (Hornero et al., 2021).

### **1.5 Obiettivi della tesi**

L'obiettivo della tesi è stato la mappatura con sensoristica multispettrale su piattaforma UAV di un castagneto colpito dal mal dell'inchiostro, individuando la relazione tra i dati ottenuti in campo mediante compilazione di schede per il monitoraggio fitosanitario per l'assegnazione delle classi di malattia e indici spettrali della vegetazione.

## MATERIALI E METODI

### 2.1 Area di studio

L'area di studio ricade in un castagneto colpito da mal dell'inchiostro situato nella frazione di Altino di Montemonaco (AP) (Figura 9). Montemonaco è un comune della provincia di Ascoli Piceno, situato nell'Appennino marchigiano a 988 m s.l.m. e gran parte del territorio comunale ricade nel Parco Nazionale dei Monti Sibillini. Il comune conta 27 frazioni, tra le quali Altino, frazione situata più in alto, a 1042m s.l.m. L'area di studio si caratterizza per estati fresche e inverni con nevicate concentrate nei mesi di novembre-aprile, con il picco nei mesi di gennaio-febbraio. I giorni nevosi variano da 6 a 25, mentre la neve resta al suolo dai 20 ai 60 giorni. La piovosità oscilla tra gli 800 e i 1400 mm annui (Figura 10). L'area di studio rientra nei confini del Parco Nazionale dei Monti Sibillini, motivo per cui, per i rilievi in volo, è stato necessario uno specifico permesso da parte dell'ente Parco che ha inoltre comunicato la nostra presenza ai Carabinieri Forestali. Il sito, stando alla cartografia della Rete Ecologica della Regione Marche non rientra in aree Natura 2000.

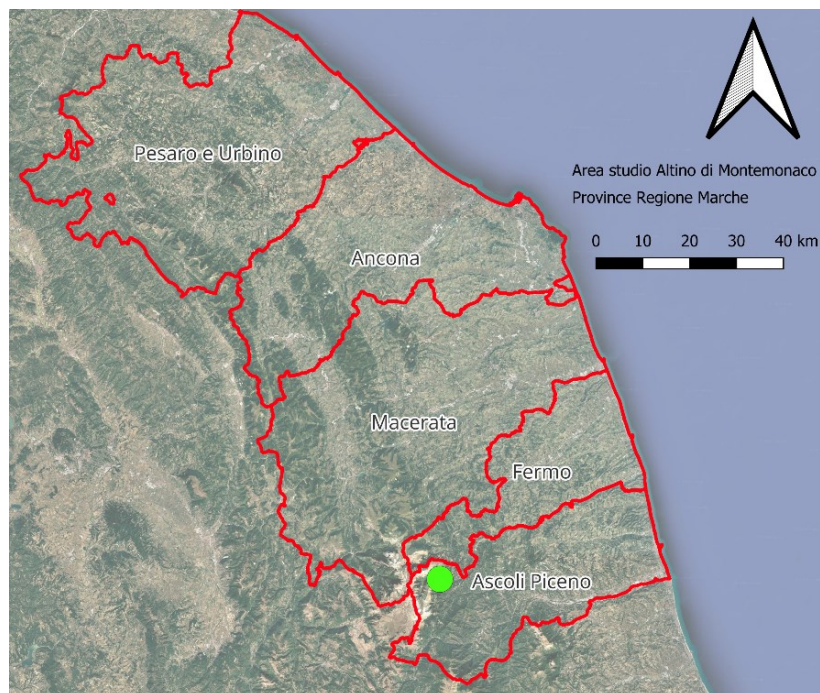


Figura 9. In rosso i limiti amministrativi delle provincie della regione Marche; in verde l'ubicazione dell'area di studio ad Altino di Montemonaco (AP).

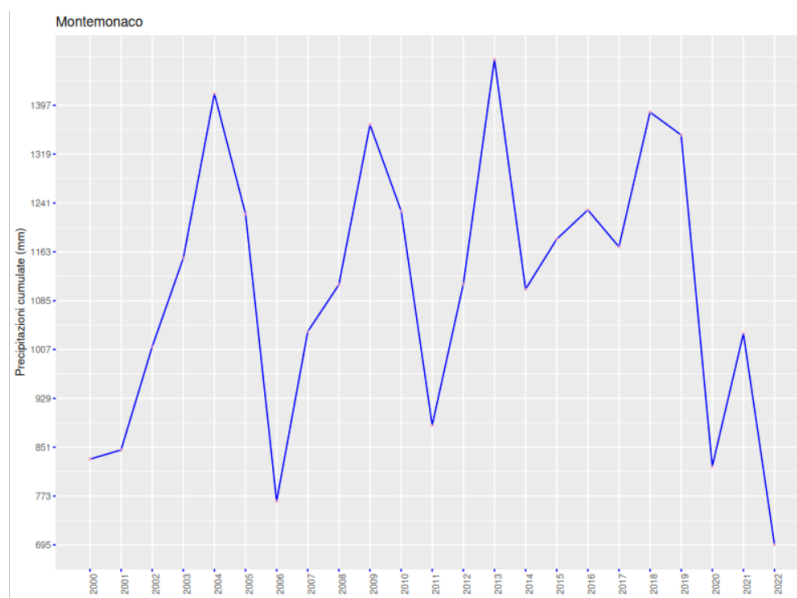


Figura 10. Precipitazioni cumulate annuali (mm) dal 2000 al 2022 a Montemonaco (Fonte ISPRA).

## 2.2 Raccolta dati in campo

La prima operazione ha richiesto l'utilizzo di schede per il monitoraggio fitosanitario per la definizione della classe di malattia degli individui arborei. Questa, una volta completata, permette di categorizzare il castagno analizzato in una classe da A a D, dove il valore crescente, legato alla percentuale di tessuto necrotico della pianta, è sinonimo di deperimento: classe A pianta sana o tessuti necrotici  $\leq 10\%$ , classe B tessuti necrotici 11-30%, classe C tessuti necrotici 31-50 %, classe D tessuti necrotici  $\geq 50\%$  o pianta morta (Figura 11).

| SCALA EMPIRICA TESSUTO MORTO |          |          |                         |
|------------------------------|----------|----------|-------------------------|
| Classe A                     | Classe B | Classe C | Classe D                |
| Pianta sana o $<10\%$        | $< 30\%$ | 31-50%   | $> 50\%$ o pianta morta |

Figura 11. Scala empirica per l'assegnazione della classe di malattia agli individui arborei nell'area di studio.

La scheda non tratta soltanto aspetti legati al Mal dell'Inchiostro, ma prevede spazi e range di valori anche per valutare altre eventuali malattie, come ad esempio il cancro corticale, l'attacco di cinipide galligeno e i giallumi da virosi (Moricca et al., 2022). Una volta compilate le schede fitopatologiche si è passati all'acquisizione delle posizioni degli individui arborei indagati. Il primo strumento utilizzato è stato il ricevitore GNSS Topcon HiPer VR (Figura

12). Questo, sfruttando la triangolazione satellitare, riesce a determinare le coordinate della sua posizione con un margine di errore nell'ordine dei millimetri, la dotazione di RTK permette inoltre la continua correzione della sua posizione (Radicioni et al., 2023). Il limite che questa tecnologia ha mostrato in campo sta proprio nel suo funzionamento: la necessità di copertura satellitare e la connessione 3G, indispensabile per il funzionamento RTK. Il contesto in cui si è operato ha impedito di avere buona ricezione, trovandosi sotto le chiome degli individui arborei. Una minore copertura satellitare e la mancanza di segnale 3G, portando ad un range di errore eccessivo, ha reso inutilizzabile questa tecnologia nelle aree più interne del castagneto.



*Figura 12. Ricevitore Topcon HiPer VR GNSS.*

Per ovviare alla mancanza di segnale utile a posizionare in assoluto alcune piante, si è necessitato di un altro strumento: FieldMap. Questo non è altro che un sistema comprensivo di software e hardware per la raccolta dati in campo, principalmente nel settore forestale (Mattioli et al., 2009). accoppiato ad un telemetro laser, dotato di inclinometro per la misura di angolo e distanza (posizione relativa) di un individuo arboreo rispetto alla stazione con posizione assoluta rilevata (Figura 13).



*Figura 13. Dispositivi utilizzati in attività di mappatura forestale con FieldMap. Lo strumento segnalato in rosso è un Telemetro laser dotato di inclinometro e bussola, necessario per la misurazione delle distanze e degli angoli.*

Dal punto di vista pratico si è operato in piccole aree di saggio. L'analisi è iniziata con il ricevitore GNSS Topcon HiPer VR (Figura 13), attraverso il quale si sono andate a verificare le coordinate del centro dell'area di saggio scelta; è stato importante in questa fase che la ricezione fosse più pulita possibile, scegliendo punti con buona copertura satellitare. Una volta fatto ciò, il telemetro laser collegato al FieldMap è stato posizionato esattamente sul punto dalle coordinate note. Attraverso il telemetro sono state registrate le posizioni degli 87 alberi rientranti nell'area analizzata. L'accuratezza del dato ottenuto va scemando allontanandosi dal "centro operativo" dell'area di saggio; nel caso operativo si sono stimati circa 20 metri di raggio per avere un perimetro entro il quale le misurazioni fossero attendibili. L'operazione si è ripetuta fino ad aver coperto tutta la superficie da indagare. Per avere dati più solidi si è deciso di compiere aree di saggio parzialmente sovrapposte, così da registrare più volte la posizione degli stessi individui arborei. All'interno del QGIS si è poi provveduto alla pulizia del dato andando a selezionare la posizione ritenuta più corretta per ogni albero ed eliminando le altre. Le piante sono state identificate con numerazione crescente, ovviamente corrispondente alla numerazione utilizzata nelle schede per le classi di malattia. Gli output di questa fase sono stati quindi delle schede cartacee riportanti classi di malattia (0-5) e delle

posizioni (X, Y, Z) in formato digitale. Si è poi provveduto ad abbinare le posizioni degli individui arborei alle rispettive classi di malattia, creando così un unico Shapefile contenente tutte le informazioni.

### 2.3 Rilievo con drone

Una volta completata la compilazione delle schede con le classi di malattia e la rilevazione delle posizioni degli individui arborei, si è passati al rilievo con il drone. Per il sito analizzato si è deciso di utilizzare due tipologie di sensori: camera RGB e sensore multispettrale, entrambe montate su piattaforma UAV. Quest'ultima, dall'inglese Unmanned Aerial Vehicle, sta ad indicare un velivolo senza pilota a bordo. Trattandosi di sensoristica passiva, quindi fortemente influenzata dalle condizioni ambientali, i voli sono stati programmati in giornate soleggiate e nelle fasce orarie di tarda mattinata, così da avvicinarsi il più possibile allo *zenit*, condizione che riduce al minimo la presenza di ombre. Trattandosi di rilevazioni in castagneto, quindi bosco di latifoglie, è stata fondamentale la scelta della stagione in cui compiere i voli, sfruttando il massimo vigore fogliare. È stato fondamentale compiere i rilievi con piattaforma UAV lo stesso giorno della compilazione delle schede di malattia, così da poter analizzare la medesima condizione vegetativa. La programmazione del volo è stata una fase chiave per poter ottenere dati solidi e attendibili (Goodbody et al., 2019). Come già detto la fotogrammetria si basa sul principio della sovrapposizione di due o più immagini che raffigurano uno stesso punto (1.3), risulta quindi lampante che la porzione più centrale del rilievo sia più attendibile, mentre le aree più periferiche abbiano meno *overlay topografico* (Spierenburg, 2024). Il volo è stato eseguito in modo autonomo da parte del drone, dopo aver programmato la missione. La pianificazione e la scelta dei parametri di volo è stata fondamentale per ottenere un risultato significativo. Seguono parametri scelti: Ground Sampling Distance 1.85cm, Area volo 4.1 ha, Distanza percorsa 3.07 km, Durata del volo 14 minuti e 30 secondi, Overlap Laterale 70%, Overlap frontale 80%, Numero immagini 425. Il numero delle immagini registrate è riferito ad ogni banda; viste le cinque bande utilizzate le immagini totali sono state 2125 (425\*5). Il drone utilizzato, DJI Mavic 3M (Figura 14), ha permesso, grazie alla sua sensoristica, di compiere un solo volo. Durante quest'ultimo, infatti, i sensori dell'UAV hanno catturato: le bande del verde (500-600 nm), del rosso (600-700 nm), del red edge (690-740 nm) e dell'infrarosso vicino (700-1300 nm). Il grosso vantaggio del sensore utilizzato sta nella presenza aggiuntiva della camera RGB, che ha fornito poi le immagini per la costruzione dell'ortofoto. La scelta del drone DJI Mavic 3M è stata anche influenzata dalla dotazione di RTK, Real Time Kinematic (Feng & Wang, 2008). Questa

tecnologia permette alla piattaforma, a differenza di quelle che ne sono sprovviste, di correggere in “Real Time” le coordinate della sua posizione, dando come output dei dati georeferenziati. Ciò si è tradotto nella disponibilità di dati più accurati senza la necessità di georeferenziazione con Ground Control Point. Tutta l’attrezzatura utilizzata è di proprietà dell’Università Politecnica delle Marche.



*Figura 14. UAV DJI Mavic 3M con i sensori che acquisiscono le diverse bande (R, G, NIR e Red-Edge) ed il modulo RTK.*

La modalità di volo utilizzata è stata la *Enhanced Visual Line Of Sight (EVLOS)*, evoluzione della più nota *Visual Line Of Sight (VLOS)*. Quest’ultima indica la condizione di volo a vista, ovvero in cui il drone è sempre visibile dal pilota. Per motivi applicativi e pratici però, soprattutto in ambito boschivo con la presenza di alberi, il drone può non essere sempre visibile a causa di ostacoli naturali. La modalità EVLOS colma le criticità della prima, includendo anche altri soggetti oltre al pilota nella “vista” del drone. Ovviamente questa modalità prevede la continua comunicazione radio tra le varie parti per poter gestire in sicurezza il volo (2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS) : Conference Proceedings : 03 Oct - 06 Oct 2018, Novocherkassk, Russia, 2018). L’output del volo sono state 2125 fotografie con una GSD di 1.85 cm, come richiesto dalla pianificazione della missione di volo.

#### **2.4 Creazione ortofoto**

Una volta ottenuti i dati da drone, sia immagini RGB che immagini delle singole bande R, G, NIR e RedEdge, si è passati al processamento delle stesse. L’obiettivo di questa fase è stato quello di passare da un insieme di immagini all’ortofoto. L’ortofoto, o ortomosaico, non è una semplice immagine dall’alto; questa, infatti, oltre ad essere georeferenziata grazie al

dispositivo RTK, subisce anche il processo di ortorettifica. Questa fase, mediante correzioni geometriche, garantisce la perpendicolarità dell'immagine in ogni punto del rilievo. L'ortofoto finale è stata il risultato di elaborazioni svolte all'interno del software Agisoft Metashape, programma specializzato per fotogrammetria (Yakar et al., 2014). Una volta inserite nel software le immagini ottenute dai rilievi con il drone, si sono andate ad allineare con il parametro dell'accuratezza settato su "high", ottenendo così il primo output del workflow fotogrammetrico: i Tie Points. A seguire si è elaborata la Dense Cloud (de Lima et al., 2021). Tramite quest'ultima si è ricostruito il digital elevation model (DEM), raster in cui la quota di ogni pixel è misurata alla sommità degli elementi presenti sul terreno (come alberi o edifici) (Zhou, 2017). Partendo dal DSM è stata poi creata l'ortofoto proiettando le singole immagini ortorettificate sul modello di elevazione (Schiefer et al., 2020). Le ortofoto finali, una a colori reali RGB e l'altra composta dalle diverse bande multispettrali, hanno come risoluzione rispettivamente 1.36 e 2.26 cm. La dotazione della piattaforma UAV del dispositivo RTK ha permesso di ottenere ortofoto georeferenziate, nonostante ciò, col fine di ridurre al minimo possibili shift tra le due tipologie di dati, si è deciso di coregistrare i due raster utilizzando come strumento il georeferenziatore all'interno del GIS stesso. Nel caso di studio il software utilizzato è stato il QGIS, programma open source. Nell'immagine multispettrale le bande registrate sono state distinte come segue: Banda 1 – Green; Banda 2 – Red; Banda 3 – RedEdge; Banda 4 – NIR. Grazie ai valori di riflettanza, calibrati dal sensore di luce incidente del drone, si sono create delle bande fittizie: gli Indici di Vegetazione (Vegetation Index).

## 2.5 Segmentazione delle chiome

Per focalizzare lo studio sul Mal dell'inchiostro è stato opportuno "isolare" le chiome dei castagni. Si è quindi passati alla segmentazione manuale delle chiome all'interno del GIS. Il processo, eseguito manualmente per ottenere un output più attendibile, si è ritenuto fondamentale per due ragioni: presenza di lettiera e contatto delle chiome, anche in individui di classi di malattia diverse. La segmentazione delle chiome ha richiesto particolare attenzione negli individui più deperienti o morti, proprio per l'alta permeabilità della chioma che lasciava ben visibile la vegetazione erbacea, principalmente composta da *Pteridium aquilinum* (Rosati et al., 2005). Il processo è consistito nella creazione di un unico shape file in cui ogni chioma è stata segmentata singolarmente e a questa sono stati assegnati: il numero identificativo e la classe di malattia derivante dalla compilazione delle schede in campo basata sulla percentuale di tessuto necrotico.

## 2.6 Indici multispettrali

Completata la segmentazione delle chiome degli 87 individui arborei del sito analizzato, si è proceduto con la creazione degli indici spettrali della vegetazione. Gli indici utilizzati sono: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Red Edge* (NDRE), *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI), *Leaf Chlorophyll Index* (LCI) e *Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index* (MCARI) (Main et al., 2011; Pádua et al., 2020; Wu et al., 2008). NDVI è l'indice più noto e di facile comprensione perché mette in relazione le bande del rosso e dell'infrarosso vicino. (*Formula 1*).

$$NDVI = (NIR-R) / (NIR+R)$$

*Formula 1. Formula con la quale si calcola l'Indice di Vegetazione NDVI.*

Il range di valori va da -1 a 1: generalmente i valori sono negativi per corpi idrici, vicini allo zero per rocce, sabbia o cemento e positivi per la vegetazione. Più il valore è alto e prossimo all'uno, più la vegetazione è in vigore (Huang et al., 2021). Una volta calcolato l'indice attraverso il "Calcolatore Raster" all'interno del QGIS, si può lavorare sulle colorazioni e la simbologia affinché la rappresentazione grafica sia accattivante e accessibile. Il secondo indice utilizzato è simile al primo, ma prevede l'utilizzo della banda del *Red Edge* al posto di quella del *Red*: il *Normalized Difference Red Edge* (NDRE) (*Formula 2*).

$$NDRE = (NIR - Red Edge) / (NIR + Red Edge)$$

*Formula 2. Formula con la quale si calcola l'Indice di Vegetazione NDRE.*

La differenza sta nella maggiore sensibilità del NDRE alle variazioni di attività fotosintetica, grazie all'utilizzo del *Red Edge*, banda in cui la riflettanza della vegetazione ha un brusco picco (Jorge et al., 2019). Altro vegetation index utilizzato è il *GNDVI*, anche quest'ultimo simile al NDVI, ma con la banda del *Green* che sostituisce quella del *Red*. Quest'indice di vegetazione è più sensibile in caso di quantità maggiori di clorofilla e quindi particolarmente adatto ad indagini boschive e arboree (David et al., 2022) (*Formula 3*).

$$GNDVI = (NIR-G) / (NIR+G)$$

*Formula 3. Formula con la quale si calcola l'Indice di Vegetazione GNDVI.*

Quarto indice ad essere calcolato è stato il *Leaf Chlorophyll Index* (LCI), parametro che si focalizza sulla quantità di clorofilla presente sull'apparato fogliare della vegetazione, utilizzato per individuare stress, malattie e deperimento (Gallardo-Salazar et al., 2023) (*Formula 4*).

$$LCI = (NIR - Red Edge) / (NIR+R)$$

*Formula 4. Formula con la quale si calcola l'Indice di Vegetazione LCI.*

L'ultimo indice di vegetazione che è stato scelto è il MCARI. Questo indice di vegetazione minimizza l'influenza di materiali fotosinteticamente non attivi, divenendo più sensibile alle variazioni della quantità di clorofilla (Gao et al., 2024) (*Formula 5*).

$$MCARI = ((NIR-R) - 0.2 * (NIR-G)) * (NIR/R)$$

*Formula 5. Formula con la quale si calcola l'Indice di Vegetazione MCARI.*

Attraverso analisi randomiche del valore dei pixel si è giunti a valori soglia che discriminassero tessuto morto da branche vive. I seguenti valori soglia, individuati a seguito dei test randomici sono stati poi utilizzati per la costruzione di maschere:

- Valore soglia NDVI - 0.6
- Valore soglia NDRE - 0.25
- Valore soglia GNDVI - 0.55
- Valore soglia LCI - 0.3
- Valore soglia MCARI - 110

Gli output di questa operazione sono stati Raster composti da due soli valori: 0 e 1, rispettivamente sinonimo di pixel sotto e sopra la soglia scelta. Il numero di pixel validi per ogni indice di vegetazione si è ottenuto calcolando la somma dei pixel con valore 1 all'interno dello shapefile delle chiome. Si è poi calcolata la percentuale di validità del pixel per ogni individuo arboreo. Trattandosi di vegetation index mirati ad evidenziare presenza di clorofilla e attività fotosintetica, le maschere sono riuscite a distinguere i corpi fotosinteticamente attivi o meno, come strade, tettoie e necromassa.

## **2.7 Relazione tra dati di campo e da UAV**

Le statistiche zonali estratte per ciascuna chioma dai cinque indici di vegetazione sono state: numero dei pixel, valore medio, valore mediano, minimo, massimo e deviazione standard. Con i dati relativi ai valori mediani dei pixel per ogni individuo arboreo si sono costruiti quattro Box plot per ogni indice di vegetazione, corrispondenti ai valori che i pixel assumono per ogni classe di malattia. Successivamente si sono andati a creare Box plot relativi anche alla distribuzione percentuale di pixel validi per ogni classe di malattia. Il seguente passo è stato verificare la validità statistica dei dati. Come spesso accade dataset di dimensioni ridotte risultano avere una distribuzione non normale (Krithikadatta, 2014). Di conseguenza i test applicabili sono soltanto test non parametrici, come il Kruskal-Wallis (KW) (Kitchen, 2009). Il test KW è stato svolto per ogni indice di vegetazione, dal momento che è in grado di confrontare più di due gruppi contemporaneamente, segnalando la presenza di differenze statisticamente significative tra i gruppi (Fan et al., 2011). Per individuare le eventuali

differenze tra i gruppi, si è proceduto col test di Dunn, test post-hoc non parametrico (Dinno, 2015). Al fine di evitare possibili falsi positivi si è proceduto al calcolo del *p-adjusted*, elaborando il *p-value* con il metodo Bonferroni, metodica conservativa che divide il livello di significatività per il numero di test effettuati (Jafari & Ansari-Pour, 2019). Come ultima operazione i valori dei cinque indici di vegetazione sono stati normalizzati intra-indice con valori compresi tra 0 e 1 (Karvoor, 2003) per mostrare in un unico grafico come variassero i valori degli indici di vegetazione utilizzati a seconda delle quattro classi di malattia.

# RISULTATI

## 3.1 Mappatura e segmentazione chiome

Vista l'inutilità a livello operativo dei dati più esterni si è optato per ritagliare il file raster soltanto per l'area di interesse. La segmentazione delle chiome ha dato come risultato uno Shapefile che appare come un complesso reticolo. La visualizzazione a scale eccessivamente ridotte appare problematica visto l'alto livello di dettaglio richiesto, che fa quindi apparire i tratti del vettore affastellati. Si riporta quindi sia una visione d'insieme (Figura 15) che una di dettaglio (Figura 16).

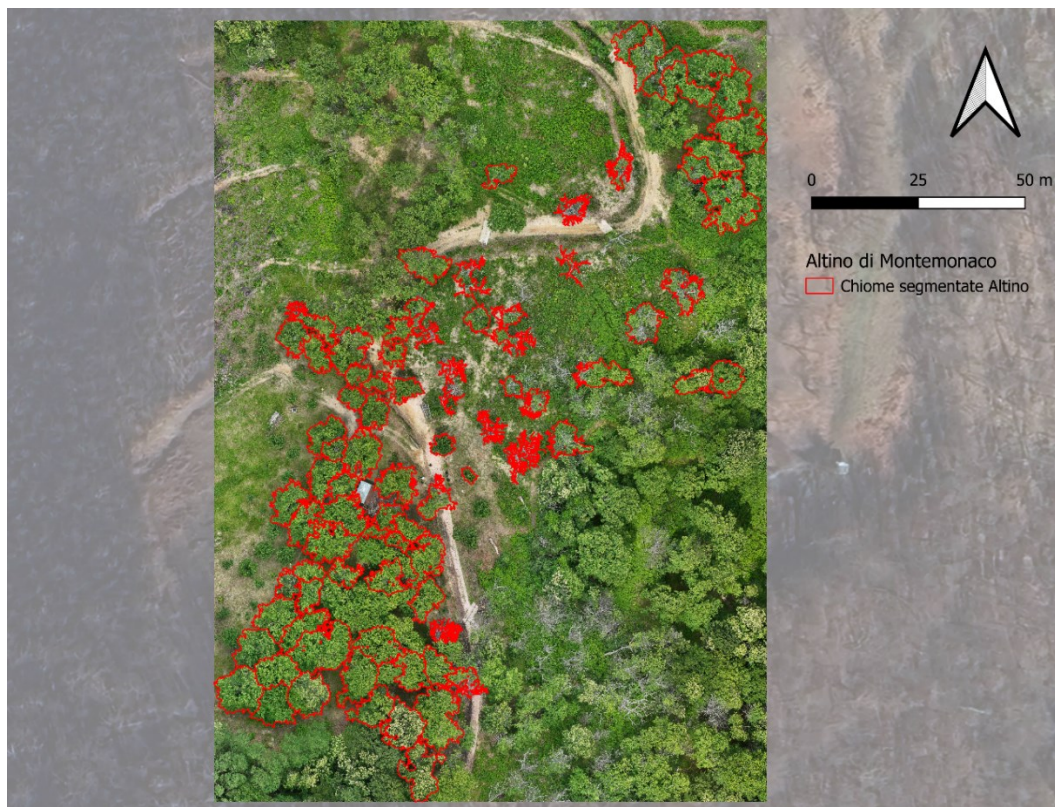


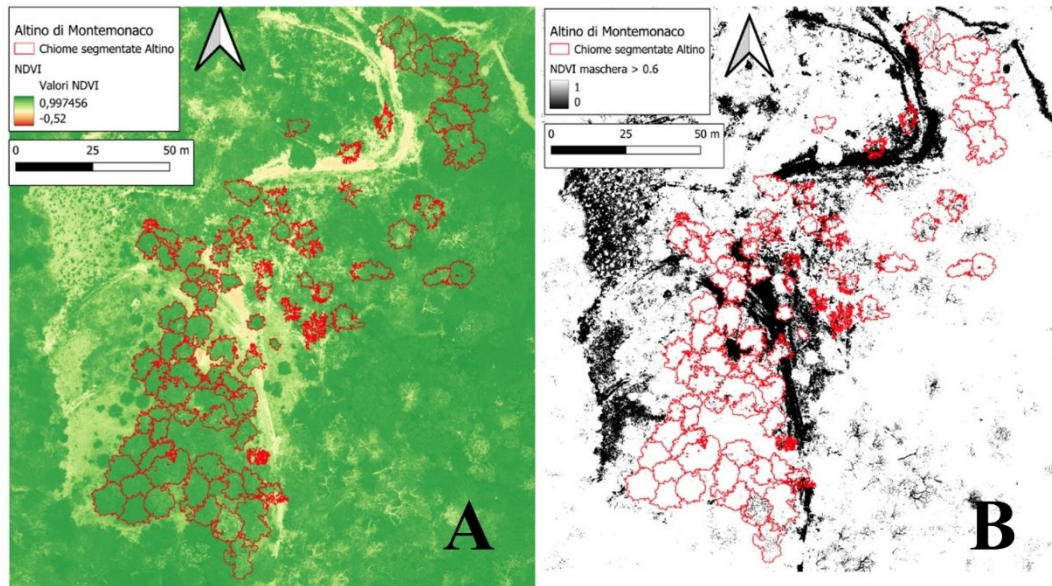
Figura 15. Ortofoto RGB con il layer attivo relativo alle chiome segmentate manualmente (in rosso).



Figura 16. A) Estratto dell'ortofoto RGB del castagneto argomento di tesi; B) In rosso la segmentazione delle chiome degli alberi analizzati.

### 3.2 Indici spettrali della vegetazione

Attraverso l'utilizzo dei dati multispettrali si è giunti alla creazione degli indici di vegetazione. Si è deciso di applicare a tutti questi output la stessa colorazione, da rosso a verde, rispettivamente sinonimo di valori più bassi e più alti dell'indice di vegetazione. Di seguito si riportano i risultati del calcolo degli indici di vegetazione utilizzati e i rispettivi output grafici derivanti dalle maschere applicate (*Figure 17-18-19-20-21*).



*Figura 17. A) Rappresentazione grafica dell'Indice di vegetazione NDVI; B) Output grafico della maschera applicata. In rosso sono riportate le chiome segmentate nell'area di studio.*

Dalla *Figura 17* si nota come dall'alto siano ben riconoscibili le radure e la strada brecciata, distinte da una colorazione diversa: più chiara nella visualizzazione dell'indice e nera nella rappresentazione della maschera. La colorazione della strada, nell'indice, tende al rosso, sinonimo di valore più basso, legato all'attività fotosintetica nulla (Huang et al., 2021).

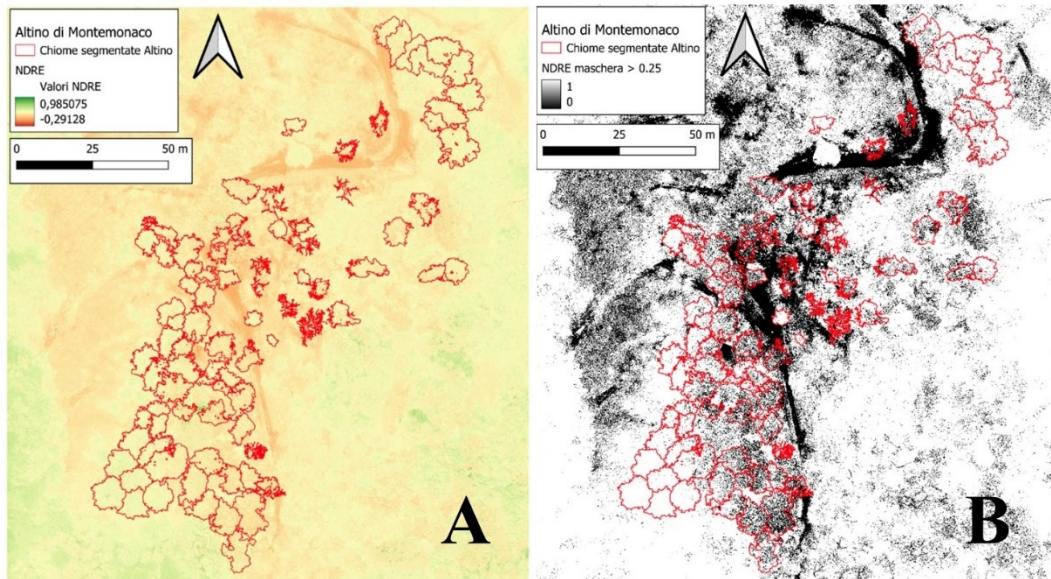


Figura 18. A) Rappresentazione grafica dell'Indice di vegetazione NDRE; B) Output grafico della maschera applicata. In rosso sono riportate le chiome segmentate nell'area di studio.

La Figura 18 rispetto alla precedente ha una colorazione tendenzialmente più vicina al rosso, ciò è dovuto ai diversi parametri con i quali si costruisce l'indice vegetazionale. Rispetto al NDVI, il NDRE permette di individuare al meglio le piccole variazioni di presenza di clorofilla (Jorge et al., 2019). Il valore soglia individuato nella maschera riesce a identificare al meglio anche le aree fiorite nelle chiome degli individui arborei, sinonimo di piccole variazioni della concentrazione di clorofilla tra foglie e fiori.

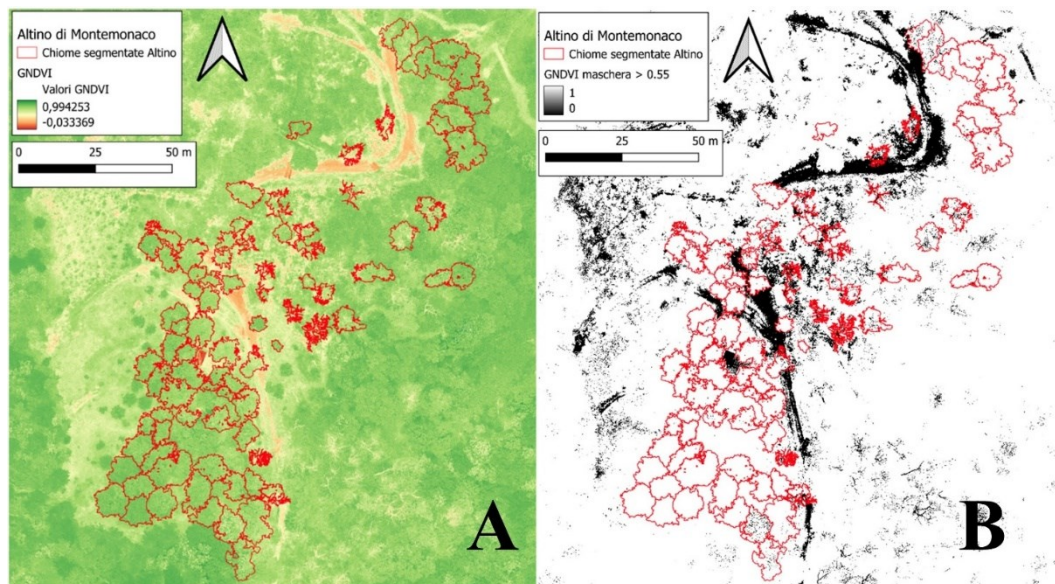
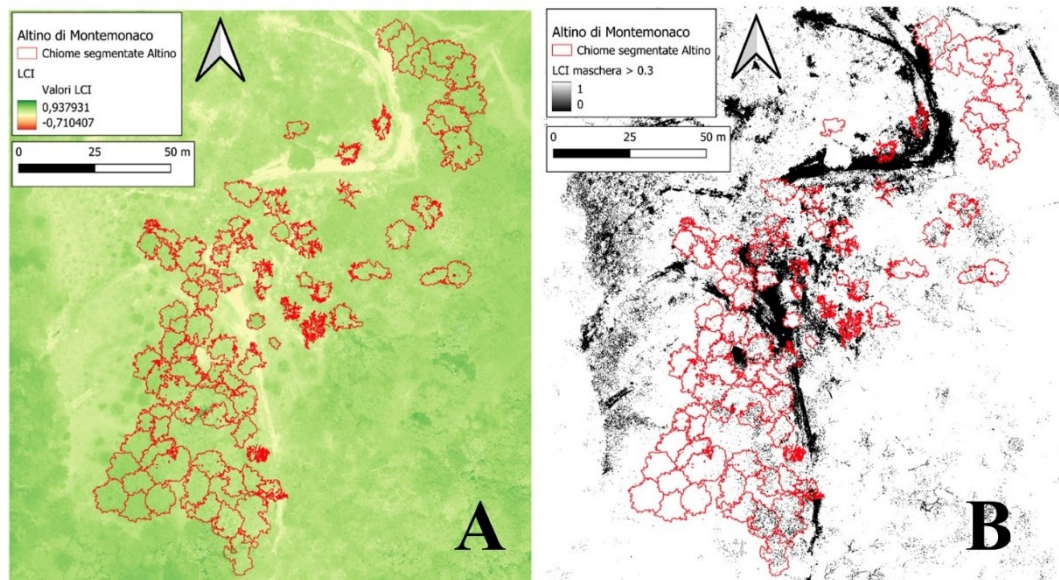


Figura 19. A) Rappresentazione grafica dell'Indice di vegetazione GNDVI; B) Output grafico della maschera applicata. In rosso sono riportate le chiome segmentate nell'area di studio.

L'indice GNDVI è particolarmente adatto nelle indagini con elevate quantità di clorofilla (David et al., 2022), come l'ambito boschivo. Questa proprietà permette di avere ancora più contrasto cromatico tra i corpi privi di clorofilla (strada, capanni e necromassa) e quelli che ne sono dotati (vegetazione in salute), sia nell'immagine relativa all'indice sia nella maschera, dove abbiamo molte meno aree punteggiate in nero e la distinzione è più netta.



*Figura 20. A) Rappresentazione grafica dell'Indice di vegetazione LCI; B) Output grafico della maschera applicata. In rosso sono riportate le chiome segmentate nell'area di studio.*

Anche nella *Figura 20* si mostra come la strada e le superfici con attività fotosintetica ridotta siano ben riconoscibili. Il Leaf Chlorophyll Index permette l'individuazione di malattie fogliari e stress, così come mostrato dall'elevata variabilità di valori all'interno delle chiome (Gallardo-Salazar et al., 2023).

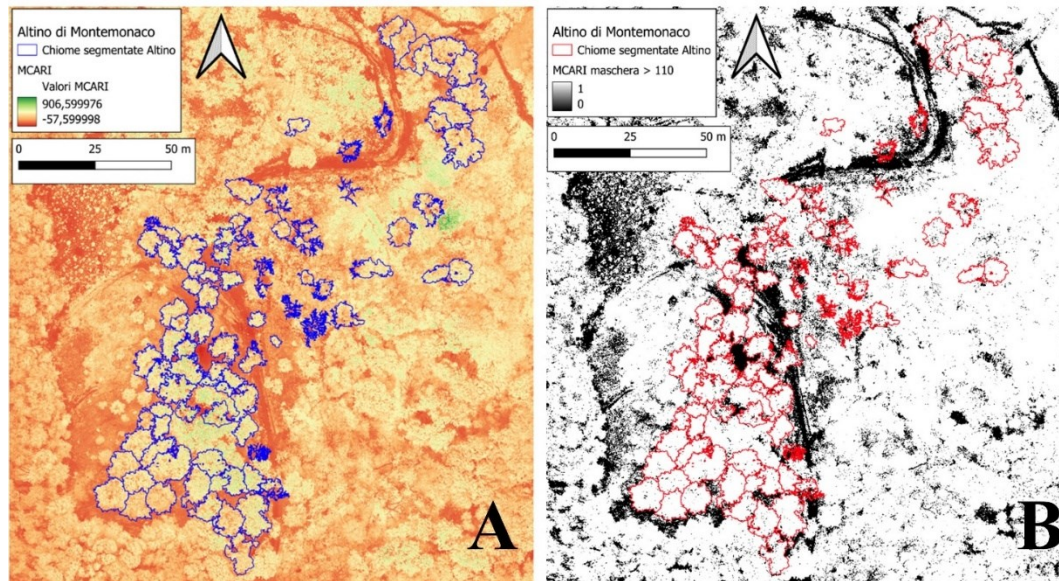


Figura 21. A) Rappresentazione grafica dell'Indice di vegetazione MCARI, in blu si riportano le chiome segmentate; B) Output grafico della maschera applicata, in rosso le chiome segmentate nell'area di studio.

L'indice MCARI è il più complesso utilizzato nel presente studio e con scala di valori completamente diversa rispetto agli altri, motivo per il quale poi si è deciso di normalizzare tutti i valori. La rappresentazione grafica del MCARI mostra un forte contrasto tra le chiome e le altre superfici, sia vegetate che inerti. Questo contrasto è dovuto alla proprietà dell'indice stesso di essere poco influenzabile dalla riflettanza di inerti e lettiera (Gao et al., 2024) stessa proprietà che permette alla maschera di evidenziare, soprattutto nella parte bassa dell'immagine, come i pixel con valori sotto la soglia contornino le chiome.

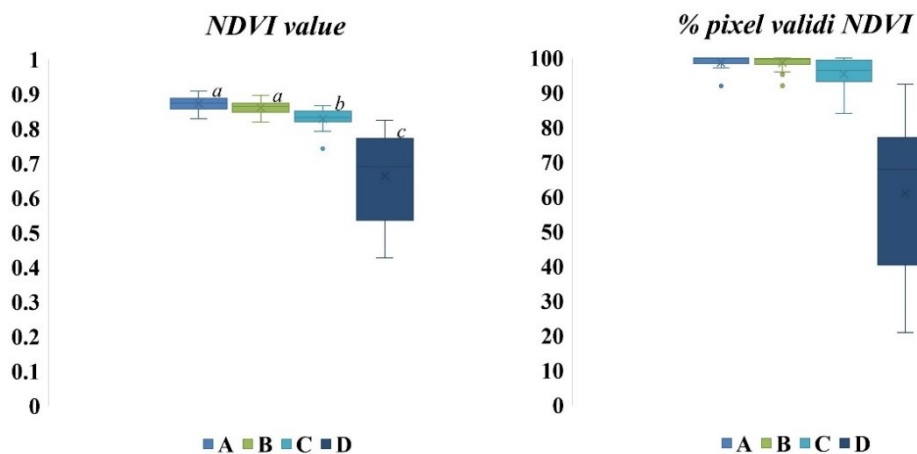
### 3.3 Output relazione tra dati di campo e da UAV

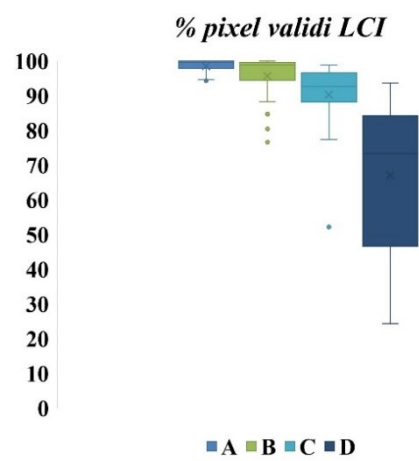
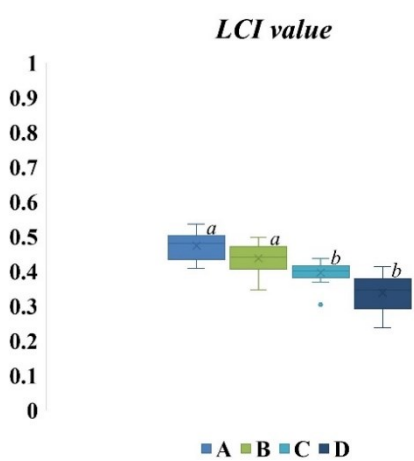
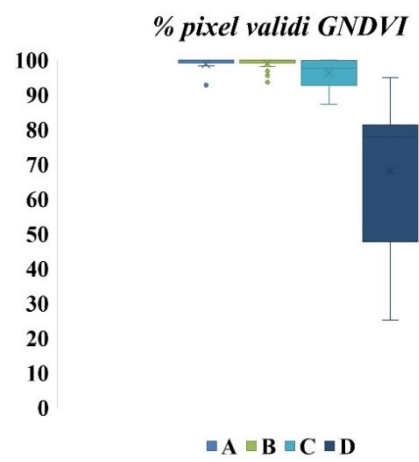
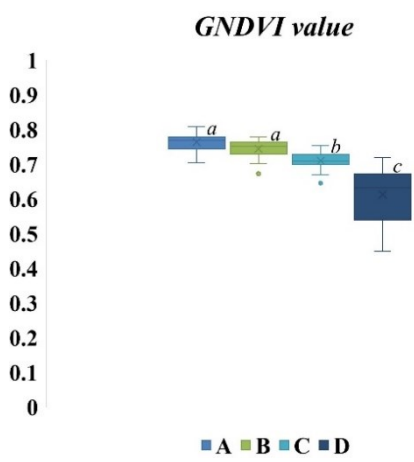
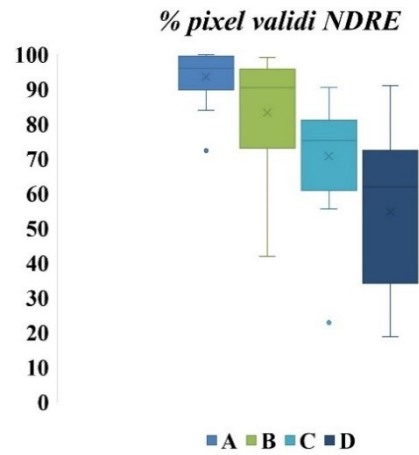
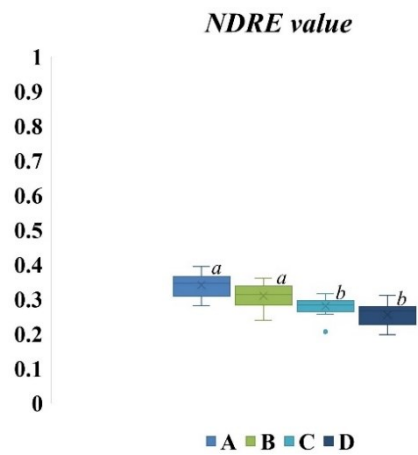
Nella tabella di seguito si mostrano gli output ottenuti a seguito del calcolo delle statistiche zonali relativi a: valori mediani degli indici di vegetazione e deviazione standard; nella figura i valori sono raccolti per indici e classi di malattia (Figura 22).

| Classi di malattia                |                  |                   |                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|
|                                   | A                | B                 | C                 | D                |
| N                                 | 16               | 34                | 20                | 17               |
| <b>NDVI medio</b><br>(dev. Std.)  | 0.87<br>(0.05)   | 0.86<br>(0.06)    | 0.83<br>(0.08)    | 0.66<br>(0.16)   |
| <b>NDRE medio</b><br>(dev. Std.)  | 0.34<br>(0.05)   | 0.31<br>(0.06)    | 0.28<br>(0.06)    | 0.26<br>(0.05)   |
| <b>GNDVI medio</b><br>(dev. Std.) | 0.76<br>(0.05)   | 0.74<br>(0.05)    | 0.71<br>(0.07)    | 0.61<br>(0.11)   |
| <b>LCI medio</b><br>(dev. Std.)   | 0.47<br>(0.06)   | 0.44<br>(0.07)    | 0.40<br>(0.07)    | 0.34<br>(0.08)   |
| <b>MCARI medio</b><br>(dev. Std.) | 321.14<br>(96.7) | 347.87<br>(111.7) | 322.88<br>(114.9) | 184.17<br>(98.3) |

Figura 25. Valori medi delle mediane di ogni classe di malattia per ogni indice di vegetazione; tra parentesi le medie della deviazione standard.

Nei Box plot, con le lettere in minuscolo, sono riportati anche i risultati del test di Dunn. A lettere uguali corrispondono campioni di dati che il test ha giudicato non essere statisticamente differenti, viceversa lettere diverse vanno intese come dati con differenze non ascrivibili al caso.





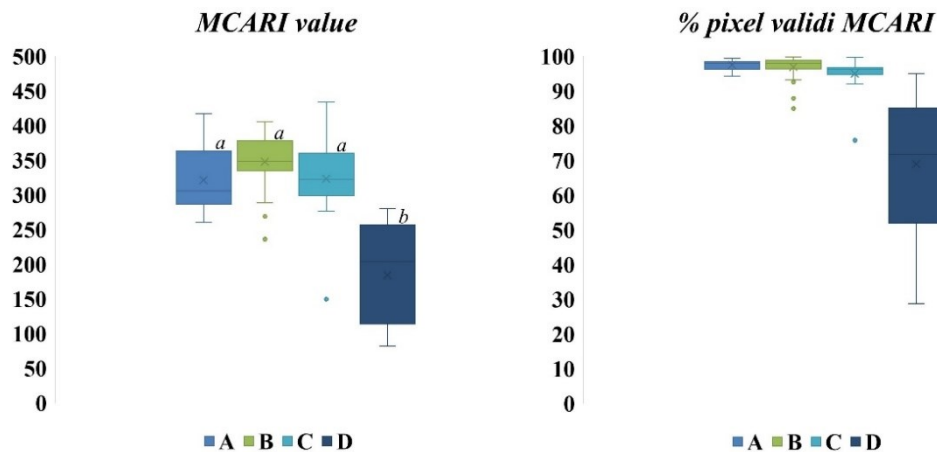


Figura 26. A sinistra box plot costruiti utilizzando i valori mediani dei 5 indici di vegetazione per ogni classe di malattia; in aggiunta, rappresentati dalle lettere in minuscolo, i risultati del test di Dunn. A destra box plot relativi alle percentuali di pixel validi divisi in classi di malattia.

Dall’osservazione di grafici si nota una discreta tendenza nei valori: questi hanno un trend decrescente all’aumentare dello stato di deperimento. I valori del NDVI vedono una particolare differenziazione quando la percentuale di tessuto necrotico supera il 50%. Le classi A, B e C infatti, sebbene con tendenza negativa, hanno valori più vicini tra loro. Tale fenomeno si ripete anche nei box plot relativi alla percentuale di pixel validi dello stesso indice. Le prime tre classi hanno pixel quasi completamente validi a differenza della classe D, dove il grafico segnala una percentuale di pixel validi che scendono anche sotto al 30%. L’indice NDRE è quello con il range di valori più ridotto. Le quattro classi spaziano da 0.39 a 0.19. Situazione opposta si ha nei box plot dei pixel validi di questo indice, dove il valore percentuale scende gradualmente all’aumentare della classe di malattia, partendo da percentuali oltre il 99 fino al 18%. Il GNDVI è molto vicino al NDVI sia nei valori dell’indice sia nella distribuzione percentuale di pixel validi. L’indice LCI è paragonabile al NDRE, con valori distribuiti in un range ridotto: 0.53-0.23. Per quanto riguarda le percentuali di pixel validi le classi A e B sono totalmente oltre il 90%, scendono poi con la classe D sotto ai 30 punti percentuali. L’ultimo indice, il MCARI, assume valori diversi da tutti gli altri. La maggior parte della classe B assume valori più alti della classe A. Quest’ultima è molto più vicina alla terza classe di malattia. La classe D risulta invece essere la più distaccata dalle altre, anche confrontandola con gli altri indici di vegetazione. Il test Kruskal-Wallis ha respinto l’ipotesi nulla per ogni indice analizzato, almeno uno dei gruppi sottoposti al test è quindi statisticamente diverso

dagli altri (Fan et al., 2011). Il test post-hoc di Dunn ha permesso poi di individuare nei nostri risultati quali classi di malattia per ogni indice elaborato, avessero un comportamento simile o diverso rispetto agli altri. Possiamo quindi valutare che solamente l'NDVI e il GNDVI hanno permesso di individuare 3 gruppi statisticamente differenti. In entrambi i casi, infatti, possiamo notare come le classi di malattia A e B siano statisticamente simili, ma differenti rispetto sia alla classe C che alla D. Inoltre, anche la classe C differisce dalla D. Questa osservazione statistica si nota solo negli indici dove la banda del NIR viene utilizzata con una banda dello spettro del visibile, andando a sottolineare l'importanza del picco in riflettanza percentuale che normalmente si osserva, nelle piante sane, tra le lunghezze d'onda del visibile e quelle del NIR. Gli altri indici presi in considerazione, NDRE, LCI e MCARI, non mostrano statisticamente tre classi diverse ma solo due. Infatti, solamente la classe D sembra differenziarsi dalle altre in maniera netta o somigliando alla classe C. Possiamo però notare come le % di pixel validi per NDRE e per LCI siano quelle che danno un'informazione migliore per quanto riguarda il trend e la differenziazione tra i diversi gruppi. Non è stata svolta alcuna analisi statistica in questo caso; quindi, non possiamo confermare differenze, ma visivamente notiamo come le singole classi di malattia sembrano avere sia una tendenza decrescente che occupare un range di valori diverso per ogni classe, cosa che invece notiamo in minor modo negli altri indici.

## DISCUSSIONI

I risultati ottenuti soddisfano le aspettative teoriche del progetto. In accordo con altri studi in materia si è notato come i vari stadi della malattia, siano riconoscibili e scindibili anche dai dati derivanti dagli indici di vegetazione (Sebastiani et al., 2024). Una delle differenze che caratterizza lo studio argomento di tesi sta nella scelta di registrare anche la banda del RedEdge, che poteva fornire delle informazioni diverse rispetto alla banda del NIR. Nello studio compiuto da Sebastiani et al, 2024, si è partiti dal classificare la malattia in sei classi, per poi ridurre il numero a tre stadi (albero sani, danni moderati, danni severi), mentre nel presente studio si è preferito avere quattro classi di malattia. La diminuzione del numero di classi è stata compiuta col fine di avere un maggiore contrasto spettrale tra i vari stadi della malattia. Diminuendo gli stadi, infatti, le discrepanze tra classi sono più evidenti e più facilmente individuabili (Sebastiani et al., 2024). Si ritiene però che uno studio più capillare possa essere più interessante e possa avere una maggiore utilità per l'individuazione della malattia mediante tecniche di remote sensing, anche basandosi sulle schede compilate in campo dalla figura del patologo forestale. La classificazione della malattia in campo, in studi incentrati sull'avvizzimento del pino ugualmente basati sull'ausilio di sensoristica multispettrale e piattaforme UAV, segue una logica diversa, non basandosi sulla percentuale di tessuto necrotico, ma sul colore assunto dagli aghi (Yu et al., 2021). Da qui la possibilità per gli studi futuri di provare classificare la malattia del Mal dell'inchiostro del castagno anche seguendo altri parametri, sempre con analisi visive speditive. Tutti gli indici utilizzati si sono mostrati sensibili alle varie classi di malattia. I vari vegetation index selezionati per lo studio compiuto si basano sulle lunghezze d'onda di assorbimento della clorofilla e sull'attività fotosintetica (Main et al., 2011; Pádua et al., 2020; Wu et al., 2008), i dati sono quindi tutti derivanti da rilievi nel periodo di massima copertura fogliare. Sarebbe interessante ripetere le analisi compiute negli anni a venire per poter apprezzare cambiamenti dello stato fitosanitario dell'area indagata, cercando di raggiungere informazioni scientifiche che possano indirizzarci verso l'*early detection* (Hornero et al., 2021), magari sviluppando un modello in grado di predire attraverso il machine learning distribuzione ed evoluzione della malattia (Guzmán Q. et al., 2023). Già altri studi hanno approfondito, utilizzando dati aerei, l'andamento della

malattia in lassi di tempo più lunghi, attraverso immagini RGB e IR. Uno studio compiuto in Portogallo ha sfruttato immagini e dati di oltre vent'anni per ricostruire l'evoluzione e la diffusione della malattia, concludendo che l'impatto è di questa è maggiore nei terreni più lavorati, proprio perché si favorisce la diffusione della *Phytophthora ssp.* (Castro et al., 2009). In letteratura sono presenti anche analisi esclusivamente mirate allo studio dei gradienti che influenzano la diffusione della *P. cambivora*. Uno di questi, di Vannini et al., ha approfondito questo aspetto nel versante settentrionale dei Monti Cimini. Il monitoraggio, durato 2 anni, si è basato su ortofoto a scala 1:10000 e plot con dimensioni 10x10m. La sperimentazione ha concluso che le vie preferenziali di diffusione del patogeno corrispondono alle linee di ruscellamento delle acque superficiali (Vannini et al., 2010). Con l'aiuto delle nuove tecnologie, piattaforme più versatili e sensori con risoluzioni più alte, sarebbe interessante effettuare quindi analisi simile ma con un dettaglio maggiore. Ad oggi la necessità di dati ottenere dati multitemporali è soddisfatta soltanto dalla presenza di dati da satellite, la cui risoluzione non risulta però sufficiente. Come evidenziato già da altri studi si sente la forte necessità di implementare la quantità di analisi multitemporali con risoluzioni maggiori (Ecke et al., 2022). Analizzando le criticità dello studio svolto si riportano le difficoltà legate ai rilievi con drone. Durante la missione ci si è dovuti adattare alle condizioni ambientali: copertura nuvolosa e ventosità moderata, fattori che influenzano le rilevazioni (Arroyo-Mora et al., 2021), così come avvenuto in altri casi di studio (Awais et al., 2021). Altre sperimentazioni hanno utilizzato piattaforme UAV come supporto per sensoristica termica, dimostrando l'esistenza di una correlazione tra temperatura crescente e avanzamento della malattia (Smigaj et al., 2015). In futuro, l'integrazione dello studio argomento di tesi con con sensoristica termica potrebbe portare a risultati interessanti. L'elaborazione dei dati rilevati in campo con il supporto del drone può essere piuttosto impegnativa, come già citato in altre ricerche (Jin-Si R. Over et al., 2021). La costruzione dell'ortofoto e la gestione degli output che si vanno a creare necessitano infatti di elevato potere computazionale, non sempre disponibile. La ground sampling distance scelta per compiere i rilievi risulta essere in linea con quella ottenuta in altri progetti nel campo forestale che avevano come obiettivo la mappatura di superfici boscate (Schiefer et al., 2020). Infatti, la risoluzione delle immagini ottenuta con i rilievi da drone si è rivelata fondamentale per uno studio accurato e significativo. L'attività di segmentazione manuale, nonostante impegnativa, ha permesso di ottenere una segmentazione molto accurata delle chiome dei singoli castagni analizzati, con un'elevata accuratezza di segmentazione. Uno dei limiti della presente tesi è la mancanza di un "confronto" tra segmentazione manuale e segmentazione automatica, che in altri studi ha permesso di ridurre di molto i tempi necessari

alle elaborazioni (Wolk & Tatara, 2024). Si propone quindi di rafforzare lo studio compiuto confrontando i dati ottenuti manualmente con quelli derivanti da una segmentazione automatica, andando in futuro ad utilizzare modelli di detection e poi di segmentazione automatici, magari effettuando anche data fusion con dati LiDAR da drone.

## CONCLUSIONI

Si può concludere affermando che i risultati forniscono informazioni significative su come i sintomi del mal dell'inchiostro del castagno possano essere individuabili e classificabili anche da remoto. L'innovazione tecnologica e l'attività coadiuvata di più figure tecniche e professionali possono certamente portare ad un enorme balzo avanti nell'individuazione precoce di questa malattia, riuscendo ad arginare una piaga che, ormai da anni, affligge i castagneti italiani. Tutto lo studio ci ha restituito una "fotografia" della condizione odierna di un sito dell'entroterra ascolano. Quello di cui si necessita per poter giungere a risultati più solidi, certi e significativi è una rete di analisi e studi paragonabili tra loro, i cui risultati e dati ottenuti possano "comunicare" e costituire un'unica sperimentazione che tenga anche in considerazione le dinamiche temporali. In questo modo si potrebbe arrivare alla tanto auspicata possibilità di individuare piante colpite dalla *Phytophthora cambivora* prima che gli effetti di questa siano ben visibili e l'albero irrimediabilmente infetto. La presente tesi esprime, seppur in modo dettagliato, soltanto la condizione attuale del castagneto oggetto di studio. Al fine di poter standardizzare la relazione tra malattia e valori degli indici di vegetazione sarebbe auspicabile poter contare su un monitoraggio pluriennale con piattaforme UAV, così da ottenere risoluzioni spaziali e temporali ottimali, che permettano elaborazioni con una scala di dettaglio più accurata ma tenendo anche conto dell'evoluzione della malattia. Analisi multitemporali delle stesse aree di studio aiuterebbero a comprendere al meglio l'evoluzione della patologia, le risposte della pianta ad eventuali cure e tutti quei fattori che possono in qualche modo frenare o aumentare l'avanzata del mal dell'inchiostro.

## BIBLIOGRAFIA

- 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS) : conference proceedings : 03 Oct - 06 Oct 2018, Novocherkassk, Russia. (2018). IEEE.
- Ahmad, F., Tomada, S., Poonsiri, T., & Baric, S. (2024). Molecular genetic variability of Cryphonectria hypovirus 1 associated with Cryphonectria parasitica in South Tyrol (northern Italy). *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1291542>
- Aksoy, H. M., & Serdar, U. (2004). A Research on Chemical Control Against Chestnut Blight (Cryphonectria parasitica (Murill) Barr). *Plant Pathology Journal*, 3(1), 44–47. <https://doi.org/10.3923/ppj.2004.44.47>
- Arroyo-Mora, J. P., Kalacska, M., Løke, T., Schläpfer, D., Coops, N. C., Lucanus, O., & Leblanc, G. (2021). Assessing the impact of illumination on UAV pushbroom hyperspectral imagery collected under various cloud cover conditions. *Remote Sensing of Environment*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112396>
- Aryantha, I. P., Cross, R., & Guest, D. I. (2000). *Suppression of Phytophthora cinnamomi in Potting Mixes Amended with Uncomposted and Composted Animal Manures* (Vol. 90, Issue 7).
- Awais, M., Li, W., Cheema, M. J. M., Hussain, S., AlGarni, T. S., Liu, C., & Ali, A. (2021). Remotely sensed identification of canopy characteristics using UAV-based imagery under unstable environmental conditions. *Environmental Technology and Innovation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101465>
- Balestra, M., Tonelli, E., Vitali, A., Urbinati, C., Frontoni, E., & Pierdicca, R. (2023). Geomatic Data Fusion for 3D Tree Modeling: The Case Study of Monumental Chestnut Trees. *Remote Sensing*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/rs15082197>
- Brandano, A., Serra, S., Hardy, G. E. S. J., & Scanu, B. (2023). Potassium Phosphonate Induces Resistance in Sweet Chestnut against Ink Disease Caused by Phytophthora Species. *Pathogens*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/pathogens12030365>

- Brasier, C. (1999). *Forestry Commission Information Note: Phytophthora pathogens of trees - their rising profile in Europe*. <http://www.forestry.gov.uk>
- Carneiro-Carvalho, A., Pinto, T., Ferreira, H., Martins, L., Pereira, C., Gomes-Laranjo, J., & Anjos, R. (2020). Effect of silicon fertilization on the tolerance of *Castanea sativa* Mill. seedlings against *Cryphonectria parasitica* Barr. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 127(2), 197–210. <https://doi.org/10.1007/s41348-019-00283-z>
- Carolyn. (2001). *California Orchard Tour Promises to be Late Summer Highlight*. <http://www.icserv.com/nnga/index.html>
- Castro, J., Azevedo, J. C., & Martins, L. (2009). *Temporal Analysis of Sweet Chestnut Decline in Northeastern Portugal Using Geostatistical Tools*.
- Conedera, M., Krebs, P., Tinner, W., Pradella, M., & Torriani, D. (2004). The cultivation of *Castanea sativa* (Mill.) in Europe, from its origin to its diffusion on a continental scale. *Vegetation History and Archaeobotany*, 13(3), 161–179. <https://doi.org/10.1007/s00334-004-0038-7>
- David, R. M., Rosser, N. J., & Donoghue, D. N. M. (2022). Improving above ground biomass estimates of Southern Africa dryland forests by combining Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113232>
- de Lima, R. S., Lang, M., Burnside, N. G., Peciña, M. V., Arumäe, T., Laarmann, D., Ward, R. D., Vain, A., & Sepp, K. (2021). An evaluation of the effects of uas flight parameters on digital aerial photogrammetry processing and dense-cloud production quality in a scots pine forest. *Remote Sensing*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/rs13061121>
- Dinno, A. (2015). Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test. In *The Stata Journal* (Vol. 15, Issue 1).
- Dottori, D. (2024). The effect of the earthquake in Central Italy on the depopulation of the affected territories. *Regional Science and Urban Economics*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2024.103985>
- Ecke, S., Dempewolf, J., Frey, J., Schwaller, A., Endres, E., Klemmt, H. J., Tiede, D., & Seifert, T. (2022). UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 13). MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs14133205>

- Fan, C., Zhang, D., & Zhang, C.-H. (2011). On Sample Size of the Kruskal–Wallis Test with Application to a Mouse Peritoneal Cavity Study. *Biometrics*, *67*(1), 213–224. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2010.01407.x>
- Feng, Y., & Wang, J. (2008). GPS RTK Performance Characteristics and Analysis. In *Journal of Global Positioning Systems* (Vol. 7, Issue 1).
- Fernandes, P., Colavolpe, M. B., Serrazina, S., & Costa, R. L. (2022). European and American chestnuts: An overview of the main threats and control efforts. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.951844>
- Fiore, B., Piras, F., & Santoro, A. (2024). Decline and restoration of a typical silvo-pastoral mountain landscape in the Italian Apennines. The case of Moscheta in Tuscany. *Trees, Forests and People*, *16*. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100529>
- Frascella, A., Sarrocco, S., Mello, A., Venice, F., Salvatici, C., Danti, R., Emiliani, G., Barberini, S., & Rocca, G. Della. (2022). Biocontrol of *Phytophthora xambivora* on *Castanea sativa*: Selection of Local *Trichoderma* spp. Isolates for the Management of Ink Disease. *Forests*, *13*(7). <https://doi.org/10.3390/f13071065>
- Freitas, T. R., Santos, J. A., Silva, A. P., & Fraga, H. (2021). Influence of climate change on chestnut trees: A review. In *Plants* (Vol. 10, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants10071463>
- Gallardo-Salazar, J. L., Lindig-Cisneros, R. A., Lopez-Toledo, L., Endara-Agramont, A. R., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2023). Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change. *Forests*, *14*(6). <https://doi.org/10.3390/f14061176>
- Gao, S., Yan, K., Liu, J., Pu, J., Zou, D., Qi, J., Mu, X., & Yan, G. (2024). Assessment of remote-sensed vegetation indices for estimating forest chlorophyll concentration. *Ecological Indicators*, *162*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112001>
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., & White, J. C. (2019). Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*, *5*(2), 55–75. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>

- Guérin, L., & Robin, C. (2003). Seasonal effect on infection and development of lesions caused by *Cryphonectria parasitica* in *Castanea sativa*. *Forest Pathology*, 33(4), 223–235. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2003.00329.x>
- Guerra-Hernández, J., González-Ferreiro, E., Monleón, V. J., Faias, S. P., Tomé, M., & Díaz-Varela, R. A. (2017). Use of multi-temporal UAV-derived imagery for estimating individual tree growth in *Pinus pinea* stands. *Forests*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/f8080300>
- Guzmán Q., J. A., Pinto-Ledezma, J. N., Frantz, D., Townsend, P. A., Juzwik, J., & Cavender-Bares, J. (2023). Mapping oak wilt disease from space using land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113794>
- Hardham, A. R. (2001). The cell biology behind *Phytophthora* pathogenicity. *Australasian Plant Pathology*, 30(2), 91–98. <https://doi.org/10.1071/AP01006>
- Heiniger, U., & Rigling, D. (1994). *BIOLOGICAL CONTROL OF CHESTNUT BLIGHT IN EUROPE*. [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)
- Henkel, A., Müller, J., & Pötzsche, C. (2012). Modeling the spread of *Phytophthora*. *Journal of Mathematical Biology*, 65(6–7), 1359–1385. <https://doi.org/10.1007/s00285-011-0492-7>
- Hornero, A., Zarco-Tejada, P. J., Quero, J. L., North, P. R. J., Ruiz-Gómez, F. J., Sánchez-Cuesta, R., & Hernandez-Clemente, R. (2021). Modelling hyperspectral- and thermal-based plant traits for the early detection of *Phytophthora*-induced symptoms in oak decline. *Remote Sensing of Environment*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112570>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. In *Journal of Forestry Research* (Vol. 32, Issue 1). Northeast Forestry University. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huo, L., Lindberg, E., Bohlin, J., & Persson, H. J. (2023). Assessing the detectability of European spruce bark beetle green attack in multispectral drone images with high spatial- and temporal resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113484>
- Jafarbiglu, H., & Pourreza, A. (2022). A comprehensive review of remote sensing platforms, sensors, and applications in nut crops. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 197). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106844>

- Jafari, M., & Ansari-Pour, N. (2019). Why, when and how to adjust your P values? *Cell Journal*, 20(4), 604–607. <https://doi.org/10.22074/cellj.2019.5992>
- Jin-Si R. Over, Andrew C. Ritchie, Christine J. Kranenburg, Jenna A. Brown, Daniel Buscombe, Tom Noble, Christopher R. Sherwood, Jonathan A. Warrick, & Phillippe A. Wernette. (2021). *Processing Coastal Imagery With Agisoft Metashape Professional Edition, Version 1.6-Structure From Motion Workflow Documentation*.
- Jorge, J., Vallbé, M., & Soler, J. A. (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 169–177. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- Josefa Fernández-López, & Ricardo Alía. (2003). *Technical guidelines for genetic conservation and use for chestnut (Castanea sativa)*.
- Juhásová, G., & Bernadovicová, S. (2001). Cryphonectria parasitica (Murr.) Barr and Phytophthora spp. in chestnut (Castanea sativa Mill.) in Slovakia. In *For. Snow Landsc. Res* (Vol. 76).
- Karvoaor, J. (2003). *The Statistical Basis of Laboratory Data Normalization*.
- Keleş, S. Ö., Ünal, S., Akan, S., & Karadeniz, M. (2024). Chestnut blight (Cryphonectria parasitica (Murr.) Barr) disease incidence and its effect on the morphological and anatomical features of Castanea sativa trees. *Forest Pathology*, 54(1). <https://doi.org/10.1111/efp.12843>
- Kitchen, C. M. R. (2009). Nonparametric vs Parametric Tests of Location in Biomedical Research. In *American Journal of Ophthalmology* (Vol. 147, Issue 4, pp. 571–572). <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2008.06.031>
- Krithikadatta, J. (2014). Normal Distribution. *Journal of Conservative Dentistry*, 17(1), 96–97. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.124171>
- Liao, K., Yang, F., Dang, H., Wu, Y., Luo, K., & Li, G. (2022). Detection of Eucalyptus Leaf Disease with UAV Multispectral Imagery. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081322>
- Lucchetti, R., & Morettini, G. (2024). Depopulation in the Central Apennines in the Twentieth Century: An Empirical Investigation. *Italian Economic Journal*. <https://doi.org/10.1007/s40797-024-00295-1>
- Main, R., Cho, M. A., Mathieu, R., O’Kennedy, M. M., Ramoelo, A., & Koch, S. (2011). An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS*

- Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), 751–761.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.08.001>
- Marques, P., Pádua, L., Adão, T., Hruška, J., Peres, E., Sousa, A., & Sousa, J. J. (2019). UAV-based automatic detection and monitoring of chestnut trees. *Remote Sensing*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/RS11070855>
- Martins, L., Castro, J., Macedo, W., Marques, C., & Abreu, C. (2007a). Assessment of the spread of chestnut ink disease using remote sensing and geostatistical methods. *European Journal of Plant Pathology*, 119(2), 159–164.  
<https://doi.org/10.1007/s10658-007-9155-3>
- Martins, L., Castro, J., Macedo, W., Marques, C., & Abreu, C. (2007b). Assessment of the spread of chestnut ink disease using remote sensing and geostatistical methods. *European Journal of Plant Pathology*, 119(2), 159–164.  
<https://doi.org/10.1007/s10658-007-9155-3>
- Martins, L. M., Lufinha, M. I., Marques, C. P., & Abreu, C. G. (2001). Small format aerial photography to assess chestnut ink disease. In *For. Snow Landsc. Res* (Vol. 76).
- Marzocchi, G., Maresi, G., Luchi, N., Pecori, F., Gionni, A., Longa, C. M. O., Pezzi, G., & Ferretti, F. (2024). 85 years counteracting an invasion: chestnut ecosystems and landscapes survival against ink disease. *Biological Invasions*, 26(7), 2049–2062.  
<https://doi.org/10.1007/s10530-024-03292-8>
- Mattioli, W., Alivernini, A., Portoghesi, L., & Giuliarelli, D. (2009). *Field-Map: uno strumento innovativo al servizio della selvicoltura*.  
<https://www.researchgate.net/publication/235999959>
- Moricca, S., Bracalini, M., & Panzavolta, T. (2022). *ecologia, avversità parassitarie, meccanizzazione innovativa a cura di Il Castagno da frutto*.
- Murolo Sergio, Vitali Alessandro, Francesca Carloni, L. Landi, G. Romanazaai, & Carlo Urbinati. (2024). *Protection from ink disease of Castanea sativa orchards: first steps of INKAS Project, the Rural Development Program for Marche region (central-eastern Italy)*.
- Oblinger, B. W., Bright, B. C., Hanavan, R. P., Simpson, M., Hudak, A. T., Cook, B. D., & Corp, L. A. (2022). Identifying conifer mortality induced by Armillaria root disease using airborne lidar and orthoimagery in south central Oregon. *Forest Ecology and Management*, 511. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120126>

- Pádua, L., Marques, P., Martins, L., Sousa, A., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Monitoring of chestnut trees using machine learning techniques applied to UAV-based multispectral data. *Remote Sensing*, *12*(18). <https://doi.org/10.3390/RS12183032>
- Perna Maria Rosaria. (2012). *Il castagno nell'Acquasantano e sulla montagna picena: alcune evidenze archivistiche*.
- Pezzi, G., Lucchi, E., Maresi, G., Ferretti, F., Viaggi, D., & Frascaroli, F. (2017). Abandonment or survival? Understanding the future of *Castanea sativa* stands in function of local attitude (Northern Apennine, Italy). *Land Use Policy*, *61*, 564–574. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.049>
- Prospero, S., Heinz, M., Augustiny, E., Chen, Y. Y., Engelbrecht, J., Fonti, M., Hoste, A., Ruffner, B., Sigrist, R., van den Berg, N., & Fonti, P. (2023). Distribution, causal agents, and infection dynamic of emerging ink disease of sweet chestnut in Southern Switzerland. *Environmental Microbiology*, *25*(11), 2250–2265. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16455>
- Radicioni, F., Stoppini, A., Marconi, L., & Tosi, G. (2023). LOW-COST MULTI-FREQUENCY GNSS RECEIVERS: PERFORMANCE EVALUATION FOR POSITIONING AND NAVIGATION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *48*(1/W3-2023), 167–174. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-167-2023>
- Rigling, D., & Prospero, S. (2018). *Cryphonectria parasitica*, the causal agent of chestnut blight: Invasion history, population biology and disease control. *Molecular Plant Pathology*, *19*(1), 7–20. <https://doi.org/10.1111/mpp.12542>
- Rigling, D., Schütz-Bryner, S., Heiniger, U., & Prospero, S. (2016). *Notizie per la pratica Cancro corticale del castagno Sintomatologia, biologia e misure di lotta*. [www.wsl.ch/publications](http://www.wsl.ch/publications)
- Romay-Río, M. F., Castedo-Dorado, F., Ayres, M. P., Prado, A. N., & Lombardero, M. J. (2024). Interactions between invasive pests and pathogens in a native chestnut forest. *NeoBiota*, *95*, 199–220. <https://doi.org/10.3897/neobiota.19.130190>
- Rosati, L., Di Pietro, R., & Blasi, C. (2005). *La vegetazione forestale della Regione Temperata del "Flysch del Cilento" (Italia meridionale)* (Vol. 42, Issue 2).
- Schiefer, F., Kattenborn, T., Frick, A., Frey, J., Schall, P., Koch, B., & Schmidlein, S. (2020). Mapping forest tree species in high resolution UAV-based RGB-imagery

- by means of convolutional neural networks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 170, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.015>
- Scotford, I. M., & Miller, P. C. H. (2005). Applications of spectral reflectance techniques in northern European cereal production: A review. In *Biosystems Engineering* (Vol. 90, Issue 3, pp. 235–250). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.010>
- Sebastiani, A., Bertozzi, M., Vannini, A., Morales-Rodriguez, C., Calfapietra, C., & Vaglio Laurin, G. (2024). Monitoring ink disease epidemics in chestnut and cork oak forests in central Italy with remote sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101329>
- Smigaj, M., Gaulton, R., Barr, S. L., & Suárez, J. C. (2015). UAV-Borne thermal imaging for forest health monitoring: Detection Of disease-induced canopy temperature increase. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3W3), 349–354. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-349-2015>
- Spierenburg, I. (2024). *Geo-information Science and Remote Sensing The use of UAV photogrammetry compared to LiDAR for forest reconstruction A comparison of different UAV photogrammetry protocols.*
- Turchetti, T., & Maresi, G. (2006). Advances in horticultural science - 2006 - 1 - Management of Diseases in Chestnut Orchards and Stands : A Significant Prospect. In *Adv. Hort. Sci* (Vol. 20, Issue 1).
- Vannini, A., Natili, G., Anselmi, N., Montaghi, A., & Vettrai, A. M. (2010). Distribution and gradient analysis of Ink disease in chestnut forests. *Forest Pathology*, 40(2), 73–86. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00609.x>
- Vannini, A., Natili, G., Thomidis, T., Belli, C., & Morales-Rodriguez, C. (2021). Anthropogenic and landscape features are associated with ink disease impact in Central Italy. *Forest Pathology*, 51(6). <https://doi.org/10.1111/efp.12722>
- Vannini, A., & Vettrai, A. M. (2014). *Ink disease in chestnuts: Impact on the European chestnut SEE PROFILE.* <https://www.researchgate.net/publication/228489154>
- Vannini, A., Vettrai, A. M., Fabi, A., Montaghi, A., Valentini, R., & Belli, C. (2005). Monitoring ink disease of chestnut with the airborne multispectral system A.S.P.I.S. *Acta Horticulturae*, 693, 529–534. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.693.68>
- Varricchione, M., Laura Carranza, M., D'Angeli, C., Carla de Francesco, M., Innangi, M., Santoianni, L. A., & Stanisci, A. (2024). Exploring the distribution pattern of

- native and alien forests and their woody species diversity in a small Mediterranean city. *Plant Biosystems*. <https://doi.org/10.1080/11263504.2024.2415613>
- Waldboth, M., & Oberhuber, W. (2009). Synergistic effect of drought and chestnut blight (*Cryphonectria parasitica*) on growth decline of European chestnut (*Castanea sativa*). *Forest Pathology*, 39(1), 43–55. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2008.00562.x>
- Wołk, K., & Tatara, M. S. (2024). A Review of Semantic Segmentation and Instance Segmentation Techniques in Forestry Using LiDAR and Imagery Data. *Electronics*, 13(20), 4139. <https://doi.org/10.3390/electronics13204139>
- Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., & Huang, W. (2008). Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8–9), 1230–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.005>
- Yakar, M., Yilmaz, H. M., & Mutluoglu, O. (2014). Performance of Photogrammetric and Terrestrial Laser Scanning Methods in Volume Computing of Excavtion and Filling Areas. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(1), 387–394. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0853-1>
- Yu, R., Luo, Y., Zhou, Q., Zhang, X., Wu, D., & Ren, L. (2021). Early detection of pine wilt disease using deep learning algorithms and UAV-based multispectral imagery. *Forest Ecology and Management*, 497. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119493>
- Zhao, P., Gao, L., & Gao, T. (2020). Extracting Forest Parameters based on Stand Automatic Segmentation Algorithm. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58494-6>
- Zhou, Q. (2017). Digital Elevation Model and Digital Surface Model. In *International Encyclopedia of Geography* (pp. 1–17). Wiley.