DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

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

RAPPRESENTAZIONE 3D DI UN CASTAGNO MONUMENTALE CON TECNICHE GEOMATICHE INTEGRATE

3D RENDERING OF A MONUMENTAL CHESTNUT WITH INTEGRATED GEOMATIC TECHNIQUES

TIPO TESI: Sperimentale

Tesi di:
Pier Giorgio Fioravanti
matricola 1092846

Relatore:
Prof. Roberto Pierdicca

Correlatori:
Dott. Alessandro Vitali
Ing. Stefano Chiappini

ANNO ACCADEMICO 2020-2021
SESSIONE STRAORDINARIA FEBBRAIO 2022

INDICE

1. INTRODUZIONE

1.1. Il castagno (*Castanea sativa* Mill.).....pag. 3

1.1.1. Distribuzione geografica e descrizione botanica……pag. 3

1.1.2. Il castagno nelle Marche……pag. 8

1.2. Obiettivi e finalità principali della tesi……...pag. 11

1.3. Definizione e requisiti principali dell'Albero Monumentale……pag. 12

1.3.1. Normative vigenti degli Alberi Monumentali Nazionali e Regionali……pag. 17

1.3.2. Il censimento degli alberi monumentali in Italia e nelle Marche (FVM)……pag. 21

1.3.3. Albero monumentale come pianta habitat: uso e definizione del Valore Ecologico……...pag. 25

1.4. Inquadramento delle tecniche geomatiche utilizzate…pag. 28

1.4.1. Il Sistemi di Posizionamento e Navigazione Satellitare (GNSS)...pag. 28

1.4.2. Nozioni di fotogrammetria aerea e terrestre……...pag. 33

1.4.3. Inquadramento sul Mobile Laser Scanner……..pag. 39

2. MATERIALI E METODI

2.1. L'Area di studio……pag. 44

2.2. Rilievi in campo ed elaborazione dei dati scaturiti……pag. 46

2.2.1. Fotogrammetria da drone……pag. 49

2.2.2. Fotogrammetria terrestre…… pag. 51

2.2.3. Nuvola di punti Kaarta-Stencil 2……..pag. 53

3. RISULTATI

3.1. Fotogrammetria da drone…….....pag. 55

3.2. Fotogrammetria terrestre……...pag. 62

3.3. Nuvola di punti Kaarta-Stencil 2……..pag. 64

3.4. Unione degli output e rappresentazione finale…….pag. 68

4. DISCUSSIONI E CONCLUSIONI……...pag. 73

5. BIBLIOGRAFIA……pag. 78

6. SITOGRAFIA……..pag. 81

1. INTRODUZIONE

1.1. Il castagno (*Castanea sativa* Mill.) albero monumentale

1.1.1. Distribuzione geografica e descrizione botanica

Il castagno (*Castanea sativa* Mill.) è un'angiosperma monoica appartenente alla famiglia delle *Fagaceae*, facente a sua volta parte dell'ordine delle *Fagales*.

Tale specie prende la propria etimologia dai termini greci "*Kastanáia*" (un villaggio dell'antica Grecia famoso per le piante presenti) e il termine "*satum*", il quale significa "seminato, piantato" in greco antico. (Bartolucci et al. 1998; Pignatti 1982).

È una specie moderatamente termofila e mesofila, occupa una distribuzione ampia, interessando aree come il Sud Europa (Spagna, Italia, Balcani, Isole del Mediterraneo) e continente nord-africano (Marocco) fino a toccare ad ovest il Belgio e l'Inghilterra, mentre ad est il continente asiatico (Nord Est della Turchia, Armenia, Georgia, Azerbaijan, Siria), occupando quasi interamente l'Europa meridionale, confinando a sud con Africa nord-occidentale Anatolia, fino a raggiungere il Caucaso, a nord fino all'arco alpino e a ovest i Pirenei.

A livello altitudinale, *Castanea sativa* interessa il piano collinare e alto collinare, compreso tra i 400 e i 1400 metri (fattore dipendente dalla latitudine).

L'areale di distribuzione del castagno in Europa si estende per circa 2.5 milioni di ettari; tuttavia, la sua diffusione non è continua e costante, ma "concentrata" in determinate zone, come ad esempio Italia, Francia, Spagna, Portogallo e Svizzera. (Avanzato et al. 2009).

La sua ampia diffusione e gestione attiva dall'uomo hanno portato all'insediamento della specie oltre al limite della sua originaria nicchia ecologica, fatto che ad oggi rende *Castanea sativa* risalire all'originale distribuzione ed ecologia (Tinner et al. 2000; Rubio et al. 2002).

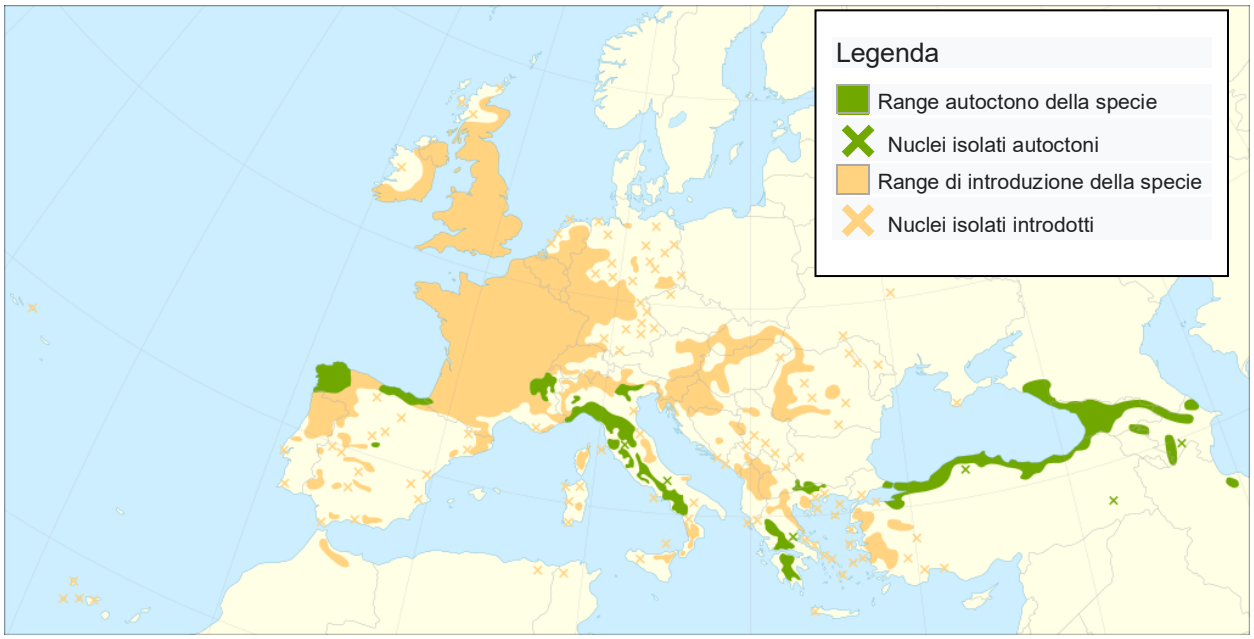


Figura 1.1.1.1. - Areale di Castanea sativa in Europa.
FONTE: EUFORGEN, 2017

In Italia, *Castanea sativa* vegeta in tutto il piano medio montano dell'Appennino e delle isole e al nord, dal piano basale alle Prealpi e alcune valli alpine, è la specie indicatrice della zona fitoclimatica denominata dal Pavari *Castanetum*.

Il suo limite sono le basse temperature e la siccità, preferisce un clima suboceanico e rifugge dalla continentalità.

Figura 1.1.1.2. - Distribuzione di Castanea sativa in Italia
FONTE: ActaPlantarum

Castanea sativa è una specie decidua che vegeta in ambienti medio-temperati; con un range di temperature tra 8 e 15 gradi, con temperatura media mensile intorno ai 10°C.
La specie ha bisogno di precipitazioni comprese tra i 600 e 800 mm; difatti in estate mostra sintomi di sofferenza, data la sua elevata sensibilità alla siccità estiva, scaturita dalla combinazione di alte temperature e assenza di precipitazioni (Conedera et al, 2003; Lemaire, 2008).
Entra nella composizione di boschi misti o talvolta puri, è frequente nei pascoli alberati e nelle brughiere, prediligendo suoli ben drenati, acidofili/neutrofili e condizioni climatiche con buon contributo idrico dal piano collinare a quello montano. La specie ha accrescimento piuttosto rapido, tuttavia è molto longeva (può raggiungere i mille anni di età) e ha spiccata proprietà pollonifera, "ringiovanendo" in condizioni di penombra, ma ha bisogno di luce per avviare il suo accrescimento nella sua fase iniziale.
La specie è sensibile al gelo tardivo e molto adattata alla perturbazione del fuoco (Tinner, et al., 2000) e a livello di struttura verticale, lo ritroviamo o come specie dominante, oppure consociato con comunità arboree, come ad esempio Querce, Faggi e Tassi.

Figura 1.1.1.3. – Fusto, foglia ed infiorescenze di Castanea sativa
FONTE: docplayer.it

A livello botanico-sistematico, *Castanea sativa.* è una specie decidua dal portamento maestoso, la quale in condizioni ottimali di bosco può raggiungere età avanzate, altezze fino ai 30 – 35 metri circa, e diametri al fusto di circa 6 metri.
Allo stadio giovanile, il castagno è caratterizzato da una corteccia inizialmente liscia, di colore olivastro, con caratteristiche lenticelle che si allungano fino a 1 cm; nel tempo assume

un colore grigiastro, con un ritidoma color grigio-bruno a lunghi solchi verticali, assumendo infine un aspetto più cordonato e spiralato.

I rami dell'anno sono normalmente cilindrici, ma a volte anche angolati, specialmente nei polloni in forte accrescimento, mentre le foglie sono semplici, alterne e disposte a spirale, con un contorno ellittico-lanceolato e margine seghettato, caratterizzate da una pagina superiore liscia e lucida in estate, con nervature rilevate di consistenza coriacea e una più chiara pagina inferiore. La fogliazione è tardiva, in quanto avviene durante i mesi di aprile e maggio, mentre la fioritura avviene tra fine giugno a luglio.

La specie è monoica con infiorescenze ad amento miste: i fiori maschili sono riuniti in glomeruli ascellari, contenenti spesso sette fiori ciascuno, sviluppatosi alla base del ramo nuovo dell'anno, mentre i fiori femminili si compongono di un perianzio esamero e tomentoso con ovario infero a 6-9 carpelli e altrettanti stili rigidi e pelosi alla base.

La differenziazione delle infiorescenze ha già inizio 30-40 gg dopo la ripresa vegetativa (Pisani e Rinaldelli; 1990) in primavera o all'inizio dell'estate dell'anno precedente, mentre il periodo di fioritura e continuo durante l'estate.

L'impollinazione è principalmente anemofila, ma la presenza di nettari (sei), derivati dagli abbozzi del pistillo e l'odore delle infiorescenze maschili fa sì che api, Coleotteri e Ditteri li frequentino assiduamente; tuttavia, non si tratta di un'impollinazione insetto dipendente in quanto i fiori femminili sono privi di attrattivi e il contatto con questi ultimi da parte di insetti è casuale.

Il frutto di *Castanea sativa* è costituito da un achenio avvolto in un riccio, di diametro di 5-10 cm; esso è costituito da un sapore più o meno dolce ed è edule, da cui l'epiteto specifico "sativa" fa riferimento all'appetibilità del frutto.

Il Castagno forma un legno a porosità anulare, mediamente pesante compatto ed elastico, differenziato in alburno chiaro, giallognolo e durame più scuro, marrone chiaro che assomiglia a quello delle querce ma senza raggi midollari visibili, che sono finissimi numerosi ed uniseriati per cui poco visibili ad occhio nudo. Dato il suo carattere polivalente, viene da sempre coltivato ed utilizzato in diversi sistemi di gestione, in base al prodotto e servizio richiesto tuttavia, si ricava solitamente legname di dimensioni e usi diversi, ricavandone (a seconda degli assortimenti richiesti) paleria, travatura, tavolame, botti, mobili rustici e meno legna da ardere.

Castanea sativa è molto sensibile ad alcuni patogeni fra i quali: il ficomicete *Phytophtora cambivora* (mal d'inchiostro), l'ascomicete *Cryphonectria parasítica* (agente del cancro della

corteccia) e la vespa galligena *Dryocosmus kuriphilus Yasumatsu***,** quest'ultima introdotta in Italia nel 2002.

Tali malattie possono risultare invalidanti, o in condizioni peggiori mortali, in quanto:

- la **Phytophtora cambivora** attacca principalmente la chioma dell'individuo, provocandone un rallentamento della crescita e mostrando una chioma molto più rada, data la filloptosi anticipata rispetto ad un individuo più sano (visibilmente le foglie si presentano più piccole e clorotiche, le branche appaiono più corte e la fruttificazione è concentrata più in sommità della chioma, costituendo ricci più piccoli della norma),
- la **Cryphonectria parasitica** si manifesta in corrispondenza dei giovani rami e dei polloni, sulla cui superficie emergono macchie irregolari, color rosso mattone, che gradualmente si allargano; per mezzo di tali macchie la corteccia tende a rigonfiarsi fino a lacerarsi, lasciando intravedere il tessuto morto sottostante di colore giallastro. A livello sintomatico, la malattia assume un andamento diverso a seconda di numerosi fattori, ovvero nei castagni da frutto si ha dapprima la morte dei rami apicali, cui segue quella delle branche più grosse e infine, raggiungendo punti "fatali", determinanti la morte dell'individuo, mentre nei castagneti gestiti a ceduo le piante vengono colpite in maniera meno grave, acquisendo progressivamente una certa resistenza al parassita, non portando così alla morte, ma costituendo "serbatoi" di diffusione della malattia stessa.

Per risolvere i problemi parassitari del castagno sono state introdotte due specie orientali: *Castanea crenata* (castagno giapponese) e il *Castanea mollissima* (castagno cinese) che si dimostrano più esigenti del castagno europeo, risentendo di climi freddi e gelate tardive e tollerando male l'aridità. Tuttavia, queste introduzioni hanno portato alla diffusione di una cinipide asiatica, ***Dryocosmus kuriphilus Yasumatsu***, il quale si è diffuso molto rapidamente e sta creando seri problemi alla produzione di castagne. Quest'ultimo è un parassita introdotto nel 2002 in Piemonte e ad oggi si sta diffondendo in altre regioni, anche se limitato con successo dall'insetto parassitoide *Torymus sinensis*, il quale applica controllo biologico alla specie.

1.1.2. Il Castagno nelle Marche

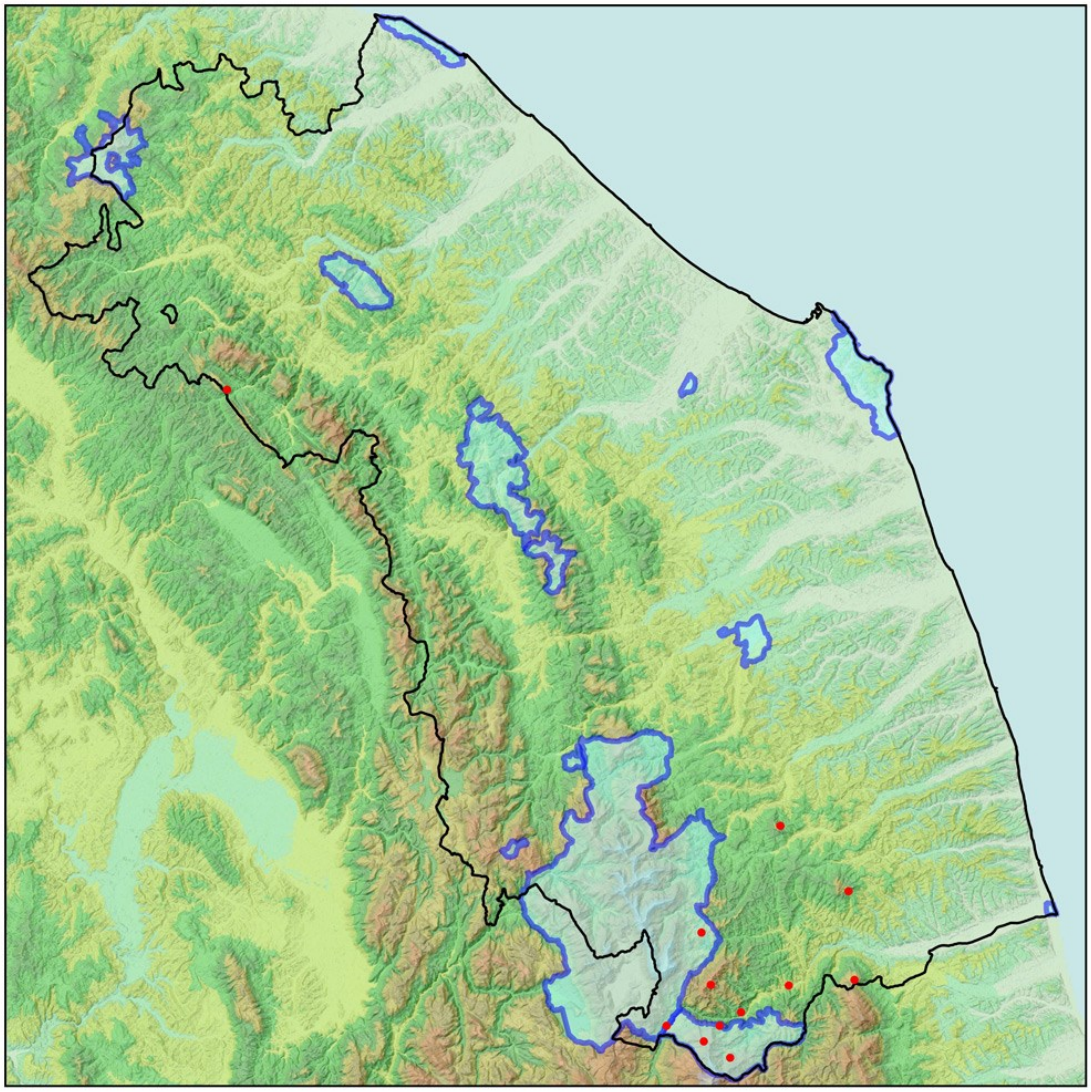


Figura 1.1.2.1. – Delimitazione delle aree protette con relativa presenza del castagno
FONTE: Rete Natura 2000 Marche

Nelle Marche i castagneti appartengono alle associazioni *Cardamino kitaibelii-Castaneetum sativae* (Taffetani F., 2000) dell'ordine *Fagetalia sylvaticae* (Pawl. et al., 1928), Cyclamino hederifolii-Castaneetum sativae (Allegrezza 2003) e *Melampyro italici-Castaneetum sativae* (Hruska, 1988), dell'ordine *Quercetalia pubescenti-petraeae* (Klika 1933), classe Querco-Fagetea (Br.-Bl. & Vlieger in Vlieger, 1937) e alla categoria forestale **Habitat 9260 – Boschi di *Castanea sativa***.

La diffusione del castagno nell'Appennino è limitata da fattori stazionali e pedologici, in quanto la specie esige suoli profondi con buona disponibilità idrica, con un range altitudinale compreso fra 400 e 1400 metri, in corrispondenza di substrati arenacei e pelitico-arenacei;

difatti, li ritroviamo diffusi a frammenti lungo la dorsale umbro-marchigiana e sui massicci dei Monti Sibillini e dei Monti della Laga, data non soltanto la loro struttura e stadio evolutivo, ma la pregressa vicenda di abbandono della coltura da frutto, vasto fenomeno iniziato fin dal secolo scorso in seguito al mutare delle condizioni socioeconomiche.

Nelle Marche, più della metà dei castagneti nelle Marche sono localizzati sui Monti della Laga, nell'alta Valle del Tronto; secondo i dati registrati dall'IPLA nel 2001, essi occupano una superficie forestale regionale di circa **4600 ha**, della quale quasi un terzo (circa 1145 ha) è costituita dai castagneti da frutto prativi, raggruppabili nella tipologia forestale **CA10**, mentre la maggior parte (circa 3160 ha) sono castagneti neutrofili gestiti a ceduo o a struttura irregolare (dati i terreni sciolti costituenti la zona), ricadendo nella tipologia forestale **CA20**. Infine, i restanti 186 ha rappresentano un popolamento di *Castanea sativa* acidofilo, gestito a ceduo e struttura irregolare (tipologia forestale **CA30**).

L'immagine riportata rappresenta un tematismo delle tipologie forestali descritte e relativa distribuzione nell'alta valle del Tronto, dove i castagneti sono maggiormente concentrati nella regione.

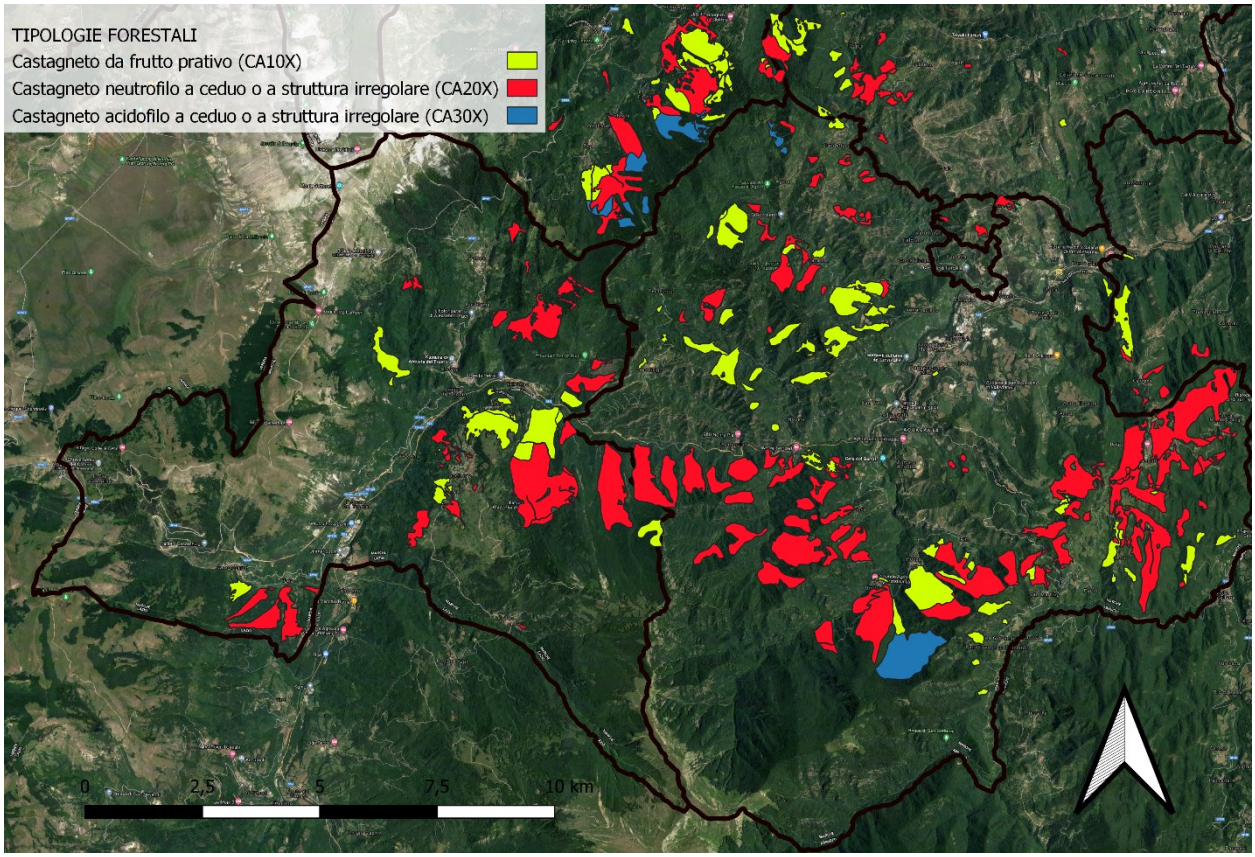


Figura 1.1.2.2. - Distribuzione delle tipologie forestali di castagno nell'alta valle del Tronto.

La maggior parte della superficie a castagno è rimasta di dominio della stessa specie, sia nella forma di cedui che di castagneti abbandonati ed invasi da diverse latifoglie autoctone (alle quote superiori lo si può ritrovare consociato con la faggeta acidofila); a questo proposito occorre sottolineare che il castagno in boschi naturaliformi avrebbe un ruolo accessorio e non di specie costruttrice di popolamenti, anche se non mancano esempi con rinnovazione affermata che presuppongono la possibilità di successione a se stessa (versanti meridionali della Valle del Tronto).

La ceduazione infatti, qualora praticata, favorisce la specie che, grazie alla sua facoltà pollonifera ed alla rapida crescita iniziale, tende a sopraffare le altre specie invadenti o consociate, impedendo l'evoluzione verso altre cenosi. All'opposto, l'abbandono determina un più o meno rapido passaggio verso altri tipi, palesandone la derivazione antropica, così, in funzione delle esigenze ecologiche delle singole specie climaciche, si può osservare la naturale tendenza all'evoluzione verso popolamenti misti con carpino nero, faggio, pioppo tremolo e, in modo assai più localizzato, cerro, rovere e roverella.

Oltre il fenomeno dell'abbandono, notevole rilevanza assumono le sue problematiche fitosanitarie, date dal mal dell'inchiostro e dal cancro della corteccia, difatti la Regione ha e sta attuando tutt'oggi le seguenti strategie di prevenzione e conservazione, atte a proteggere la specie:

- Approfondimenti sugli aspetti strutturali, fitosanitari e sulla biodiversità dei castagneti.
- Lotta ai patogeni ed innesto con varietà resistenti nei castagneti da frutto.
- Gestione finalizzata alla conservazione della diversità floristica tipicamente forestale del sottobosco.
- Adozione di specifici piani di assestamento forestale da redigersi per ambiti omogenei ed unitari.
- Definizione delle linee guida per la conversione a fustaia e interventi selvicolturali di miglioramento strutturale che promuovano la massima diversificazione floristico-strutturale.
- Definizione di un quadro generale di indirizzi e prescrizioni, finalizzati all'adeguamento delle norme regolamentari esistenti.
- Introduzione di misure per la regolamentazione delle attività venatorie e di quelle per la raccolta delle risorse del bosco.
- Promozione di tecniche di gestione forestale a minor impatto.
- Regolamentazione del pascolo in bosco.

1.2. Obiettivi e finalità principali della tesi

Il lavoro di tesi sperimentale effettuato consiste nella rappresentazione visuale di un individuo di castagno secolare (*Castanea sativa*), mediante l'uso di tecniche geomatiche integrate con le Scienze Forestali, rappresentandone le "componenti" come la chioma mediante l'uso della fotogrammetria aerea (drone), il fusto mediante fotogrammetria terrestre (fotocamera reflex) e la ricostruzione completa della sua nuvola di punti per mezzo del Mobile Laser Scanner Kaarta-Stencil 2.

Le operazioni effettuate sono state inizialmente svolte mediante rilievi in campo, elaborate successivamente tramite software ad hoc, come Agisoft Metashape e CloudCompare.

Finalità principale del lavoro di tesi consiste nella rappresentazione del castagno analizzato mediante l'integrazione di due discipline le quali hanno consentito l'effettuazione delle operazioni effettuate in campo (in estate ed in inverno) ed in ambiente informatico, unendone i rispettivi output prodotti, creando infine il modello acquisito: la **geomatica**, la quale ha consentito la rappresentazione finale dell'individuo mediante la ricostruzione della sua nuvola di punti, permettendone una corretta rappresentazione e l'**ecologia forestale**, la quale ha permesso una preliminare analisi strutturale e dendrometrica, ricavandone i primi dati metrici (altezza, diametro ed età), di complemento per le successive fasi del lavoro e per la definizione del castagno stesso come potenziale albero monumentale e patriarca.

La sinergia prodotta da ciascun ricercatore ha consentito quindi facilitazione, rapidità, uniformità ed accuratezza sia durante l'esecuzione dei rilievi in campo sia nell'elaborazione finale del castagno su software.

Grazie alle tecniche geomatiche integrate nelle scienze forestali, il lavoro svolto ha costituito sia un valore aggiunto in entrambe le materie, sia un trampolino di lancio per future analisi riguardanti gli alberi monumentali e i patriarchi ad essi integrati, sotto una scala individuale o della dinamica di popolamento.

1.3. Definizione e requisiti principali dell'albero monumentale

Il MIPAAF (Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali), definisce l'**Albero Monumentale** nell'articolo 7 della **Legge n. 10/2013** "*Norme sullo sviluppo del verde urbano*", come:

- l'albero isolato o facente parte di formazioni boschive naturali o artificiali, ovunque ubicato, che costituisca raro esempio di maestosità e/o longevità e che mostri un particolare pregio naturalistico per rarità della specie o che costituisca un preciso riferimento ad eventi o memorie rilevanti dal punto di vista storico, culturale, documentario e delle tradizioni locali;
- i filari e le alberate di particolare pregio paesaggistico, storico e culturale, ivi compresi quelli inseriti nei centri urbani;
- gli elementi inseriti in particolari complessi architettonici di importanza storica e culturale, quali ad esempio ville, monasteri, chiese, orti botanici e residenze storiche private.

In relazione ai punti fondamentali sopracitati, solo le piante arboree possono rientrare (salco particolari eccezioni come la vite), non ammettendo quindi arbusti, frutici, suffrutici, a meno che essi non si manifestino con un habitus arboreo o caratteristiche di particolare longevità.

In base all'origine e diffusione, rientrano nella definizione di "alberi monumentali" sia gli esemplari appartenenti a specie naturalmente presenti in una determinata area geografica nella quale si sono originate o sono giunte senza l'intervento diretto, intenzionale o accidentale dell'uomo (ovvero le specie autoctone) sia quelli appartenenti a specie alloctone, ivi comprese le esotiche ed invasive.

Riguardo alla forma di coltivazione si considerano sia gli esemplari governati ad altofusto, sia a ceduo, in quanto presentino un numero variabile di polloni originatisi da ceppaia, nonché gli individui sottoposti a capitozzature più o meno ripetute e a distanza variabile dal suolo, quelli trattati a sgamollo nonché gli alberi giacenti al suolo ma tuttora vegetanti (esclusivamente in bosco).

I requisiti i quali attribuiscono all'albero in questione il carattere di monumentalità sono stati definiti nel **Decreto attuativo MIPAAF 23 ottobre 2014**, incentrandosi su:

• **età e dimensioni**. Il criterio dimensionale fa riferimento a tre parametri: la *circonferenza del fusto* ad un'altezza a petto d'uomo pari a 1,30 metri, *l'altezza dendrometrica*, *l'ampiezza e proiezione della chioma*, mentre per l'età non sono previsti valori soglia, in quanto ciascuna

specie tiene conto della propria potenzialità biologica in termini di longevità e in quale condizione essa vegeta, così come lo si può desumere dalla letteratura botanica.

• **forma e portamento**: tale requisito viene richiesto sia per motivazioni produttive sia per ragioni estetiche, atto anche a definire l'aspetto biologico dell'albero. Il criterio morfologico è da tenere in considerazione qualora ci si trovi di fronte ad un albero la cui conformazione della chioma rispecchia il potenziale di espansione della specie a cui appartiene (nel caso ci fosse l'assenza di concorrenti), o quando, nel caso di esemplari sottoposti ad azioni climatiche particolari, si voglia evidenziare la singolare conformazione assunta dal tronco, dalla chioma e dalle radici, o quando, ancora, nel caso di esemplari che siano stati oggetto di coltivazione (es. potature), si voglia evidenziare la bontà dell'intervento colturale e la particolare forma assunta dalla chioma a seguito di questo.

• **valore ecologico**: esso fa da riferimento alla probabilità che un albero ha di ospitare al suo interno e specie di floristiche e faunistiche meritevoli di tutela, in quanto rare e in pericolo di estinzione. Tale requisito viene maggiormente rispettato da un albero in stadio di senescenza, in quanto rappresenta un vero e proprio habitat per diverse categorie animali (entomofauna, avifauna, micro-mammiferi), le quali richiedendo nicchie trofiche speciali, si insediano nelle numerose "entità discrete" presenti (es. cavità vuote, piene di acqua, piene di rosura, fori, essudati, corteccia sollevata, ramificazione avventizia, corpi fruttiferi di funghi), approfittando, se possibile della presenza di legno morto.

• **rarità botanica**. Il criterio considera sia la rarità botanica assoluta che relativa, in termini sia di specie che di entità intraspecifiche. Ai fini della valutazione della rarità botanica si considerano anche quelle estranee all'area geografica di riferimento, quando queste siano di una certa rarità nel nostro Paese.

• **architettura vegetale**: fa riferimento a particolari esemplari arborei organizzati in modo da costituire vere e proprie architetture vegetali sulla base di un progetto unitario e riconoscibile, in sintonia o meno con i manufatti architettonici. Tale valore è facilmente riscontrabile nelle ville e nei parchi di notevole interesse storico e architettonico, laddove spesso si rinvengono, oltre che esemplari singoli, anche alberi disposti in gruppi riconoscibili, filari o particolari composizioni. Esso fa riferimento anche ad architetture vegetali di interesse rurale, non necessariamente legate all'architettura edile.

• **pregio storico/culturale/religioso**: trattasi di esemplari non necessariamente secolari, ma sono legati a particolari eventi storici, a dei personaggi, tradizioni, leggende, fatti religiosi o

che sono stati celebrati dall'arte. Tale valenza, spesso riconosciuta a livello locale, si tramanda per tradizione orale oppure è riscontrabile in iconografie e documenti.

• **pregio paesaggistico**: viene attribuito ad un albero o ad un insieme di alberi quando vengono soddisfatti l'aspetto percettivo e/o quello legato alla presenza incisiva dell'opera dell'uomo come fautore del paesaggio e come fruitore dello stesso. Nell'utilizzo di tale criterio si valuta, da una parte, se il soggetto abbia un peso significativo nella percezione del paesaggio tale da "segnalarlo", renderlo unico, riconoscibile, oltre che apprezzabile, e/o, dall'altra, se esso costituisca identità e continuità storica di un luogo, punto di riferimento topografico, motivo di toponomastica.

Il concetto di albero monumentale, quindi, costituisce non soltanto un individuo unico e peculiare a livello anatomico, strutturale e funzionale, ma assume spessore in contesto sociale, economico, storico e geografico.

Nonostante sia giunto fino a noi grazie alle proprie forze o per mezzo dell'aiuto dell'uomo, l'albero monumentale si trova spesso a vivere in una condizione di delicato equilibrio con l'ambiente che lo circonda: il raggiungimento ormai irreversibile di uno stadio di senescenza, con conseguente riduzione della funzionalità, la maggiore ricettività nei confronti degli agenti di danno biotici, le condizioni di stress prolungato in ambiente urbano, sono elementi che influiscono negativamente sulla sua sopravvivenza, nei confronti della quale la sola tutela impostata sul vincolo non basta.

Fay (1997) definisce il ciclo di vita di un albero dal punto di vista della funzionalità e contributo in termini ecologici.

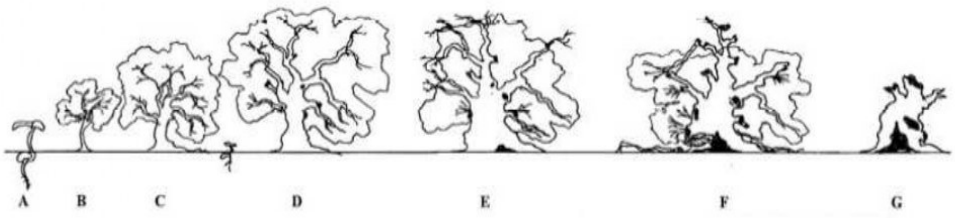


Figura 1.3.1. - Il ciclo di vita di un albero dal punto di vista della funzionalità e contributo in termini ecologici (Fay,1997)

Tale immagine riporta i vari stadi di crescita dell'individuo arboreo, caratterizzato da un'elevata vitalità e crescita delle radici (stadio A-B), culminando fino ad un picco di sviluppo della chioma (stadio C-D), calando poi in uno stadio di invecchiamento, nel quale decrescono le attività funzionali e prestazioni meccaniche dell'individuo, data l'iniziale decomposizione del legno, ma privilegiando sempre più comunità di mesofauna (insetti e

funghi) (stadio E-F), giungendo infine ad uno stadio irreversibile di declino e morte (stadio G) nel quale si ha il massimo ricircolo dei nutrienti e un massimo contributo in termini ecologici.
È necessaria quindi, una gestione attiva e oculata degli alberi monumentali, cercando nel mentre di comprendere le loro esigenze, le loro potenzialità e le loro risposte, mantenendo inalterati per quanto possibile funzionalità e morfologia ma anche i caratteri del sito che li accoglie e che essi stessi contribuiscono a creare e mantenere.
Nel programmare gli interventi di gestione dell'albero monumentale, è necessario innanzitutto conoscere per ciascuno la loro zona di protezione dell'albero (**Tree protection zone**), ovvero quell'area fisica ben delineata, di rispetto, atta a tutelare la zona dell'apparato radicale deposto a garantire vitalità e stabilità strutturale all'albero.
Nel confermare l'opportunità di un'appropriata analisi ecologica al fine di individuare e caratterizzare la zona di protezione, la definizione della stessa, generalmente adottata e in via indicativa, è quella di un'area pressoché circolare, avente diametro pari almeno al diametro medio della proiezione della chioma dell'albero. Indipendentemente dalla specie, per gli alberi monumentali tale zona non potrà mai essere inferiore a un'area di raggio pari a **20 metri** partendo dall'esterno del fusto dell'albero.
Se durante la definizione dell'area fossero presenti manufatti, risulta importante il legame funzionale che l'individuo ha costruito con questi: se si ritiene che l'albero si sia adattato al condizionamento imposto da tali ingerenze, raggiungendo un certo equilibrio, rimuoverle può rappresentare un danno, soprattutto a livello statico. In tutti gli altri casi va da sé che la rimozione dei conflitti con impianti tecnologici, manufatti e pavimentazioni, principali cause di una prematura morte di molti grandi alberi, sia azione opportuna.
Il rispetto dello spazio minimo vitale, importante per tutti gli alberi, lo è ancor di più se si considera l'albero senescente, che al contrario di quello giovane e maturo non sopporta trattamenti scorretti e variazioni ambientali.

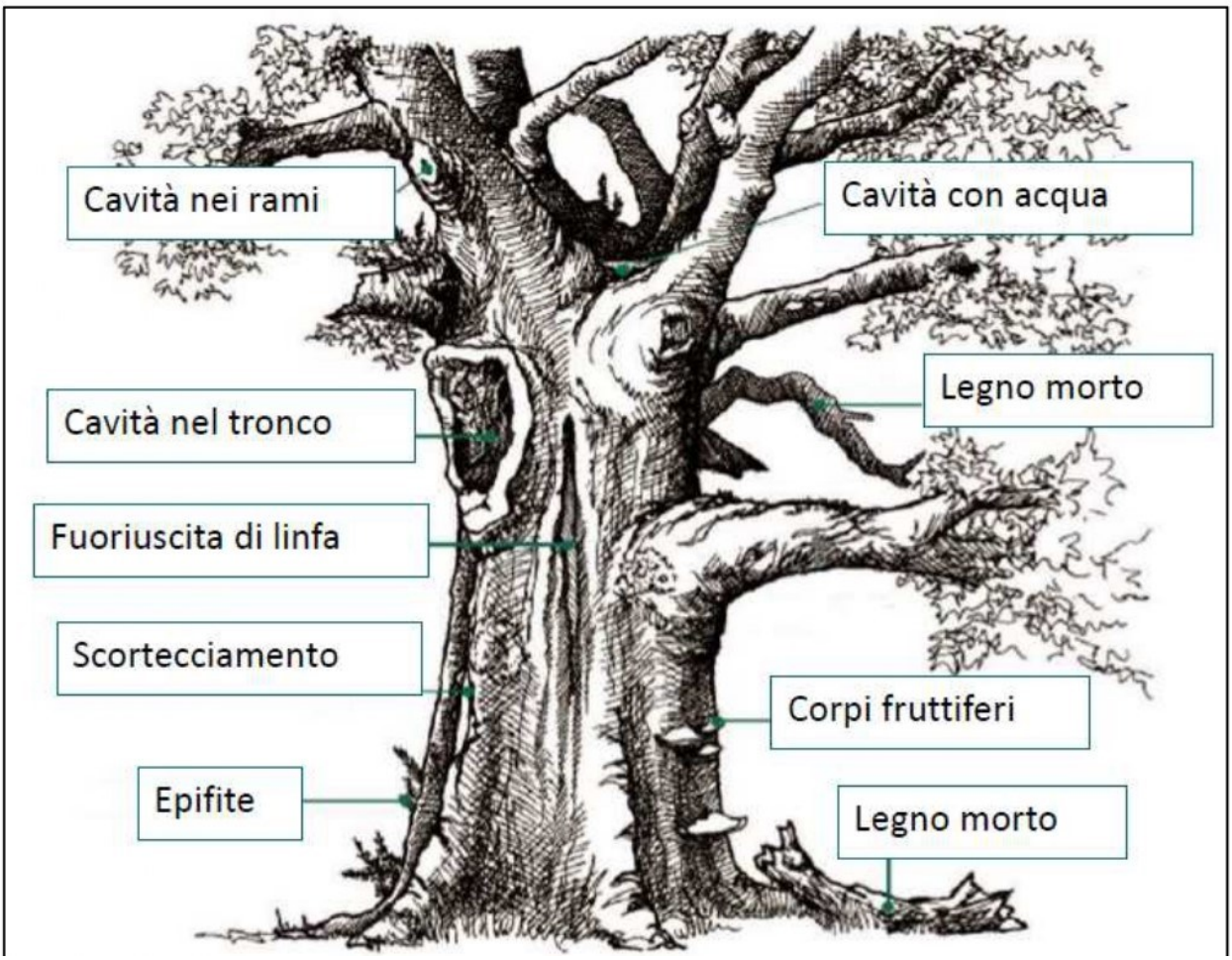


Figura 1.3.2.
FONTE: linee guida per gli interventi di cura e salvaguardia degli alberi monumentali

1.3.1. Normative vigenti degli Alberi Monumentali Nazionali e Regionali

Nel seguente paragrafo vengono riportate le principali normative, le quali definiscono il concetto e gestione di albero monumentale in Italia, in un contesto dapprima nazionale, poi regionale.

NORMATIVE PRINCIPALI NAZIONALI

Legge n.10/2013 *"Norme sullo sviluppo degli spazi verdi urbani":* tale legge costituisce il punto saliente della definizione di "albero monumentale" e del verde urbano in Italia, si veda in particolar modo l'articolo 7 "*Disposizioni per la tutela e la salvaguardia degli alberi monumentali, dei filari e delle alberate di particolare pregio paesaggistico, naturalistico, monumentale, storico e culturale*".

L'articolo 7 c.1 "*definizione*" fornisce la definizione ed i requisiti minimi che l'albero monumentale deve possedere (come riportato nel capitolo soprastante)

L'articolo 7 c.2 "*attuazione*" definisce i principi e i criteri direttivi per il censimento degli alberi monumentali ad opera dei comuni, con redazione ed aggiornamento degli elenchi da parte dei comuni stessi e delle regioni, con l'istituzione dell'elenco degli alberi monumentali d'Italia, alla cui gestione provvede il Corpo forestale dello Stato (ad oggi i Carabinieri forestali, al seguito del *Dlgs 177/2016*), con aggiornamenti periodici e messa a disposizione alla collettività ed amministrazioni pubbliche.

L'articolo 7 c.3 "ruoli delle istituzioni" concerne il recepimento da parte delle Regioni della raccolta dei dati ottenuti dal censimento (operato dai comini) e sulla base di ciò, redigere fli elenchi regionali e trasmettere i risultati al Corpo forestale dello Stato (Carabinieri forestali).

Decreto attuativo interministeriale MIPAAF 23/10/2014 "*Istituzione dell'elenco degli alberi monumentali d'Italia e principi e criteri direttivi per il loro censimento*", il quale istituisce ufficialmente l'elenco degli Alberi Monumentali d'Italia (art.2) e il censimento degli alberi monumentali italiani (art.3). In particolar modo, l'articolo 3 comma 1 impone uno scadenziario sia ai comuni che alle Regioni, riguardanti l'effettuazione del censimento degli alberi monumentali ricadenti nel territorio di competenza (effettuato dai comuni, ma coordinati dalle Regioni; mentre l'articolo 3 comma 2 conferma quanto esplicitato nel comma precedente, stabilendone le modalità operative, mediante ricognizione, rilevazione diretta e finale operazione di schedatura.

L'articolo 6 commi 1 - 3, esplicano la correttezza dell'elenco nazionale finale, il quale deve garantire omogeneità nei contenuti e comparabilità tra dati ed informazioni, mentre per le modalità operative (operazione di censimento in campo), sono predisposte delle apposite schede (schede di segnalazione) di segnalazione dell'albero monumentale (o formazione vegetale monumentale) da utilizzarsi nel rilievo di campagna da utilizzare in campo. Di seguito viene riportata la prima pagina di una scheda standard di segnalazione dell'albero (o formazione vegetale) monumentale.

Una volta completata l'attività di censimento, l'articolo 7 comma 1 prevede che ciascun comune debba trasmettere i risultati alla propria Regione, mediante la stesura di un elenco, il quale dovrà essere corredato della scheda di identificazione e relativa documentazione fotografica; infine, sarà la Regione stessa a redigere un apposito elenco regionale, il quale dovrà poi essere inviato al comando dei Carabinieri Forestali, con finale pubblicazione (articolo 8 comma 1).

L'articolo 9 "*tutela e salvaguardia*", ribadisce che l'abbattimento e le modifiche della chioma e dell'apparato radicale sono realizzabili se motivati, qualora non ci fosse la possibilità di adottare delle soluzioni alternative. Inoltre, precisa che nell'eventualità in cui si rilevi un pericolo imminente per la pubblica incolumità e per la sicurezza urbana, il proprietario o gestore debba provvedere tempestivamente alla realizzazione degli interventi necessari a prevenire e a eliminare il pericolo, dandone immediata comunicazione al Corpo forestale dello Stato (oggi Carabinieri) e predisponendo, ad intervento concluso, una relazione tecnica descrittiva della situazione e delle motivazioni che hanno determinato l'intervento.

Decreto Ministeriale 19/12/2014 "*Assegnazione fondi Regioni alberi monumentali*", il quale stabilisce i fondi finanziari totali, assegnati a ciascuna Regione e Provincia Autonoma (allegato 1), ai fini attuativi del Decreto sopra citato.

Decreto Legislativo 177/2016 "*Disposizioni in materia di razionalizzazione delle funzioni di polizia e assorbimento del Corpo forestale dello Stato, ai sensi dell'art. 8, comma 1, lettera a) della legge 7 agosto 2015, n. 124, in materia di riorganizzazione delle pubbliche amministrazioni*". Tale articolo, oltre a stabilire l'assorbimento del Corpo Forestale dello Stato nell'Arma dei Carabinieri, trasferisce la competenza assegnata dalla L. n.10/2013 al Corpo forestale dello Stato al Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali (MIPAAF), in base all'art.11 del suddetto articolo. Tuttavia, l'attività di coordinamento, di raccolta e di gestione delle informazioni già svolte dal Corpo forestale dello Stato, continueranno ad essere realizzate.

Tra le funzioni attribuite all'Arma dei Carabinieri (citate all'art. 7) quella relativa al controllo degli illeciti e reati a danno degli alberi monumentali è da includersi tra le funzioni di "vigilanza, prevenzione e repressione delle violazioni compiute in danno dell'ambiente, con specifico riferimento alla tutela del patrimonio faunistico e naturalistico nazionale e alla valutazione del danno ambientale" specificata comma 2 lettera c.

Decreto Ministeriale n.5450 del 19/12/2017 "*approvazione dell'elenco nazionale degli Alberi Monumentali*", il quale approva e divulga l'Elenco degli alberi monumentali d'Italia, ai sensi dell'articolo 7 della *Legge n 10/2013*, e del *Decreto interministeriale 23 ottobre 2014*. Tale elenco viene ampliato e aggiornamento annualmente (ultimo aggiornamento in data 5/05/2021).

NORMATIVA PRINCIPALE REGIONALE

Legge Regionale n.6/1973 "*Prime disposizioni per la salvaguardia della flora marchigiana*". Tale legge, ad oggi abrogata, costituisce il punto di partenza della futura normativa riguardante gli alberi monumentali, in quanto, secondo l'art. 3, "vieta l'abbattimento degli alberi ad altofusto secolari e di particolare valore naturalistico e ambientale", in termini di "taglio, recisione, estirpazione, sradicamento, tali da compromettere la capacità e potenzialità vegetativa propria della pianta" (art. 1)

Legge forestale regionale (LR) n.6/2005, la quale tutela le Formazioni vegetali Monumentali delle Marche (art.26 "*Formazioni vegetali monumentali*"), vietandone l'esecuzione di interventi atti all'abbattimento di queste ultime, salvo specifica autorizzazione da parte del Comune presso la quale l'albero monumentale risiede. Gli alberi (o formazioni vegetali) monumentali risiedenti presso ciascun comune dovranno poi essere sottoposte a censimento, con finale produzione di apposito elenco, periodicamente aggiornato (art. 27 "Censimento ed elenco regionale delle formazioni vegetali monumentali)

DGR n. 279 del 2 marzo 2012 "*Il censimento ed elenco regionale delle Formazioni vegetali Monumentali*". Tale decreto, derivante dagli artt. 26 e 27 delle LR n.6/2005, istituisce l'elenco delle Formazioni Vegetali Monumentali (FVM) delle Marche, fornendo a ciascun Comune disposizioni inerenti al censimento, i quali risultati finali dovranno essere trasmessi alla Regione (art. 7), affinché quest'ultima attribuisca in via definitiva il carattere di monumentalità all'albero o filare atto al censimento.

DGR Art.32/2018 "*Castagneti da frutto*": contenuto nelle Prescrizioni di Massima e di Polizia Forestale Regionale (**PMPF**) tale articolo impone dei limiti riguardanti la ceduazione (Art. 32 commi 6-7), interventi applicabili (commi 2-3) nei castagni, stabilendo ai cedui un turno massimo di 60 anni, causa cipollatura (comma 10)

1.3.2. Il censimento degli alberi monumentali in Italia e nelle Marche (FVM)

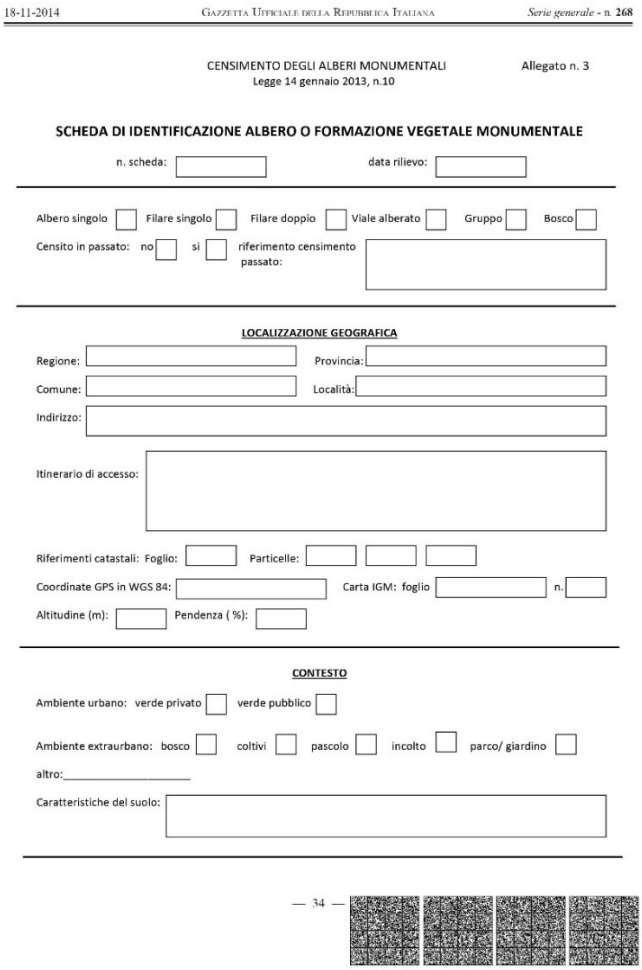
Il primo censimento degli alberi monumentali italiani venne istituito nel 1982 dal Corpo forestale dello Stato, dal nome "Censimento nazionale degli alberi di notevole interesse", volto ad individuare e catalogare le piante singole o a gruppi con particolari caratteristiche a livello dimensionale (dimensioni eccezionali), forma, qualità estetiche e valore storico.

Ad oggi, il censimento degli Alberi Monumentali è realizzato dai Comuni, sotto il coordinamento delle Regioni e grazie alla ***Legge n.10/2013***, ciascuna specie oggetto di censimento viene riportata in un elenco nazionale aggiornato e frutto di una ben definita caratterizzazione dell'individuo stesso.

Come riportato nel precedente paragrafo, tale legge non solo fornisce all'albero monumentale la definizione omonima, ma stabilisce che:

- ogni Comune effettui il censimento degli alberi monumentali nel proprio territorio, trasmettendone i risultati alle Regioni.
- Queste ultime, dopo opportuna istruttoria delle proposte comunali, redigano un elenco regionale da trasmettersi ai Carabinieri Forestali in modo tale da potersi realizzare un elenco nazionale degli alberi monumentali;

In termini pratici, per la verifica specialistica in campo da parte del Comune è previsto l'utilizzo della "scheda di identificazione", la quale oltre a fornire una serie di standard all'albero monumentale permette di rendere omogenei e confrontabili i dati raccolti nei vari contesti territoriali, consentendone la relativa analisi statistica.



18-11-2014 GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA *Serie generale* - n. **268**

CENSIMENTO DEGLI ALBERI MONUMENTALI
Legge 14 gennaio 2013, n.10

Allegato n. 3

SCHEDA DI IDENTIFICAZIONE ALBERO O FORMAZIONE VEGETALE MONUMENTALE

n. scheda: data rilievo:

Albero singolo Filare singolo Filare doppio Viale alberato Gruppo Bosco

Censito in passato: no si riferimento censimento passato:

LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA

Regione: Provincia:

Comune: Località:

Indirizzo:

Itinerario di accesso:

Riferimenti catastali: Foglio: Particelle:

Coordinate GPS in WGS 84: Carta IGM: foglio n.

Altitudine (m): Pendenza (%):

CONTESTO

Ambiente urbano: verde privato verde pubblico

Ambiente extraurbano: bosco coltivi pascolo incolto parco/ giardino

altro:_____

Caratteristiche del suolo:

— 34 —

Figura 1.3.2.1. - Esempio di scheda di identificazione dell'albero o Formazione vegetale monumentale
FONTE: MIPAAF

Essa può essere utilizzata sia per il singolo albero che per l'insieme omogeneo (filari, viale alberati, gruppi) e si compone essenzialmente di quattro parti:

- La prima raccoglie diverse informazioni generiche, come ad esempio l'oggetto di rilievo e se la specie è stata censita in passato, geografia (carta topografica e catastale) e descrizione del contesto, riferimenti relativi alla proprietà e ai suoi vincoli, descrizione dei criteri di attribuzione del carattere di monumentalità.
- La seconda fa riferimento al singolo albero, incentrandosi di informazioni più dettagliate, ovvero tassonomia, dimensioni, condizioni vegetative e strutturali attuali, stato fitosanitario, interventi passati e necessari.
- La terza è relativa all'insieme omogeneo e richiede una serie di informazioni più sintetiche, in relazioni a tassonomia, dimensioni dell'insieme, valori dendrometrici medi e

massimi degli alberi che lo compongono, alle condizioni di salute generali, agli interventi passati e considerati necessari.

- La quarta torna ad essere di interesse generale, raccogliendo informazioni sullo stato di tutela dell'individuo posto ad analisi e consentendo di inserire ogni altra notizia si rendesse necessaria per meglio caratterizzare l'oggetto del rilievo.

In contesto regionale invece, il censimento più significativo è stato realizzato grazie ad un Accordo di Programma stipulato con l'allora Corpo Forestale dello Stato.

Tale censimento prende il nome di Formazioni Vegetali Monumentali (FVM), costituendo un esempio di quella proficua attività che il Corpo svolge in collaborazione con la Regione Marche e che trova come caposaldo normativo la *Legge Forestale Regionale 6/2005*, in particolare il Capo IV "Tutela delle formazioni vegetali non ricomprese nei boschi e nei centri abitati".

Ai sensi della legge, possono essere considerati Formazione Vegetale Monumentale "gli alberi di qualunque specie, i filari, i gruppi e qualsiasi altro elemento o formazione vegetale di particolare interesse storico-culturale o di particolare pregio naturalistico-paesaggistico, che per età o dimensioni possono essere considerati come rari esempi di maestosità e longevità o che recano un preciso riferimento ad eventi o memorie rilevanti dal punto di vista storico, culturale, o delle tradizioni locali". Alle formazioni vegetali così individuate la Legge riserva una protezione assoluta, vietandone quindi l'abbattimento nonché qualsiasi altro intervento, salvo prescritta autorizzazione, la quale è concedibile solo per casi di eccezionale gravità o necessità.

Nelle Formazioni Vegetali Monumentali, non rientrano solo gli alberi, siano essi isolati o radicati in filare, gruppo o bosco, ma qualsiasi formazione vegetale che abbia carattere di eccezionalità.

L'obiettivo primario del censimento consiste quindi nell'individuazione delle formazioni vegetali presenti nel territorio marchigiano allo scopo di garantirne ulteriormente la conservazione mediante l'applicazione delle tutele previste dalla Legge Forestale Regionale.

Il censimento è stato avviato nel novembre 2009 ed è stato condotto per fasi successive, le quali hanno permesso di approntare una larga base di informazioni territoriali e successivamente di gerarchizzare le informazioni stesse su scala provinciale/territoriale e poi regionale.

Sono state rilevate e dichiarate monumentali 397 specie, le quali dopo una puntuale e rigorosa selezione effettuata congiuntamente con la Regione, costituirono l'elenco definitivo delle

Formazioni Vegetali Monumentali delle Marche. Di ogni FVM state verificate la tipologia, l'ubicazione, la proprietà le principali caratteristiche morfologiche e biologiche, il tutto archiviato poi grazie ad un database ad hoc appositamente predisposto. Alle 397 FVM corrispondono almeno 47.500 informazioni georeferite, comprensive di immagini e cartografie.

Gran parte delle FVM censite, (circa il 78%) si trova in proprietà private e sono rappresentate da "Alberi" (circa l'87%) mentre la restante parte da "Gruppi", "Filari", "Boschi" e tipologie speciali, come ad esempio l'eccezionale vite (*Vitis vinifera*) ubicata nel comune di Apecchio (PU) e il corbezzolo (*Arbutus unedo*), situato nel Parco dell'Abbadia di Fiastra (MC):

Ad oggi, sono stati fatti aggiornamenti periodici delle FVM (ai sensi dell'art. 27 comma 1 della *Legge n 6/2005*), delle quali l'ultimo risalente a dicembre 2019, annoverando nuovi individui ed eliminando quelli in fase di deperimento e/o morti, inseriti poi nell'elenco nazionale degli "Alberi Monumentali di Italia" AMI, con l'ultimo aggiornamento riferito a maggio 2021.

Figura 1.3.2.2. - Interfaccia principale del database Formazioni Vegetali Monumentali (FVM)
FONTE: Carabinieri.it

1.3.3. Albero monumentale come pianta habitat: uso e definizione del Valore Ecologico

Grazie alla *Legge n.10/2013*, è stata imposta ad ogni comune l'obbligatorietà di censire i propri alberi monumentali, di cui sono stati definiti i criteri per l'attribuzione del carattere di monumentalità, applicati nel Decreto attuativo MIPAAF 23/10/2014.

Nell'articolo 5 di tale Decreto, viene data spazio alla definizione e applicazione di **Valore Ecologico**.

Il report del Corpo Forestale dello Stato "*Alberi Monumentali d'Italia, Censimento degli Alberi Monumentali, guida al rilievo del Valore Ecologico*", definisce quest'ultimo come "*Il Valore Ecologico è relativo alle presenze faunistiche che su di esso si insediano, con riferimento anche alla rarità delle specie coinvolte, al pericolo di estinzione ed al particolare habitat che ne garantisce l'esistenza. L'albero può rappresentare un vero e proprio habitat per diverse categorie animali, in particolare: entomofauna, avifauna, micromammiferi. Tale prerogativa si riscontra soprattutto in ambienti a spiccata naturalità, dove la salvaguardia di queste piante rappresenta elemento importante per la conservazione di specie animali rare o di interesse comunitario*".

Tale valore fa quindi riferimento alle presenze faunistiche e vegetali che si insediano all'interno dell'albero oggetto di analisi, oppure nelle sue immediate vicinanze, in quanto da considerarsi importanti e meritevoli di tutela quanto più sono rare, in pericolo di estinzione e per questo motivo considerate di interesse comunitario (*Dir. Habitat n. 43/92/CEE*).

Nella definizione di valore ecologico, notevole rilievo assume l'albero senescente, in quanto rappresenta una risorsa trofica e spaziale vitale per diverse specie animali (insetti saproxilici, uccelli, micromammiferi) le quali aumentano all'aumentare delle numerose "entità discrete" alle quali appartiene l'albero oggetto di analisi (es. fori, essudati, cavità, corpi fruttiferi di funghi e branche morte), costituendo quindi dei microhabitat e la loro formazione richiede tempo, in quanto alcune sono già presenti in individui vivi, altre invece si sviluppano solo dopo la morte della pianta.

I processi di decomposizione del legno, associati alla presenza dei funghi e alla colonizzazione degli insetti saproxilici, aumentano il valore ecologico dell'albero, costituendo assieme alla presenza di cavità, un valore aggiunto non soltanto grazie alla mesofauna ospite ma anche per l'albero monumentale stesso.

Altri fattori determinanti l'aumento del valore ecologico dell'albero sono o possono essere:

a) la presenza di branche morte nella chioma o di ferite, le quali vengono identificate come segni di indebolimento.
b) le caratteristiche della vegetazione circostante
c) la conformazione del paesaggio.

L'età dell'albero è generalmente associata all'aumento della quantità e diversità dei microhabitat presenti.

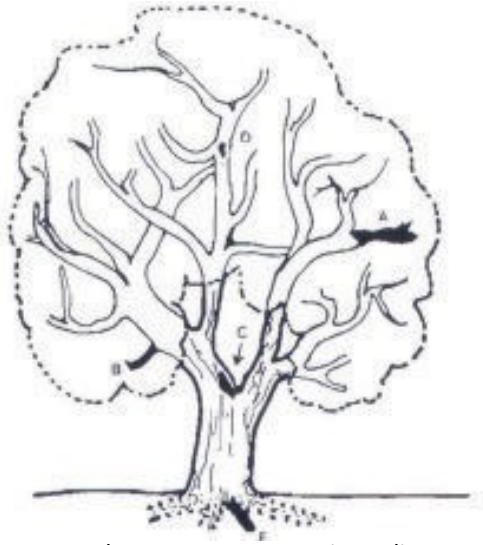


Figura 1.3.3.1. - Albero Monumentale senescente contenitore di potenziali microhabitat (in nero).
FONTE: Censimento degli alberi monumentali, Guida al rilievo del Valore Ecologico

Nell'immagine si osserva come l'albero monumentale fosse oggetto e contenitore di potenziali microhabitat (in nero) per la mesofauna. In particolare, all'aumentare dell'età dell'individuo, aumenta il tasso di colonizzazione degli organismi saproxilici, nelle branche morte (A-B), cavità (C-D) e radici morte (E).

In ambito pratico, al fine di determinare il valore ecologico di un albero, è necessario accertarsi inizialmente della presenza di microhabitat e delle specie animali cui possono colonizzarle.

Tale verifica, viene svolta successivamente aver compilato la Scheda di Identificazione dell'albero o formazione vegetale monumentale (vedi immagine sopra), effettuando prima una valutazione visiva dell'individuo in analisi utilizzando il Catalogo dei Microhabitat degli Alberi, il quale presenta un elenco delle diverse strutture oggetto di osservazione.

Questo elenco di riferimento è strutturato suddividendo i microhabitat per tipologia, assegnando un codice ad ogni struttura (tali codici sono presenti nella scheda di rilievo).

I microhabitat da ricercare sono i seguenti:

- Cavità

- Lesioni e ferite
- Corteccia
- Legno morto
- Deformazioni, e forme di crescita
- Epifite
- Nidi
- Altro

Una volta effettuata l'osservazione dei microhabitat, si procede poi alla compilazione della scheda relativa alla fauna. Le specie animali cui si chiede di verificare includono la presenza di coleotteri saproxilici inclusi nella Direttiva Habitat, mammiferi, uccelli, rettili e anfibi, i quali dipendono dalla presenza di alberi senescenti e/o in cui siano presenti cavità o altre strutture.

Le specie in esame possono essere rare, spesso protette, offrendo quindi una panoramica della biodiversità associata agli alberi monumentali.

La determinazione del valore ecologico di un individuo è incentrata non soltanto sulle specie che vivono in associazione con gli alberi monumentali, ma sui microhabitat che questi offrono, strutture che consentono di valutare la potenzialità di un albero a contribuire alla conservazione della biodiversità.

Il valore ecologico lo si può considerare come "derivato" **dell'Indice di Biodiversità Potenziale** (**IBP**), in quanto quest'ultimo fornisce una rappresentazione, non del singolo individuo, ma della biodiversità potenziale, data la formazione boschiva oggetto di analisi. Il metodo consiste nell'uso di 10 indicatori, dei quali 7 dipendono direttamente dalla gestione del bosco e 3 interessano invece il contesto dell'area analizzata.

Il riferimento è alla biodiversità potenziale, in quanto gli indicatori scelti mirano ad una diagnosi speditiva e indiretta della capacità di un popolamento di "accogliere" differenti specie o comunità, la cui ricerca diretta sarebbe troppo onerosa. La conoscenza delle strutture atte ad accogliere la biodiversità è inoltre la chiave per la previsione di azioni concrete di miglioramento.

Vengono presi in considerazione: indicatori strutturali e compositivi dello strato arboreo, la presenza di legno morto e di alberi di grandi dimensioni, la presenza di microhabitat sulle piante, di radure o di altri habitat associati al bosco, ed infine la continuità temporale della foresta (Emberger et al., 2013; Larrieu e Gonin, 2008; Larrieu e Gonin 2012; Larrieu et al., 2012).

1.4. Inquadramento delle tecniche geomatiche utilizzate

Partendo dalla definizione di "geomatica", è possibile definire quest'ultima come "Disciplina che si occupa della gestione automatizzata dell'informazione relativa al territorio. La geomatica risponde all'esigenza di trattare in modo interdisciplinare e interoperabile grandi quantità di dati e di informazioni da questi derivate, di natura e caratteristiche diverse, rilevati con una crescente molteplicità di procedure e che devono essere necessariamente organizzati, elaborati, gestiti, rappresentati in cartografie digitali e numeriche e utilizzati in tempi brevi per una corretta rappresentazione e una buona conoscenza della situazione territoriale."

1.4.1. I Sistemi di Posizionamento e Navigazione Satellitare (GNSS)

Il posizionamento satellitare si basa sulla ricezione di quei segnali provenienti da satelliti artificiali, i quali (ad un'altezza dall'orbita di circa 20000 Km dalla superficie terrestre) stimano tramite intersezione spaziale distanziometrica le coordinate tridimensionali di siti occupati da stazioni riceventi in un sistema di riferimento geocentrico con precisioni che vanno da qualche metro a meno del cm, a seconda del ricevitore e della tipologia di rilievo da effettuare.

Si parla di navigazione satellitare di precisione se si impiegano quelle tecniche di rilievo che consentono di migliorare il grado di accuratezza raggiungibile e di navigazione satellitare assistita di precisione, garantendo così una soluzione date le condizioni presentate.

Fino al 2001 il posizionamento satellitare era sinonimo di GPS, in quanto unica costellazione attiva e pienamente operativa, ad oggi invece ne sono presenti diverse (GLONASS, GALILEO, COMPASS, ecc.), impiegate sia a scopi militari che civili.

La categoria utilizzata per raggruppare ciascuna costellazione esistente prende il nome di **GNSS** (acronimo di **Global Navigation Satellite System)**, la quale consente la possibilità di impiegare contemporaneamente ciascun segnale acquisito dalle costellazioni globali operative e future anche grazie agli accordi effettuati tra i vari gestori di tali sistemi per garantire la massima compatibilità e interoperabilità.

Ciascuna costellazione offre informazioni di tempo, distanza e posizione di un punto ovunque nel mondo, in ogni istante e in qualsiasi condizione climatica, per mezzo della ricezione di appositi segnali provenienti da satelliti artificiali, tramite l'emissione di complessi segnali, consentendo il posizionamento di un qualsiasi punto nello spazio in una terna tridimensionale

di punti, mediante satelliti e stazioni riceventi, elaborando infine il tutto nel sistema di riferimento geocentrico WGS84.

Una costellazione GNSS è strutturata in tre segmenti: il **segmento spaziale**, il **segmento di controllo** ed il **segmento utente**.

- **Segmento spaziale**: costituito dai satelliti che orbitano attorno alla Terra, con un'altezza di circa 20.000 km. Le posizioni dei satelliti (effemeridi) sono note al variare del tempo con precisione relativa molto elevata (0.05 ppm), l'orologio di bordo è di elevata stabilità (perde un secondo ogni 3'000'000 di anni). La distribuzione di ciascun satellite nella relativa orbita è stata scelta con l'obiettivo di far sì che in ogni punto del pianeta e ad ogni ora, sia sempre possibile ricevere il segnale di un ben definito di satelliti, eliminando così l'errore di rimbalzo su superfici d'acqua e/o riflettenti (errore di Multipath).

Le funzioni del segmento spaziale sono: trasmettere informazioni agli utilizzatori mediante segnali radio modulati, mantenendo anche un segnale tempo preciso, ricevere e memorizzare informazioni dal segmento di controllo, eseguire manovre di correzione d'orbita.

- **Segmento di controllo**: esso è costituito da stazioni permanenti distribuite in modo omogeneo sulla Terra, le quali tracciano in continuo i satelliti per predire le orbite e le correzioni degli orologi. Le funzioni principali del segmento di controllo sono: controllo degli orologi a bordo dei satelliti, calcolare le orbite seguite dai satelliti, (effemeridi predette, le quali indicano la rotta teorica che ciascun satellite deve seguire ed effemeridi precise, le quali indicano la rotta effettiva che ogni satellite ha seguito), effettuando quindi manovre di correzione, monitorare dello stato di salute della costellazione (health status) ed elaborare dei modelli di propagazione troposferica e ionosferica.
- **Segmento utente**: è costituito da tutti coloro che usufruiscono dei servizi offerti dai GNSS, osservando e registrando i dati trasmessi dai numerosi satelliti, applicando infine algoritmi matematici, con la finale restituzione di una posizione tridimensionale con il tempo e la velocità. Le sue funzioni sono: ricevere il segnale tramite l'antenna, analizzare ed elaborare tramite ricevitori il segnale memorizzandone i dati, elaborazione finale dei dati raccolti, determinando le coordinate di punti ignoti, mediante l'uso di software e computer.

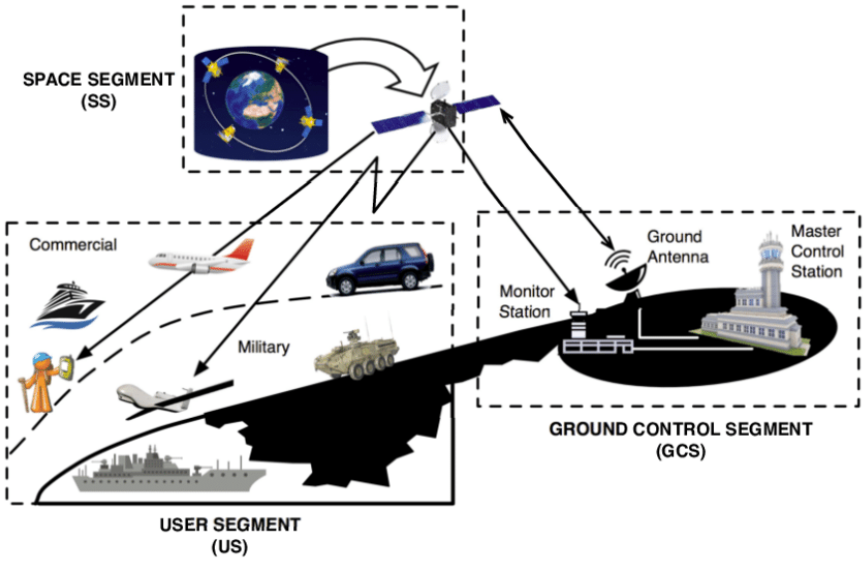


Figura 1.4.1.1. – I segmenti GNSS

FONTE: ResearchGate.net

A livello strutturale, una costellazione GNSS è costituita da diverse componenti derivanti dalla frequenza fondamentale f0, la quale viene fornita dagli orologi di bordo di ciascun satellite nell'orbita. Le componenti del segnale trasmesso sono:

- **Portanti L1 e L2**: servono a calcolare la distanza tra satellite e ricevitore, mediante le misure di fase, modellizzando ed eliminando gli errori di rifrazione troposferica e ionosferica (con una sola portante l'eliminazione verrebbe insufficiente, aumenta quindi l'imprecisione del segnale).
- **Codici C/A e P**: costituiti da onde quadre formate da transazioni di +1 e – 1 generate da un algoritmo che si ripete periodicamente nel tempo. Il codice C/A viene trasmesso soltanto sulla portante L1, mentre il codice P (Precision) è usato in modo analogo al codice C/A ma con caratteristiche che assicurano prestazioni migliori, è trasmesso su entrambe le portanti L1 e L2.
- **Messaggio navigazionale D**: fornisce ai ricevitori una lunga serie di informazioni necessarie atti a completare il posizionamento GNSS (ad esempio le effemeridi) correggendo gli orologi a bordo di ciascun satellite e fornendo informazioni sul loro stato di salute. È trasmesso su entrambe le portanti L1 e L2.

A livello di funzionamento, la geometria della costellazione GNSS è stata studiata in modo da assicurare che almeno quattro satelliti siano sempre visibili da ogni punto del globo; conoscendo le posizioni dei primi tre satelliti (una volta impostato il sistema di riferimento) è possibile determinare le coordinate Xp, Yp, Zp del punto in cui si trova l'antenna che riceve i

segnali dai satelliti. Tuttavia, serve un quarto satellite al fine di calcolare la distanza (d) tra satellite e ricevitore, quest'ultima viene determinata mediante la misura del ritardo di tempo. d=Δt*c (velocità della luce)

In realtà, affinché questa equazione valga, è necessario presuppore che gli orologi sui satelliti e quelli delle stazioni riceventi siano sincronizzati. Questo non è vero. Per questo dobbiamo presupporre che la distanza d=(Δt+t)*c. Quindi, al Δt viene aggiunta una correzione incognita del ritardo dell'orologio della stazione ricevente rispetto all'orologio sul satellite. In realtà ci sono altri errori da considerare, ma sono in qualche modo modellabili, mentre l'errore di sincronizzazione tra orologi no. Per questo, alle 3 incognite Xp, Yp e Zp si deve aggiungere la quarta incognita tempo, t. Per questo i satelliti "visibili" da ciascun punto devono essere almeno quattro.

Figura 1.4.1.2. - Esempio triangolanzione

FONTE: ARPA Piemonte

Nelle costellazioni GNSS sono previste due topologie di posizionamento: il posizionamento assoluto e relativo.

Il posizionamento assoluto è un sistema che lavora da solo; esso stima le coordinate di un singolo ricevitore mediante l'osservazione a un certo numero minimo di satelliti. Questo procedimento viene eseguito per ogni ricevitore. Con il posizionamento assoluto può avvenire in tempo reale (applicazioni navigazionale). Il metodo presuppone che l'utente possieda un solo ricevitore.

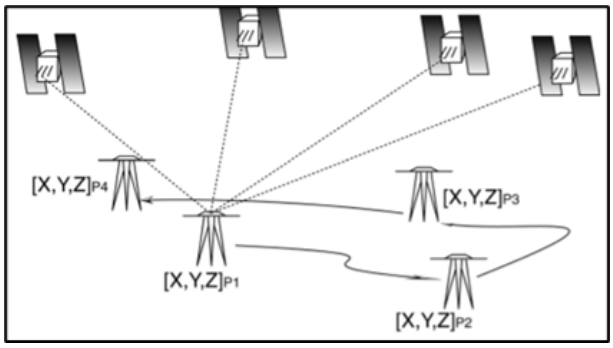


Figura 1.4.1.3. – Posizionamento assoluto

FONTE: ScienceDirect.com

Il posizionamento relativo viene fatto relativamente a qualcosa. Esso si basa su un principio fondamentale: non si ha più un singolo ricevitore, ma un ricevitore base A e un ricevitore rover B. Entrambi i ricevitori effettuano osservazioni in contemporanea degli stessi satelliti, determinando così la baseline, ovvero il vettore che unisce i due ricevitori A e B. Se A è un punto di coordinate note e B n o, la posizione di B viene determinata dalla relazione: Xb Yb Zb = Xa Ya Za + base. Questo è possibile perché entrambi i ricevitori vedono tutti i satelliti.

I vantaggi del posizionamento relativo sono che può usare sia misure di pseudorange che di fase (più usata), l'importante è che i ricevitori abbiano gli stessi satelliti in comune. Sottraendo tra di loro le osservazioni, una, due, tre volte (differenze prime, seconde e terze) si creano nuove osservabili nelle quali vengono rimossi, o ridotti, gli errori sistematici comuni ad ogni osservazione.

Per raggiungere precisioni più elevate bisogna abbandonare il posizionamento assoluto e ricorrere al posizionamento relativo che porta precisioni maggiori.

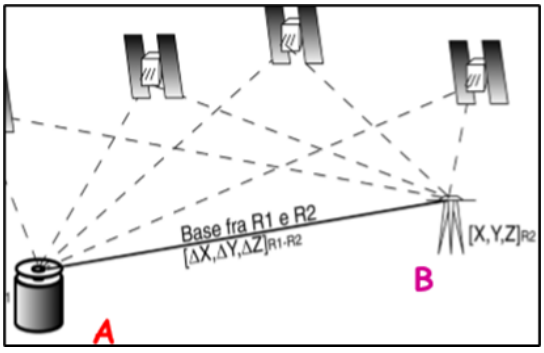


Figura 1.4.1.4. – Posizionamento relativo

FONTE: ScienceDirect.com

1.4.2. Nozioni di fotogrammetria aerea e terrestre

Tra gli attuali metodi di rilievo del territorio, la fotogrammetria rappresenta quello più completo e preciso, a parità di costi e rapidità, rispetto ad altri.

Viene definita **fotogrammetria** quella tecnica di rilievo indiretto del territorio, la quale consente di ottenere informazioni metriche, ad esempio forma e posizione, da oggetti tridimensionali, mediante l'interpretazione e la misura di immagini fotografiche. Per far ciò, si ritiene necessaria l'acquisizione di più foto, altrimenti risulta impossibile ottenere informazioni metriche e tridimensionali di un oggetto, data la carenza di informazioni della singola foto.

Rispetto ad un rilievo diretto, il rilievo fotogrammetrico porta i seguenti vantaggi, tra i quali:

- Il rilievo di oggetti senza avere contatto fisico con gli stessi
- Il rilievo di simultaneamente numerosi punti, producendo una gran quantità di informazioni
- Effettuazione a posteriori di misure rispetto al rilievo in campagna, con la possibilità di poterle ripetere, modificare e controllare (similarmente al sistema GNSS)
- Ottenimento dell'informazione metrica, oltre a quella visuale.

La fotogrammetria sfrutta il concetto della **visione stereoscopica**, ovvero la visione dell'oggetto da rappresentare da due diversi punti di vista: utilizzando due prospettive centrali di un medesimo oggetto da due distinti centri di proiezione (come per la vista umana), ricavate ad esempio dalle foto dell'oggetto, è possibile ottenere la posizione spaziale dell'oggetto medesimo.

Le tre parole chiave le quali caratterizzano la fotogrammetria sono rapidità (rispetto ad un rilievo topografico), economicità e correttezza (uniformità di precisione).

Partendo dal primo assunto, il rilievo fotogrammetrico consente di ottenere informazioni metriche dalle foto ma si basa però sul principio matematico della prospettiva centrale, ovvero risulta necessario fornire un valore numerico ad una certa entità nello spazio; l'immagine in figura, attesta l'esistenza di una relazione matematica che lega il punto che sta nello spazio e il suo centro immagine.

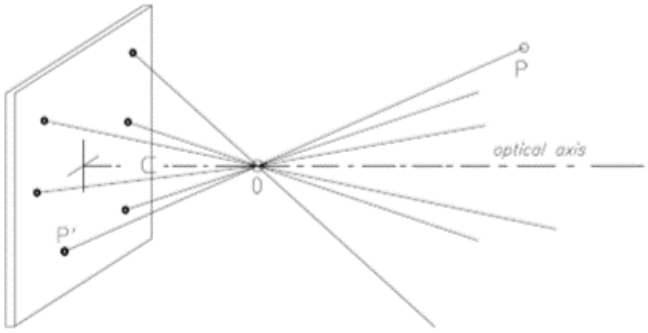


Figura 1.4.2.1. - Proiezione centrale: C=, spazio immagine O =centro ottico

Per quanto la tecnologia sia migliorata nel corso degli anni, la fotogrammetria si basa sempre sulla corrispondenza biunivoca tra il punto situato nello spazio e il punto rappresentato nell'immagine, tramite il principio della **triangolazione**. Facendo un esempio, è possibile, conoscendo il triangolo rosso che si forma tra due camere, ricomporre la geometria dello stesso, ottenendo così le coordinate incognite del punto P; tuttavia, sono anche incognite le coordinate dei centri di presa, in quanto non si conoscono le coordinate del punto dal quale si scatta la foto.

La linea rossa, ovvero la retta di collinearità, che passa sia per il centro di presa, sia per il punto del positivo dell'immagine, sia per il punto di corrispondenza della realtà, porta ad un problema: il punto A può stare in più punti. La collinearità impone soltanto che il punto si trovi su quella retta, ma non ne indica il punto preciso.

Per questo c'è bisogno di una seconda camera che imponga che il punto A si trovi sulla retta di collinearità O'A'A e O" A" A. Con due immagini quindi riusciamo a fare la triangolazione.

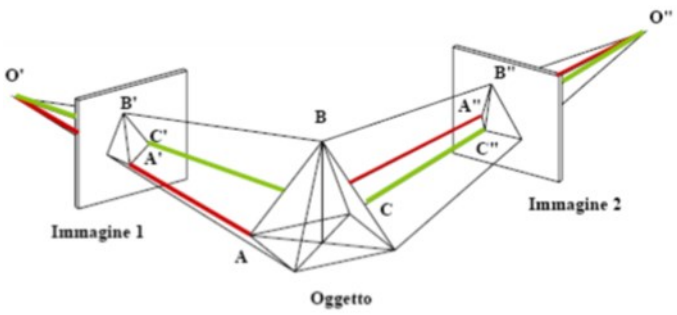


Figura 1.4.2.2. Visione stereoscopica dell'oggetto

Questo è il principio su cui si basa la fotogrammetria: due immagini devono vedere al contempo lo stesso punto, altrimenti, non si ha la sua corrispondenza spaziale in quanto prospettiva centrale.

Nell'ambito fotogrammetrico, esistono numerosi sistemi di acquisizione, come satelliti (Remote Sensing) droni e aerei (Aerial), fotocamere (Close Range), ecc. Il rilievo con fotocamera consente di operare con oggetti di dimensioni che vanno da un range di 0 fino a 100 metri, mentre con la fotogrammetria aerea è possibile eseguirla con oggetti di 50-70 metri fino a 100 chilometri. Dalla dimensione dell'oggetto consegue la distanza dalla quale eseguire il rilievo.

La fotogrammetria è contraddistinta da tre principali fasi: **presa**, **orientamento** e **restituzione**.

La presa consiste nell'acquisizione delle immagini fotografiche o digitali, l'orientamento determina i parametri della trasformazione da immagine ad oggetto (2D a 3D) e viceversa, determinando anche la posizione reciproca tra le due camere, infine la restituzione determina le coordinate di molti punti per la ricostruzione un oggetto a partire dalle immagini orientate nella fase precedente.

Il processo fotogrammetrico prevede una serie di fasi, dove si ha:

- **Progettazione iniziale**, nella quale vengono decise localizzazione (lunghezza delle basi, scatti da effettuare, la formazione delle strisciate, la lunghezza focale), scala media del fotogramma (se la quota di volo è costante, ma il terreno è irregolare, sarà necessaria la scelta di una scala media del fotogramma scegliendo punto più alto e più basso del volo), tipo di camera e di obiettivo, scelta del tipo di aereo o drone, infine il periodo ottimale per l'acquisizione dell'immagine.
- **Acquisizione immagini**, la quale dipende dalla finalità del rilievo, tipologia di produzione finale (carta tematica, tecnica, numerica, ortofoto), scala della rappresentazione, morfologia del territorio, precisioni richieste nella restituzione.
- **Orientamento**, dove vengono determinati quei parametri che mettono in relazione punti oggetto e punti immagine; tuttavia, bisogna prima identificare i parametri interni della camera (focale, distanza dal punto principale, distorsione dell'obiettivo, dimensione del sensore) e i parametri, i quali colleghino il centro di presa dal centro immagine (principio della triangolazione). Per far ciò, quindi, bisogna determinare **l'orientamento interno**, ovvero quei parametri, i quali descrivono le caratteristiche geometriche interne della camera) e i parametri di **orientamento esterno**, i quali descrivono la posizione in cui è stata presa l'immagine, rispetto all'oggetto (posizione del centro di presa, inclinazioni e rotazioni relative tra camera e oggetto). Per determinare tali parametri occorre conoscere la posizione di alcuni punti (Punti noti) dell'oggetto ben visibili su entrambe le immagini.

- **Restituzione,** la quale consiste nell'ottenimento di coordinate geometriche dei punti che compongono l'oggetto, oltre che dei punti ottenuti durante la fase di orientamento.
- **Rappresentazione finale,** può essere grafica, numerica, immagini, DTM, modelli 3D.

In sintesi, la fase di presa consiste nell'acquisizione di foto, l'orientamento (interno o esterno) determina i parametri interni alla camera e le posizioni relative sia tra la camera e l'oggetto sia tra le due camere, infine la restituzione costruisce l'elaborato finale partendo dai punti di orientamento.

A seconda dell'utilizzo, la fotogrammetria viene suddivisa in:

- **Fotogrammetria terrestre (Close Range)**
- **Fotogrammetria aerea o aerofotogrammetria (Aerial)**

La fotogrammetria terrestre, chiamata anche "fotogrammetria dei vicini", viene utilizzata quando gli oggetti interessati risultano posizionati ad una distanza dell'ordine di grandezza delle decine o delle centinaia di metri dalla camera da presa fotografica.

Nella Fotogrammetria Close-Range (fotogrammetria sferica e Structure from Motion) vengono utilizzate camere speciali (metriche) per estrapolare dal modello in analisi dei dati metrici; al contempo, applicazioni di **Computer Vision** garantiscono risultati fotorealistici ed un alto impatto comunicativo. La metodologia sviluppata è accurata, accessibile, con un alto grado di flessibilità, ottenendo ottimi risultati con elevati standard di qualità. In più la ricerca evidenzia come è possibile, usando gli stessi panorami necessari al rilievo fotogrammetrico, combinare i vantaggi dei due approcci sopra citati (Fotogrammetria sferica and Structure from Motion) per velocizzare la ricostruzione fotorealistica dell'oggetto senza perdere in accuratezza metrica e fotometrica.

La fotogrammetria aerea invece, si basa sul principio della parziale sovrapposizione delle immagini fotografiche, sfruttando appieno il concetto della stereoscopia. A differenza della fotogrammetria terrestre, vengono applicate camere metriche montante su aeromobili.

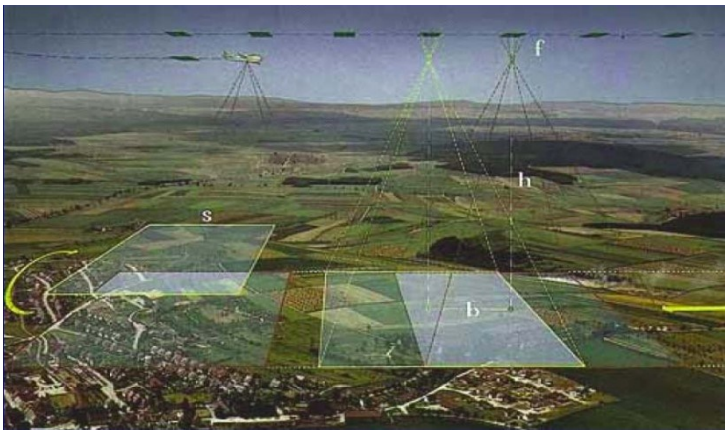


Figura 1.4.2.3. Acquisizione aerofotogrammetrica (Aerial)
FONTE: Unirc.it

Il territorio viene ripreso con sequenze di fotogrammi (chiamate strisciate o strips), scattati automaticamente a intervalli regolari, mentendo velocità di volo uniforme lungo traiettorie rettilinee a quota costante (per ragioni di sicurezza, a quote non inferiori ai 300 metri), utilizzate a coppie e tali che ciascun fotogramma si sovrapponga per circa il 60% con quelle adiacenti (sovrapposizione longitudinale o overlap) e ciascuna strisciata si sovrapponga per il circa 15% con quelle adiacenti (sovrapposizione laterale o sidelap).

Una branca importante dell'aerofotogrammetria, la quale riveste attualmente una grande importanza, è la **fotogrammetria da drone**.

Essa consente di ottenere informazioni metriche partendo dall'elaborazione di due o più fotografie scattate da punti di vista differenti, in modo da ricreare la dimensione, la posizione e l'orientamento dell'edificio o dell'oggetto in questione.

È quindi una vera e propria tecnica della fotografia digitale, in questo caso con drone, che può essere elaborata per mezzo di appositi software; grazie a questi ultimi si ha la possibilità di rilevare dei punti in comune (detti omologhi) tra tutte le immagini scattare, dalle quali verrà poi costruita la nuvola di punti (ovvero un gruppo di punti posizionati tramite coordinate con valori precisi a loro associati). Usando l'immagine ottenuta con la nuvola dei punti, si potrà elaborare il tutto, ottenendo così il prodotto digitale finale.

Rispetto all'utilizzo dell'aeromobile, la fotogrammetria da drone consente di avere dei costi più bassi per l'acquisizione delle immagini per la rilevazione.

Attualmente tale rilievo riveste una larga gamma di impieghi, citandone alcune:

- Creazione di Database cartografici territoriali e ambientali
- Pianificazione urbana
- Pianificazione forestale

- Rilievi con drone per gestione zone costiere
- Riprese in luoghi inaccessibili a causa di calamità naturali (alluvioni, terremoti)
- Rilievi con drone a scopo di difesa ambientale (abusi edilizi, discariche abusive)
- Rilievi con drone per verificare lo stato del suolo, vegetazione e delle acque
- Riprese archeologiche

1.4.3. Inquadramento sul mobile laser scanner

I sensori **laser scanner** sono strumenti che consentono il rilevo di modelli tridimensionali di oggetti a scale e risoluzioni differenti, con la caratteristica essenziale di acquisire milioni di punti 3D in brevissimo tempo, elaborando poi il tutto mediante specifici software.
I sistemi laser a scansione offrono nuove possibilità nel rilievo topografico, in quanto si trattano di dispositivi ottico-meccanici capaci di emettere un impulso elettromagnetico (laser) e ricevere il segnale riflesso dalla superficie o terreno, misurando l'intervallo di tempo intercorso (tempo di volo) e quindi la distanza tra il centro dello strumento ed il punto rilevato. Al calcolo del tempo di volo viene associata anche una misura angolare di precisione che permette di collocare i punti in un sistema di riferimento locale, riferito al centro ottico dello strumento. Per ogni misurazione, oltre alle coordinate cartesiane XYZ, il sistema fornisce l'intensità di segnale di ritorno, definendo la risposta radiometrica della superficie rilevata.
Laser è l'acronimo di *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*. Fu scoperto da Albert Einstein nel 1917 su un effetto chiamato "emissione stimolata di radiazione", il quale consiste nell'induzione di un atomo ad emettere radiazione, "illuminandolo" con una radiazione dello stesso tipo; il primo prototipo di laser venne alla luce nel 1960.
Il laser scanner viene utilizzato per ottenere misure e rappresentazione di oggetti tridimensionali, grazie a delle caratteristiche fondamentali che vengono acquisite dalla luce se stimolata in maniera propria: il laser è **unidirezionale** (permette di avere una costanza di direzione per lunghi tratti) e **monocromatico** (ha sempre la stessa frequenza).
All'interno di un emettitore laser si ritrovano delle specifiche componenti, tra le quali:

- Componente attivo
- Energia fornita al fascio
- Specchio
- Specchio semiriflettente
- Fascio Laser

La riflessione del raggio laser dipende dalla rugosità della superficie e dalla lunghezza d'onda del laser.

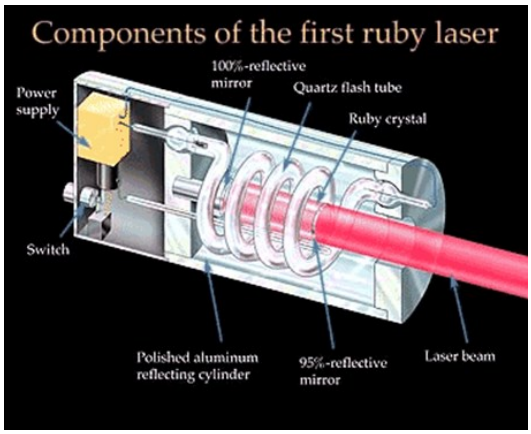


Figura 1.4.3.1. Componenti del Laser Scanner
FONTE: Wordpress.com

A livello di funzionamento, il laser scanner si compone di uno specchio che gira su sé stesso, tramite contemporanea rotazione dello stesso e del treppiedi che lo sostiene; il laser emesso rimbalzerà nello specchio che girando, insieme allo scanner, permetterà di ottenere un'acquisizione completa dell'oggetto da rilevare.

Oltre alle coordinate XYZ, la maggior parte degli scanner acquisiscono anche il valore della riflettanza, ovvero la quantità di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere. Il suo valore è legato alle caratteristiche del materiale di cui è costituita la superficie.

I dati ottenuti tramite il laser scanner sono: coordinate XYZ, riflettanza, dato RGB (se provvisto di una camera), angoli di deviazione verticali (non tutti gli scanner ne sono dotati).

Per eseguire un rilievo diretto laser scanner, è necessario innanzitutto comprendere l'ambito e la finalità di applicazione dello stesso (ambito forestale, urbano ecc.). Una volta rilevato l'oggetto, è necessaria la scelta della giusta geometria d'acquisizione.

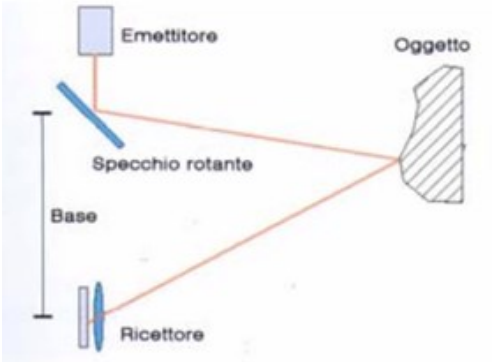


Figura 1.4.3.2. – Funzionamento del Laser Scanner
FONTE: ResearchGate.net

I dati acquisiti avranno comunque una fase di post-produzione complessa, data la complessità di ogni singola caratteristica (es. spigoli) la quale compone l'oggetto di rilievo. Un altro problema potrebbe essere la presenza di un corpo che impedisce di scansionare l'area dietro al corpo stesso, con conseguente formazione di un'"area d'ombra". Per questo si potrebbe scansionare quell'area in maniera "obliqua" anche se vi è il rischio che con "pendenze" troppo elevate il laser non torni più dietro.

Altro aspetto fondamentale è la scelta della maglia di scansione, la quale varia al variare della distanza dall'oggetto da rilevare, la risoluzione necessaria a descrivere l'oggetto, precisione delle singole letture laser.

Il laser calcola un distanziamento tra un punto ed un altro, sapendo che c'è un'area di sovrapposizione tra uno e l'altro. Sceglierà sempre il centro dell'impronta laser che viene lasciata sul muro. In base alla distanza tra emettitore e oggetto, il laser indicherà quale sarà lo *spacing* tra un punto e l'altro. A mano a mano che ci si allontana dall'oggetto tanto più sarà lo *spacing* tra un footprint del laser e l'altro. Per fare fronte a tale problema, sono stati creati laser "multibeam" che permettono, una volta colpito un oggetto, allo stesso raggio di continuare la scansione, avendo quindi un'informazione oggettiva.

Oltre all'acquisizione dati, un'altra fase importante è l'elaborazione degli stessi, mediante un allineamento o registrazione delle nuvole dei punti, le quali dipendono dal fatto che ogni singola scansione si trova in un proprio sistema di riferimento con un centro XYZ. Ogni scansione andrà messa in un Sistema di riferimento assoluto, mediante un approccio algoritmico oppure tramite marker: il primo consente di mettere insieme più scansioni e tende ad annullare la distanza tra i punti in comune tra due scansioni. I marker invece, proprio come per la fotogrammetria, sono elementi fissi presenti in entrambe le scansioni; essi vengono riconosciuti da appositi software grazie a dei livelli di riflettanza particolari.

Attualmente, nella comunità di ricerca della geomatica c'è un crescente interesse verso l'adozione di quei metodi di rilievo che garantiscano modalità di acquisizione speditive e allo stesso tempo complete, racchiudendo particolari esigenze come: facilità d'uso, affidabilità, accuratezza, efficienza, costi ridotti, ridotto sforzo umano. È noto, infatti, che l'integrazione di dati eterogenei, provenienti da fonti diverse, è in qualche modo inevitabile nel caso di rilievi 3D complessi (Remondino, 2011).

Ad oggi, i dispositivi laser hanno subìto un notevole sviluppo a partire da scanner a postazione fissa fino ad arrivare alle attuali modalità di acquisizione in movimento (Puente et al., 2013). Tale tecnologia "mobile" rientra nella categoria di scanner dinamici, i quali,

durante la fase di acquisizione in campo, processano i dati in tempo reale, rappresentando quindi una metodologia di rilievo speditiva (Ulrich et al. 2019). Tali dispositivi mobili, conferiscono portabilità e maneggevolezza, tali da poter essere installati su qualsiasi piattaforma e usati in diversi ambienti di rilievo, in particolare su lunghi ed accidentati percorsi e in quegli ambienti dove risulta difficoltoso il rilievo con laser scanner statico (Di Pietra et al. 2020).

I principali ambiti di applicazione di tali strumentazioni vengono raggruppati in ambiente costruito e urbano, patrimonio culturale e archeologia, monitoraggio ambientale, foreste e agricoltura.

Per Mobile Mapping System (MMS) viene intesa una piattaforma mobile, aerea o terrestre, in cui sono incorporati sistemi di misurazione e sensori atti all'acquisizione di dati metrici geograficamente referenziati. Tale piattaforma viene solitamente integrata con le componenti hardware principali: sensori ottici, sensori di navigazione/posizionamento e unità di controllo (Toschi et al. 2015). Questa tecnologia, se combinata con un'unità Lidar (Light Detection And Ranging), può essere indicata come Mobile Laser Scanner (MLS).

Si tratta di un ulteriore miglioramento della tecnologia che combina un sensore mobile con la stima della posizione per ottenere una registrazione continua dei dati, fornendo anche una completa visuale, risolvendo i problemi degli angoli e dello *spacing* (Westling et al. 2020). Per quanto riguarda la qualità dei dati ottenuti con i rilievi MLS, va ricordato che essa dipende dai dispositivi utilizzati ma normalmente raggiunge una precisione di scala centimetrica/decimetrica e una risoluzione dipendente dalla velocità di acquisizione dei dati e dalla distanza degli oggetti rilevati (Gollob et al. 2020).

Gli strumenti MLS commerciali sono dotati di più sensori per il sistema di navigazione composto da GNSS (Global Navigation Satellite System) e IMU (Inertial Measurement Unit), quest'ultimo può misurare sia le accelerazioni lineari, sia la velocità di rotazione, al fine di fornire la posizione tridimensionale e orientamento dell'oggetto di rilievo (Razavian et al. 2019). Questi due componenti possono garantire il corretto posizionamento georeferenziato per i dati tridimensionali della scansione laser (Kukko et al. 2012).

Nel caso in cui non si esegue un rilievo con GNSS perché sprovvisti di strumentazione o in caso di ambienti interni, l'accuratezza della posizione viene garantita dalle tecnologie SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) o odometria visual (Bronzino et al. 2019), le quali consentono di ridurre l'errore di localizzazione assieme all'unità IMU.

La combinazione tra il sistema di navigazione IMU e SLAM o odometria visual inerziale ridurrà con successo la deriva della navigazione ogni volta che il segnale GNSS non è chiaro, o è assente, e fornirà informazioni di geolocalizzazione relativa (Chang et al. 2019).

2. MATERIALI E METODI

2.1. L'Area di studio

L'area di studio presso la quale si è incentrato il lavoro ricade ad **Umito**, frazione appartenente al comune di Acquasanta Terme (AP), all'interno del Parco Nazionale del Gran Sasso e dei Monti della Laga, ad un'altitudine di circa 660 m.s.l.m.

Secondo il database FVM del Corpo Forestale dello Stato, l'area detiene un uso del suolo gestito a bosco, con suoli sciolti e a pH tendenzialmente acido, sviluppandosi, secondo la Carta geologica delle Marche (scala 1:10000) su substrati caratterizzati da rocce prevalentemente arenitiche, frammisti di sabbie e ghiaie, interessati da corpi di frana di scorrimento, ricadendo, secondo la carta Sistemi di Terre della Regione Marche, all'interno dei flysch terrigeni.

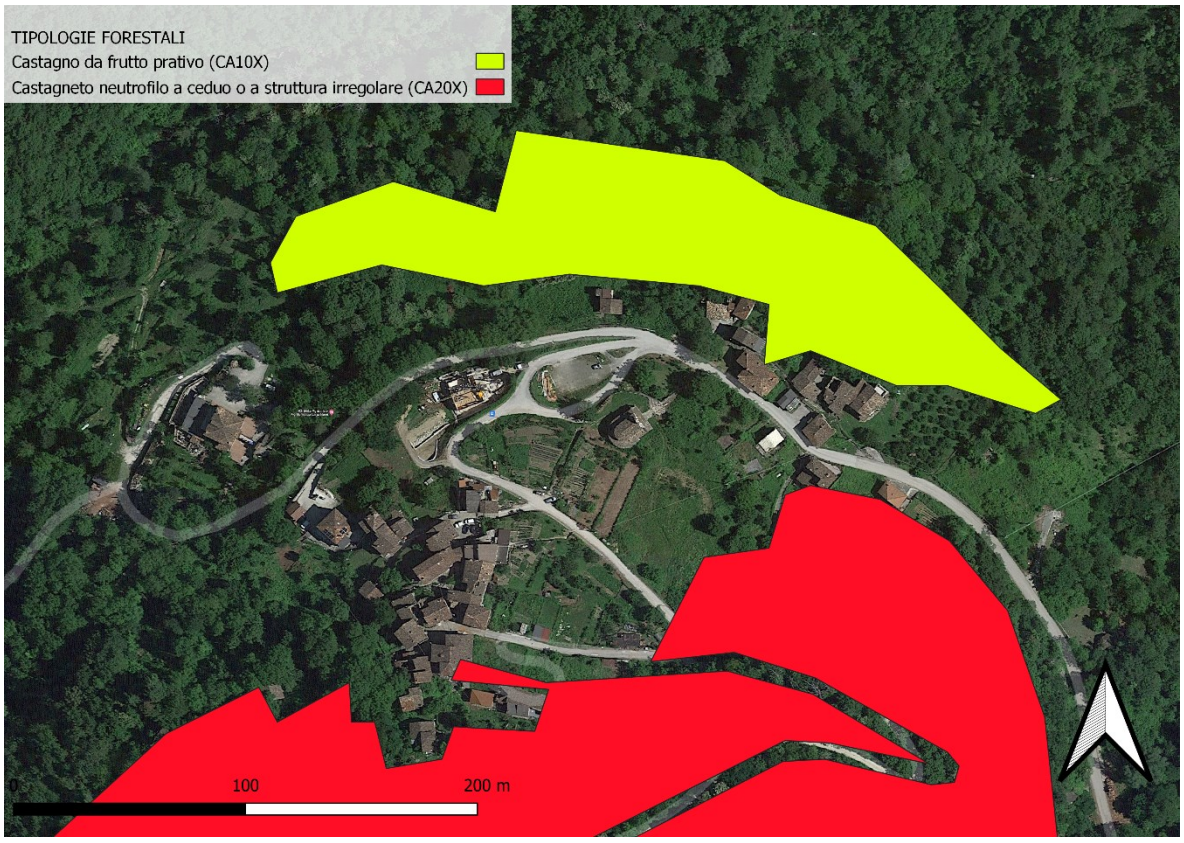


Figura 2.1.2. - Frazione di Umito (AP) e area di studio (situata nel Castagneto da frutto prativo)

Presso la frazione, è stato analizzato un castagno secolare situato all'incirca a nord-ovest, in corrispondenza dell'Azienda agricola e Agriturismo Laga Nord di Ascenzio e Fausta Santini.

L’individuo analizzato costituisce un ottimo rappresentante per il lavoro svolto, date le ragguardevoli dimensioni rilevate (altezza ed età), l’isolamento dagli altri individui, la struttura del fusto e dei rami principali (contenitore di un alto valore ecologico), rientrando quindi come “candidato” ad Albero Monumentale.
Una volta terminata l’osservazione preliminare, sono stati effettuati due rilievi nel periodo estivo ed invernale, più precisamente nel mese luglio 2021 e dicembre 2021, così come mostrato dalle immagini sottostanti.

Figura 2.1.3. - Castagno oggetto di analisi: Rilievo di luglio 2021 (a sx) e dicembre 2021 (a dx)

Nel rilievo estivo, sono state effettuate delle analisi comprendenti la misurazione dell’altezza tramite l’ipsometro (modello Vertex), la misurazione del diametro e l’estrazione della carotina legnosa mediante la Trivella di Pressler, usata per determinarne l’età. Riguardo la determinazione di quest’ultima, è risultata difficoltosa la procedura, in quanto lo strumento atto alla misurazione non ha raggiunto il pieno centro dell’individuo stesso; tuttavia, il valore estrapolato è risultato più che esaustivo, decidendo quindi di prenderlo per buono.
Dai primi dati ottenuti, il castagno analizzato mostra un diametro “a petto d’uomo” di circa 88 cm, con un’altezza di circa 18 metri e un’età presunta di circa 200 anni (conteggio anelli da una carotina legnosa estratta), detenendo quindi in piena regola i requisiti necessari per rientrare come “albero monumentale”.

2.2. Rilievi in campo ed elaborazione dei dati scaturiti

Le tecniche geomatiche utilizzate nel lavoro, hanno consistito inizialmente in analisi ed indagini in campo, basilari per il reperimento dei dati e la rappresentazione del castagno analizzato in ambiente informatico mediante la nuvola dei punti da esse prodotta.
Le operazioni condotte in campo consistono:
Stazione totale, che permette di acquisire delle coordinate in un sistema di riferimento relativo alla stazione stessa. Tale operazione è raccomandata per rilevare le coordinate in quei punti dove un qualsiasi sistema ricevitore provvisto di GNSS non consenta una precisa e continua rilevazione, date le caratteristiche "non idonee" dell'ambiente che lo circonda.
Fotogrammetria aerea mediante l'utilizzo del drone DJI Mavic Mini 2 è stato possibile analizzare dall'alto l'individuo (vista nadirale) e il suo ambiente circostante. Tale metodo verrà poi integrato ed elaborato per mezzo di specifici softwares, riproducendone al meglio i dettagli.
Fotogrammetria terrestre mediante reflex Sony Slt-A77V, utile per ricavarne la vista tridimensionale del fusto, contrafforti radicali e punto d'inserzione chioma, esportando poi la nuvola di punti ed elaborando il modello finito, necessario per la fase successiva di elaborazione dati.
Mobile Laser Scanner SLAM mediante lo strumento Kaarta-Stencil 2, usato per ottenere la nuvola di punti vera e propria del castagno analizzato, la quale costituirà l'ossatura principale per l'analisi rappresentativa elaborata successivamente.
Sono stati effettuati due rilievi in campo nei mesi di luglio e dicembre 2021, esaltando nel castagno analizzato particolari come la dimensione e proiezione della chioma al suolo nel rilievo estivo ed una rappresentazione più dettagliata dello scheletro e della chioma "spoglia" nel rilievo invernale, rappresentandoli successivamente in ambiente informatico. I confronti effettuati nei rilievi nei periodi differenti verranno trattati e discussi nei seguenti capitoli.
Dopo la preparazione e disposizione delle attrezzature utili per i rilievi in campo, sono state inizialmente ricavate le coordinate GNSS per mezzo della **Stazione totale**.
Di norma, quest'ultima viene utilizzata se le condizioni ambientali sconsigliano l'uso del ricevitore, in quanto sono presenti "ostacoli" come folta vegetazione arborea, dislivelli accentuati, presenza massiccia di edifici, ecc. appoggiandosi a detti punti "esterni". Grazie ad essa, è possibile la misurazione di angoli e (nel castagno analizzato), distanze, con cui è

possibile penetrare nell'appezzamento con poligonali che possono evitare o aggirare gli ostacoli presenti.

In sintesi, la **Stazione totale** è uno strumento elettro-ottico (generalmente posizionato su un treppiede), il quale, oltre ad eseguire altre specifiche ed utili elaborazioni, misura principalmente le tradizionali grandezze topografiche, ovvero:

Angoli generalmente in graduazione centesimale, orizzontali o azimutali e zenitali

Distanze misurate in metri fino al centimetro o al millimetro

Dislivelli, come differenze di quote fra due punti, misurati in metri fino al centimetro o al millimetro

Coordinate cartesiane, le quali costituiscono un'elaborazione dello strumento, una volta impostati l'azimut di orientamento, il Sistema di Riferimento e la quota del punto-stazione, l'altezza strumentale e l'altezza del prisma, quest'ultima costante o variabile per ogni punto battuto.

Grazie a tutte queste informazioni, lo strumento elabora velocemente le coordinate cartesiane planimetriche e la quota del punto collimato, nello stesso sistema a cui è riferito il punto-stazione, con la possibilità della loro registrazione automatica.

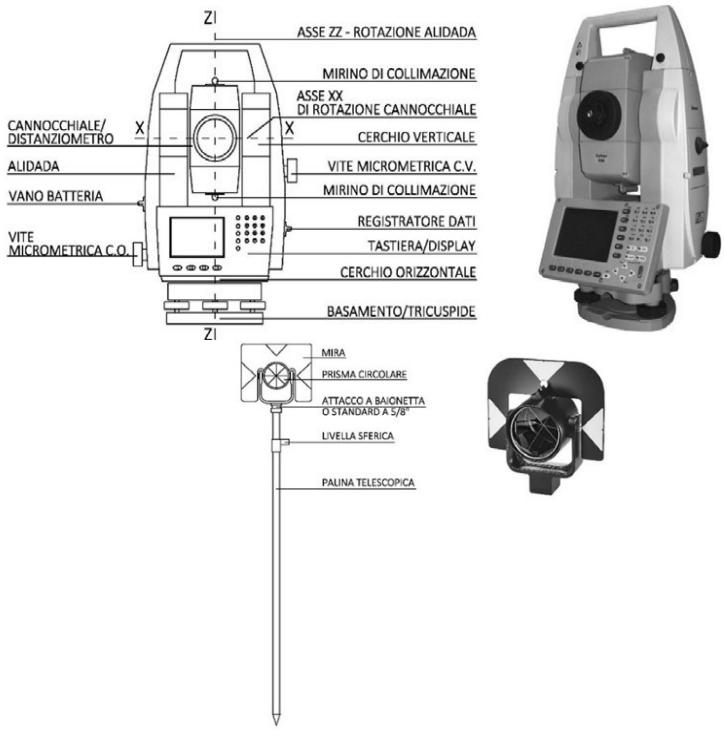


Figura 2.2.1. – Descrizione delle componenti dello strumento (sx), prisma su palina telescopica (dx)

FONTE: www.epc.it

Per mezzo della Stazione Totale, è stato inizialmente rilevato il punto 0, il quale ha costituito sia il posizionamento dello strumento emettitore "base", sia il punto di partenza di registrazione, nel quale verrà effettuata una traiettoria semicircolare per mezzo di un ricevitore "rover". La traiettoria effettuata ha previsto degli "steps" intermedi, costituiti da cinque target, oltre a quello di partenza (quest'ultimo definibile "punto 0"), precedentemente posizionati. Ogni target posizionato è stato utilizzato come punto "battuto", per ricavarne angoli e distanze di ognuno, ottenendo, a traiettoria ultimata (ritorno al punto 0 di partenza), le coordinate GNSS dell'individuo di castagno analizzato.
La coordinate prodotte e la traiettoria rilevata risulteranno molto utili nelle fasi successive di elaborazione dati.

2.2.1. Fotogrammetria da drone

Una volta ottenute le coordinate del castagno oggetto di analisi, sono state applicate tecniche di fotogrammetria aerea mediante l'utilizzo del drone **DJI Mavic Mini 2**, dotato di un ricevitore e di un'unità di misura inerziale IMU, consentendo così un corretto monitoraggio dell'assetto della camera da presa presente nello stesso.
Per poter ottenere dei risultati con valenza metrica è stato necessario predisporre un ricoprimento dei fotogrammi di circa l'80% (maggiore del 60% utilizzato nella fotogrammetria classica), rilevando dei punti di coordinati note a terra detti Ground Control Point (GCP), i quali verranno poi elaborati nel software dedicato, valutando sia corretta esecuzione del rilievo sia la ricostruzione della nuvola di punti.
Questi accorgimenti hanno permesso così di ottenere dei buoni risultati con un processo semiautomatico.

Figura 2.2.1.1. - Drone Dji Mavic Mini 2 utilizzato nel rilievo

Per entrambi i rilievi in campo (eseguiti a luglio e dicembre), il drone utilizzato ha eseguito un percorso "ad anello", ricavando degli scatti nadirali (dall'alto), sia del castagno interessato, sia dell'ambiente circostante, il quale verrà poi eliminato nell'operazione di ripulitura, eseguita grazie all'uso di un software.
I rilevi sono risultati rilevanti per acquisire in particolare, la chioma dell'individuo, trasformandola poi in nuvola di punti, la quale verrà poi esportata ed utilizzata nella fase successiva di elaborazione dati, insieme alla vista del fusto prodotto da reflex e dello "scheletro" vero e proprio prodotto dal Kaarta-Stencil 2.

Una volta effettuati i rilievi in campo ed estrapolato per ciascuno gli scatti elaborati, è stato utilizzato il software **Agisoft Metashape**, il quale ha automatizzato i processi di orientamento interno ed esterno di ciascun fotogramma prodotto dal drone, allineando ciascuna immagine prodotta e riprodotto infine la nuvola di punti, la quale verrà trattata nei successivi capitoli.

2.2.2. Fotogrammetria terrestre

Successivamente alla fotogrammetria da drone, sono stati effettuati i rilievi di fotogrammetria terrestre, partendo inizialmente dalla presa e acquisizione di ogni immagine scattata.
Di norma, se un determinato oggetto dispone di una forma semplice, ricostruibile tramite elementi come superfici piane e cilindriche, saranno sufficienti solo pochi punti uniti da poligoni a rappresentare i risultati delle misurazioni; tuttavia, nei rilievi si avranno però a che fare con "figure" composte da forme più complesse, rappresentabili quindi da molteplici punti.
Entrambi i rilievi, pertanto, sono stati organizzati secondo gli *step* della fotogrammetria tradizionale, ovvero fase di presa, procedura di calibrazione, fase di orientamento esterno delle immagini (Funzione Smart Point), messa in scala del progetto fotogrammetrico, calcolo nuvola di punti e Dense Surface, ricostruzione della superficie, unione dei progetti.
La fotocamera utilizzata consiste nel modello **Sony Slt – A77V**, dotata di una definizione pari a 24.3 Megapixel e una dimensione dell'immagine in formato 16:9 a risoluzione FullHD 1920x1080.

Figura 2.2.2.1. - Reflex utilizzata nei rilievi di luglio e dicembre

Grazie ad essa, è stato fotografato il fusto del castagno effettuando un percorso circolare in senso orario, impostando come punti di riferimento dei targets tondi posizionati in corrispondenza del castagno stesso, eseguendone così una corretta traiettoria ed un'ottimale fase di presa, riprendendo ogni singolo dettaglio del quale l'individuo è costituito.
Lo schema eseguito per l'acquisizione dell'immagine consiste nell'effettuazione di due percorsi circolari in senso orario, dove il primo ha interessato principalmente il fusto ed i

contrafforti radicali del castagno, avendo cura anche di riprendere i target tondi posizionati in corrispondenza dell'individuo (utili per la successiva elaborazione) e il secondo percorso ha ripreso fusto fino al punto di inserzione chioma.

Figura 2.2.2.2. - Schema di rilievo prodotto da reflex: a sx il fusto e i target utilizzati per impostare la traiettoria, a dx fusto e punto di inserzione chioma del castagno analizzato

Successivamente, le foto prodotte sono state esportate ed elaborate su Agisoft Metashape, mediante le modalità ed impostazioni già definita nella precedente fase da drone.

2.2.3. Nuvola di punti Kaarta-Stencil 2

Come parte finale della fase in campo, entrambi i rilievi sono stati eseguiti per mezzo del **Mobile Laser Scanner Kaarta-Stencil 2**; dispositivo SLAM il quale, grazie ad un percorso prestabilito, ha permesso la ricostruzione della nuvola di punti (in formato las) del castagno analizzato, costituendone la struttura per le due nuvole di punti elaborate nelle precedenti operazioni (la prima per mezzo del drone, la seconda per mezzo della reflex).
Lo strumento utilizzato dispone di uno scanner 3D mobile integrato, il quale rileva in tempo reale la nuvola di punti dell'ambiente comprendente l'individuo oggetto di analisi, esportando e riproducendone i risultati "grezzi" tramite uno schermo portatile, collegato mediante cavo USB.
A livello strutturale, quindi, il MLS Kaarta-Stencil 2 costituisce uno strumento autonomo, leggero e maneggevole, adatto a qualsiasi uso e piattaforma di appoggio. Grazio al suo scanner 3D mobile, è in grado di rilevare ingenti quantità di punti, ricostruendone l'individuo analizzato e il suo ambiente circostante, grazie alla tecnica del loop-close, di cui è dotata ogni tecnologia SLAM. (Petri, 2010).

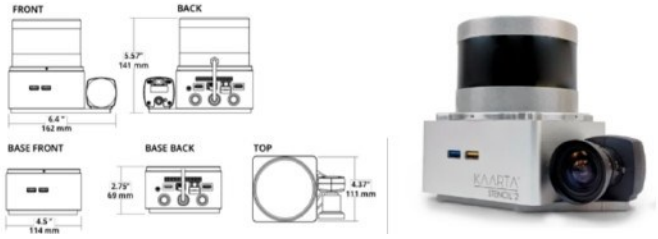


Figura 2.2.3.1. – Kaarta-Stencil 2
FONTE: Applicazione e validazione nell'uso di un mobile 3D scan LiDAR

Prima di procedere all'esecuzione vera e propria del rilievo è stato predisposto a posteriori il percorso da effettuare, il quale ha ripreso l'individuo in tutti i suoi particolari, prendendo però in considerazione un'area più ampia, al fine di una più corretta e sicura rilevazione di tutti i dati utili all'acquisizione della nuvola di punti finale, facendo sì che quest'ultima (cui verrà elaborata in CloudCompare), comprenda tutti i punti necessari all'elaborazione, ricostruendo al meglio l'individuo oggetto di analisi.
Il percorso, difatti, è stato eseguito in modalità "*hand-held*", seguendo un senso antiorario, per mezzo dello strumento sorretto su di un'asta telescopica, seguendo l'ordine di ciascun target, come definito nella bozza sopra riportata.

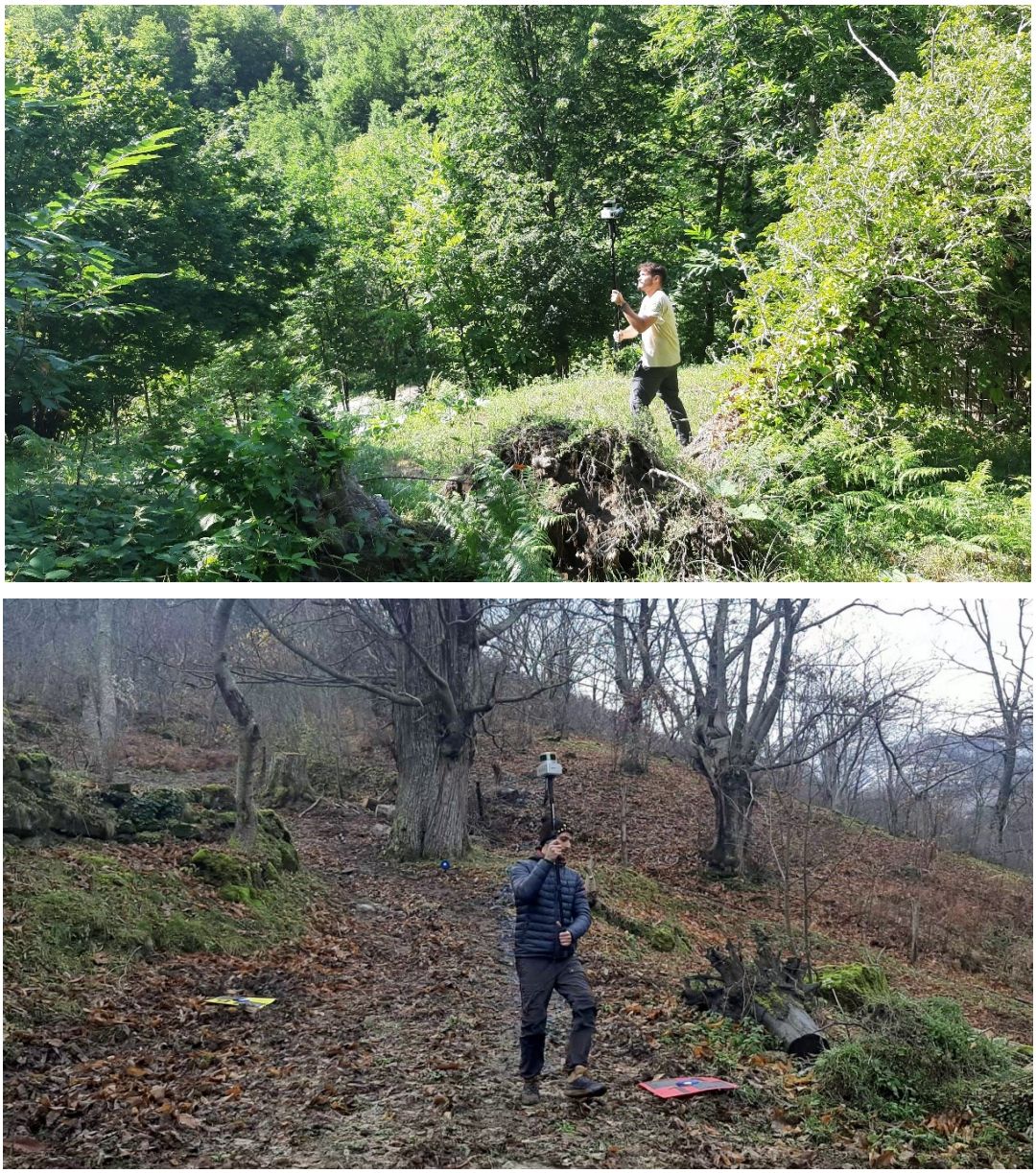


Figura 2.2.3.2. – Utilizzo del Kaarta-Stencil 2 per l'acquisizione del castagno analizzato: rilievo estivo (in alto) ed invernale (in basso)

Il percorso è stato effettuato intersecando più volte le varie traiettorie con lo scopo di ottenere una maggiore definizione di tutti gli oggetti nel campo visivo, elementi strutturali compresi.
A rilievo finito, sono stati effettuati processi di analisi delle nuvole di punti (castagno in habitus estivo ed invernale) tramite il software CloudCompare, le quali hanno permesso di fare osservazioni sulla performance della tecnica di rilievo effettuata, ottenendo infine una nuvola di punti da cui sono stati estratti i dati metrici del castagno oggetto di analisi.

3. RISULTATI

3.1. Fotogrammetria da drone

Una volta conclusa la fase di rilievo in campo, la prima operazione effettuata ha consistito nel valutare quali fotogrammi potranno tornare utili per la corretta acquisizione del castagno, scartando quelli che invece hanno creato confusione in termini di acquisizione immagini (ad esempio ripresa parziale o nulla), svantaggiosi sia per il rilievo fine a sé stesso sia per la costruzione finale della nuvola di punti.

È stato utilizzato il software Agisoft Metashape, il quale, tramite elaborazione della nuvola di punti, ne ha permesso la restituzione, per poi essere esportata ed elaborata nella successiva fase di rappresentazione.

Il principio base dell'elaborazione in Metashape consiste nel realizzare la nuvola partendo da un determinato numero di fotogrammi, i quale possono essere scattati da qualsiasi posizione a patto che l'oggetto in questione sia ripreso in almeno due di essi, passando per steps comprendenti l'orientamento delle immagini e la costruzione finale del modello.

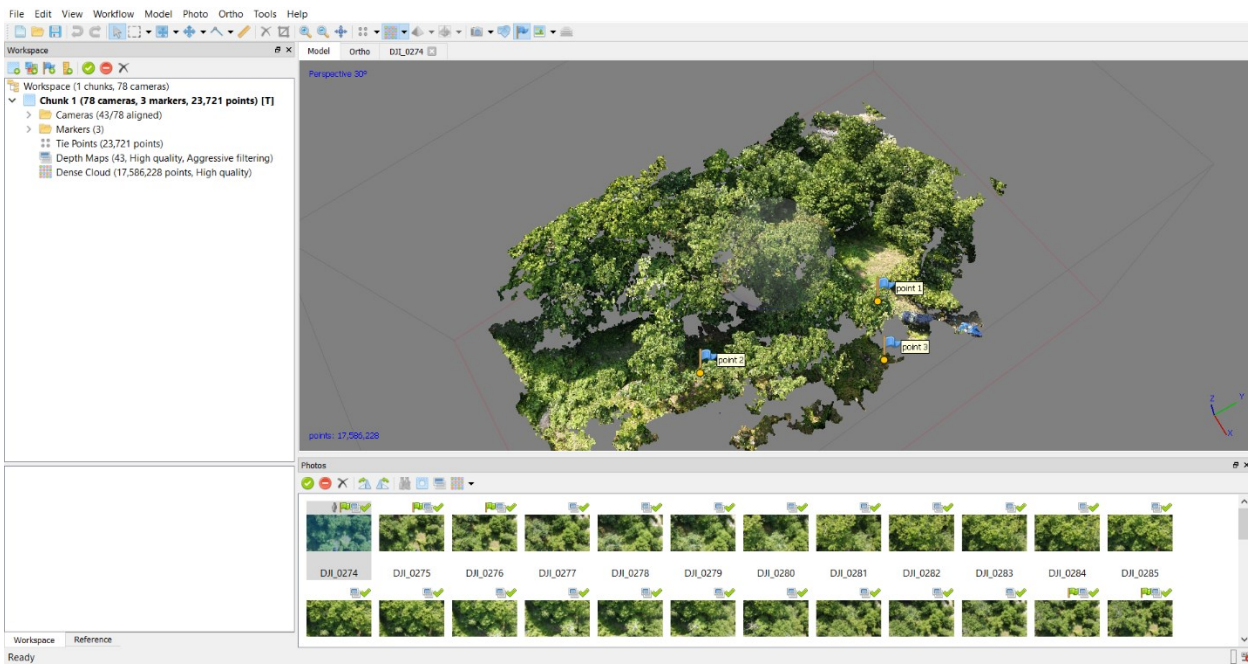


Figura 3.1.1. - Interfaccia principale di Metashape

Inizialmente sono stati importati i fotogrammi acquisiti durante il rilievo in campo (in totale 108) tramite il comando "Add Photos". Di essi, è stata stimata la qualità (prima fase di scrematura), la quale stabilisce mediante un indice che va da 0 (pessima qualità) a 1 (ottima

qualità) quali immagini possono essere scartate o mantenute, in base alla loro definizione e conformità nel rilievo (comando "Estimate Image Quality", applicato a tutte le immagini); di norma, quelle riportanti un valore minore o uguale a 0.7 vengono scartate.

Tale preselezione ha comportato l'eliminazione di una cospicua parte delle immagini acquisite; tuttavia, è risultata fondamentale in quanto quelle rimanenti sono state utilizzate per la successiva operazione di allineamento, relativa all'orientamento interno di ogni fotogramma prodotto (comando "Allign Photos").

Tale operazione è costituita da parametri di accuratezza dell'immagine, punti chiave con i quali comporre la preliminare nuvola sparsa di punti ed un limite di punti legame, i quali mettono in comune la singola immagine selezionata con le altre costituenti la nuvola, tramite il calcolo della distanza e somiglianza.

L'accuratezza impostata nel progetto è *High*, la quale considera ogni singola immagine rapportata alla sua risoluzione reale, ovvero senza andare ad eseguire un sottocampionamento. Di norma viene spuntata l'opzione "Generic Preselection" in quanto velocizza le operazioni consistenti nella preselezione delle coppie da confrontare utilizzando una risoluzione minore delle immagini. L'opzione "Reference Preselection" permette di tener conto delle coordinate dei centri di presa del fotogramma, se sono note, o delle coordinate dei GCP inseriti in maniera tale da andare a creare un modello georeferenziato e scalato correttamente. A seconda del modello generato, le coordinate prese in considerazione per orientare i fotogrammi sono state fatte variare in modo tale da valutare il valore degli scarti che si ottengono andando a considerare noti solo i GCP, solo le coordinate del centro di presa dei fotogrammi o, infine, entrambi.

Lanciando il processo di orientamento, il programma individua prima i Tie Point (impostati manualmente a 55000), ovvero quei punti in comune del singolo fotogramma, in rapporto a tutti gli altri ed il numero dei Key Point (impostato a 40000) il quale può essere aumentato o diminuito per un corretto allineamento. Quando i punti vengono individuati in modo omologo il software registra la posizione tridimensionale e l'intensità, calcolandone così le coordinate dei punti omologhi che compongono la nuvola di punti sparsa.

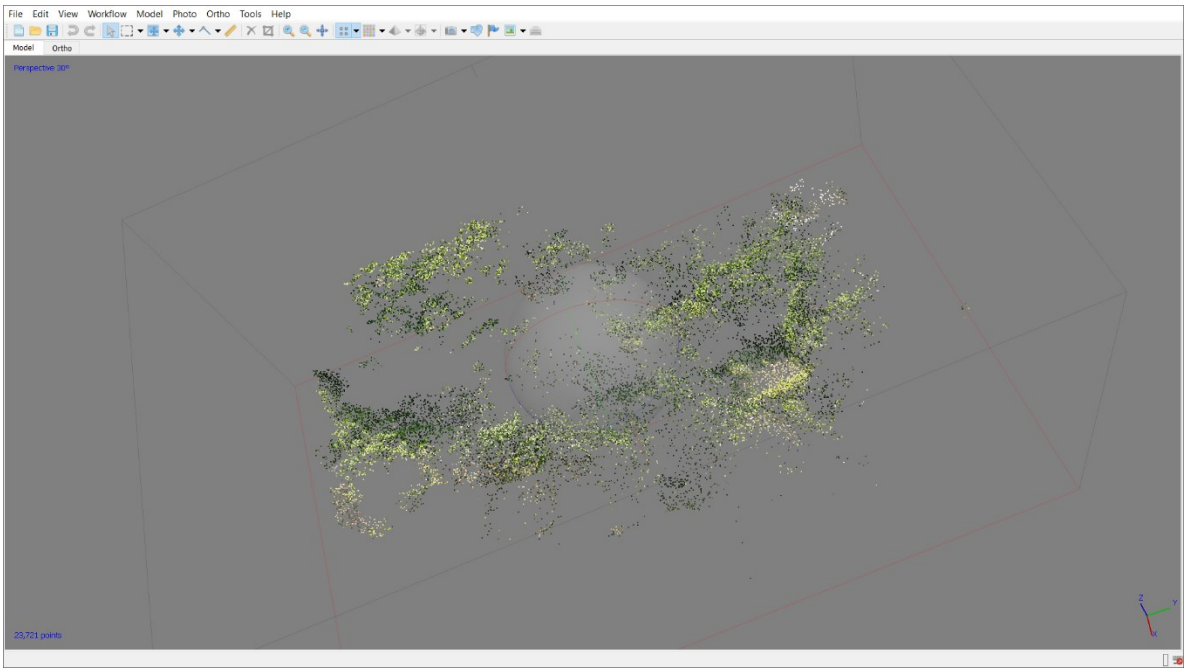


Figura 3.1.2. - Nuvola sparsa di punti (Point Sparse Cloud)

I parametri di orientamento interno calcolati verranno successivamente impostati tenendo conto dei GCP.

Per andare ad effettuare un rilievo con la fotogrammetria diretta basterebbero le coordinate dei punti di presa dei fotogrammi. Tuttavia, durante le fasi di rilievo sono stati posizionati dei marker, ovvero punti noti presi a terra, dei quali sono state ottenute le coordinate per mezzo del GNSS o, in caso quest'ultimo non ne consente l'ottenimento, la Stazione totale. Durante il rilievo in campo, i marker sono stati predisposti in forma di target a terra ed utilizzati poi come GCP. Applicati nel software, i marker migliorano la precisione del modello finale ottenuto, eliminandone gli errori sistematici.

Figura 3.1.3. - Target utilizzato in campo, su cui verrà immesso il marker

Per prima cosa dal menù Reference occorre inserire manualmente le coordinate dei marker individuati in campo, successivamente si selezioneranno le immagini in cui sono presenti i target e per ciascuno inserire il relativo marker (comando “Add Marker”) nel punto di congiunzione dei triangoli neri.

Una volta individuato il primo target, dato un qualsiasi fotogramma, il software andrà a selezionare tutte le foto in cui è presente quest’ultimo, fornendo una posizione approssimata. A seconda della qualità della foto in corrispondenza di quel punto si andrà a ricollimare con precisione posizionando manualmente il marker nella posizione corretta. Solo i punti confermati saranno utilizzati per le operazioni successive.

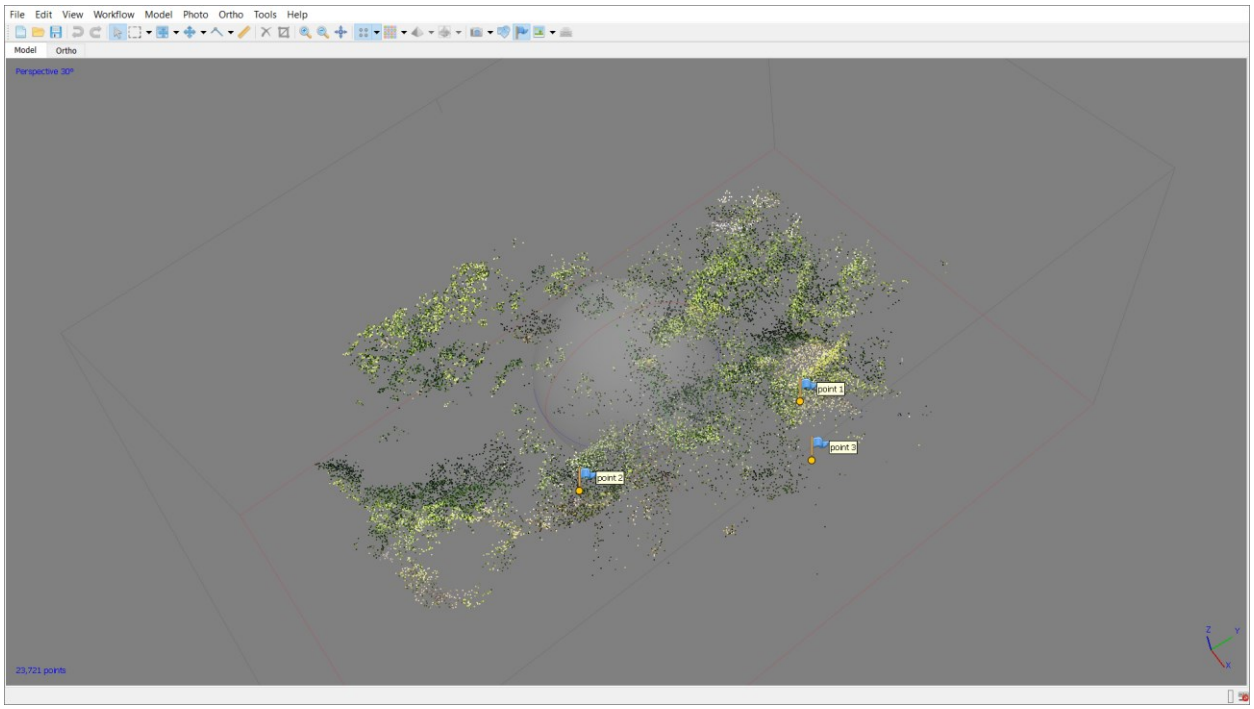


Figura 3.1.4. - Nuvola sparsa di punti con applicazione dei marker

Il passo successivo consiste nell’andare ad ottimizzare i parametri di orientamento interno ed esterno tenendo conto delle coordinate dei marker e cioè dei GCP inseriti. Prima di eseguire questa operazione si esegue un secondo allineamento di ciascuna immagine, selezionando gli elementi da tenere in considerazione. Una volta eseguito, sono stati scelti quali parametri relativi all’orientamento interno (lunghezza focale, coordinate del punto principale, coefficienti di distorsione radiale e tangenziale), minimizzando gli scarti sui punti di appoggio, stimando i parametri della triangolazione aerea e la metricità della camera da presa.

Infine, è stata prodotta la nuvola densa dei punti posizionati (comando “Build dense cloud”) creandone inizialmente una a bassa qualità e con filtro di profondità minimo (quest’ultimo usato per riprodurre profondità, dettaglio e rilievi del castagno analizzato) verificandone la corretta costruzione, creando poi la nuvola vera e propria, la quale è stata infine esportata ed utilizzata per la fase successiva, utile per la rappresentazione finale del castagno oggetto di analisi.

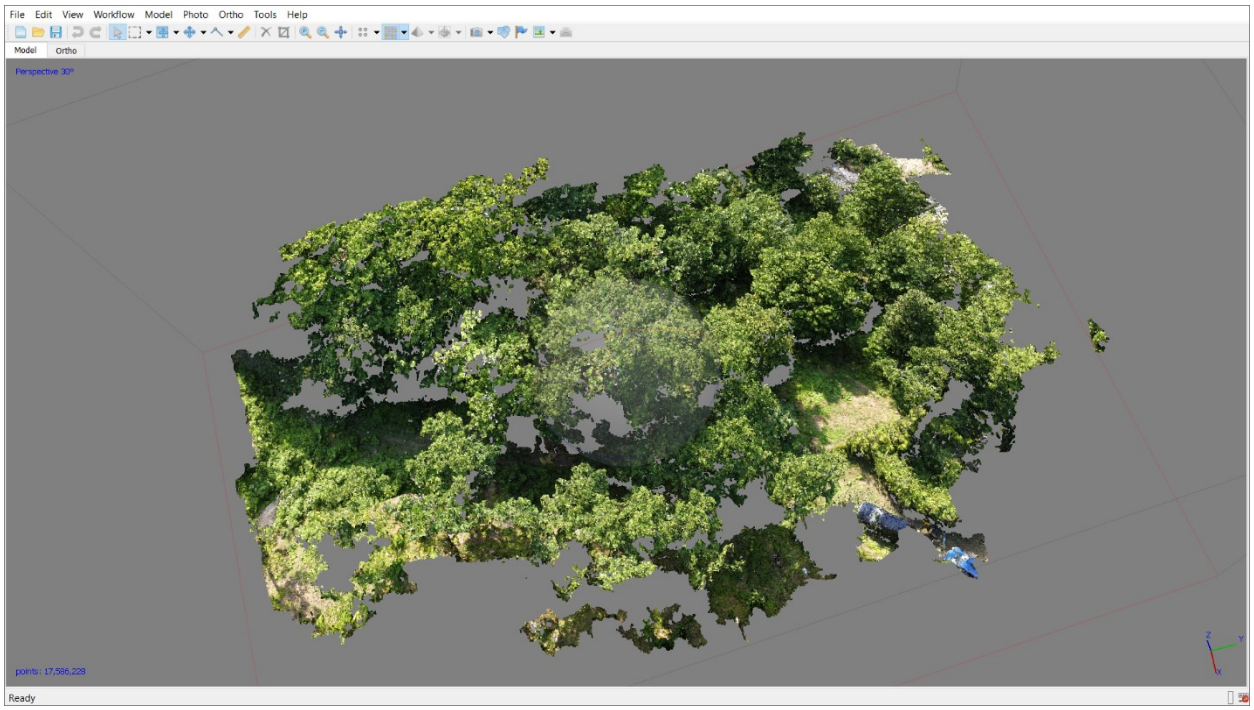
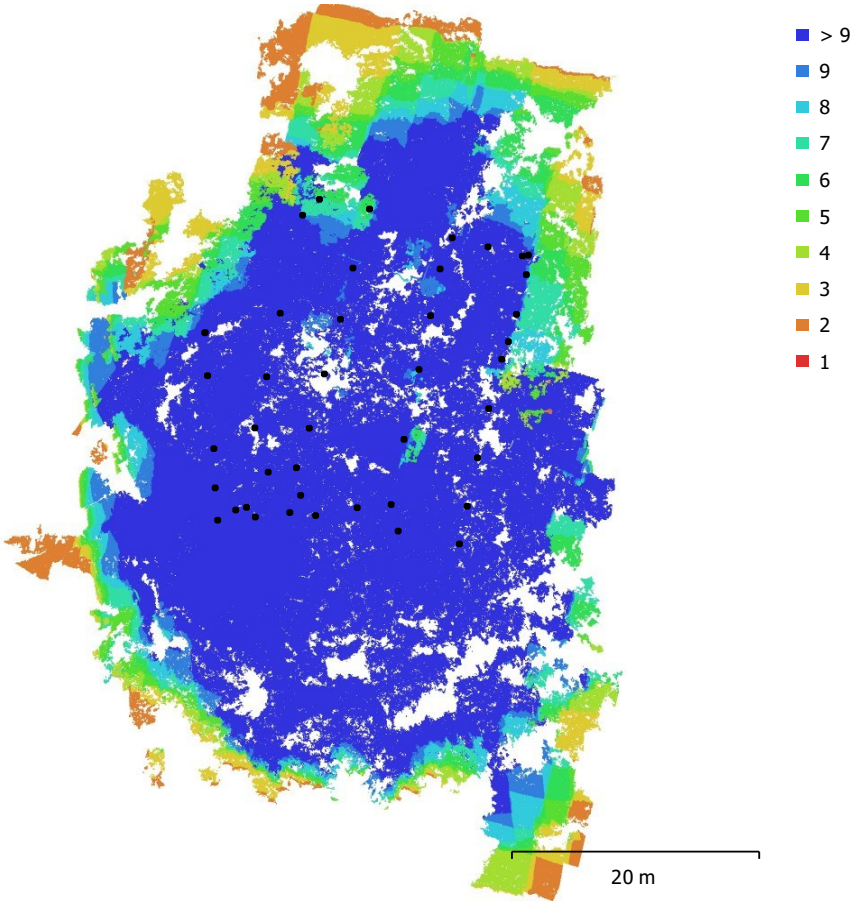


Figura 3.1.5. - Nuvola densa finale, pronta per essere esportata

Elaborata la nuvola di punti, il software ha generato un report nei quali sono riportati quei dati contenenti i parametri relativi alle operazioni svolte, incentrandosi sul piano di volo effettuato dal drone, l’orientamento interno della camera da presa, l’orientamento esterno relativo ai GCP (marker) inseriti, restituzione della nuvola di punti finale e gli errori scaturiti dall’intera procedura. Tale report va a costituire una validazione ufficiale dell’elaborato prodotto, detenendo se la nuvola di punti rappresentata va scartata o presa per buona, impiegandola così nella fase finale di esportazione dal software.

Primo parametro cui si tiene conto concerne la modalità di acquisizione di ciascun fotogramma impiegato nella costruzione della nuvola di punti, andando ad osservare il piano di volo effettuato dal drone e relativo matching tra un fotogramma e il successivo, in quanto (secondo i principi della fotogrammetria Close Range), ogni fotogramma acquisito è soggetto ad una sovrapposizione con il suo adiacente pari al 60% in senso longitudinale (overlap) ed il

15% in senso laterale (sidelap), andando quindi a creare un'area comune nella quale l'oggetto viene acquisito più di una volta, permettendone così la corretta ricostruzione della forma e geometria nel software. Come riportato in precedenza, il rilievo in campo ha interessato prevalentemente la ripresa nadirale (dall'alto) comprendente il castagno analizzato ed il suo ambiente circostante, raffigurandone le sue morfologie e peculiarità.



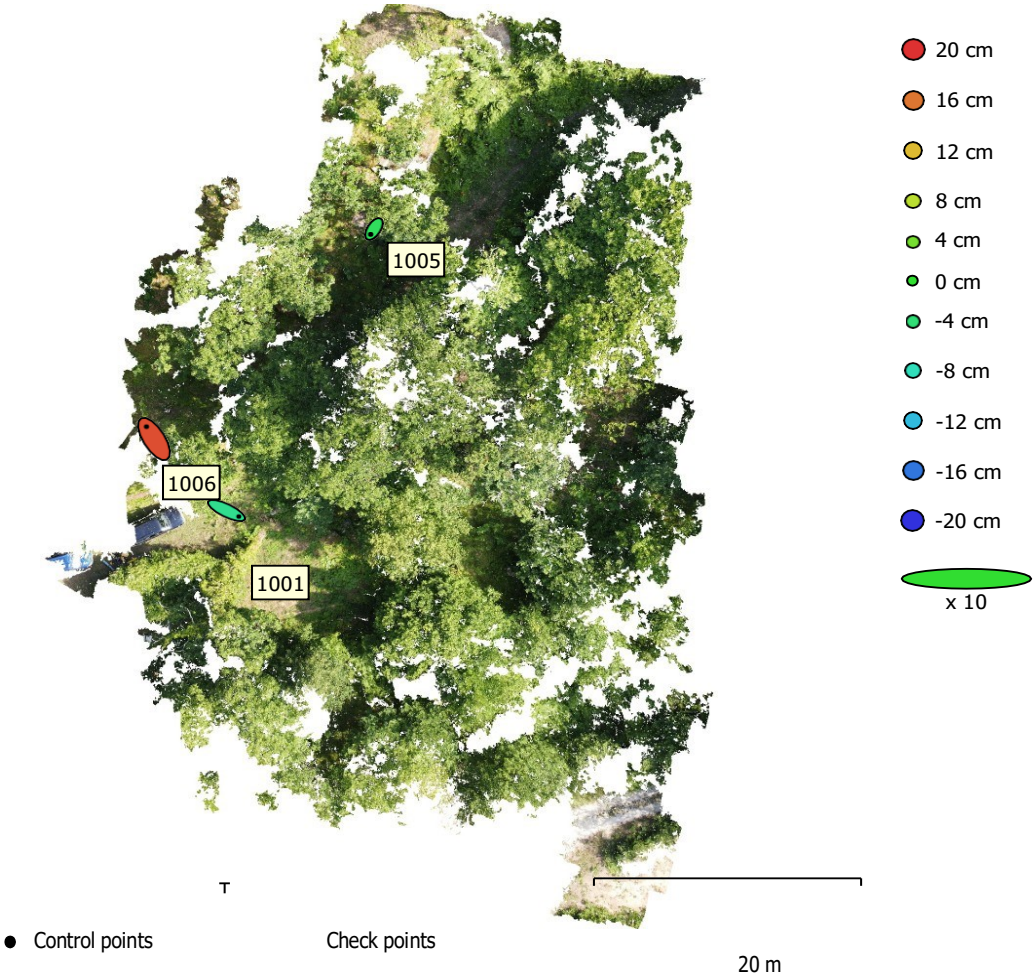
Number of images	71	**Camera stations**	43
Flying attitude	31,3 m	**Tie Points**	168,657
Ground resolution	9,27 mm/pix	**Projections**	398,648
Coverage area	1,99e+0,03 m2	**Reprojection error**	0,426 pix

Tabella 3.1.1. - Posizione delle camere ed overlap dei fotogrammi

Essendo il rilievo effettuato in ambiente forestale, il procedimento di acquisizione ha generato dei piccoli spostamenti tra un fotogramma e il suo adiacente, creando quindi un errore di matching per ciascuno, data non staticità degli oggetti rappresentati nell'area.

Altro errore lo si è ritrovato durante la fase di orientamento di ciascun fotogramma, relativo al numero di marker utilizzati nel software, i quali vanno a migliorare mediante triangolazione la

precisione del modello finale, restituendo quindi le coordinate XYZ prodotte dalla Stazione totale (Sistema di Riferimento locale).



Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1001	18.050	-9.764	-5.446	21.231	0.424 (16)
1005	-4.494	-8.040	-2.522	9.550	0.323 (13)
1006	-10.519	19.520	18.337	28.774	0.777 (4)
Total	**12.337**	**13.430**	**11.140**	**21.369**	**0.449**

Tabella 3.1.2. - Punti di controllo a terra (GCP) con relativa matrice riportante l'errore centimetrico e in pixel

Data la complessità dell'ambiente di rilievo ed il numero dei GCP impiegati, l'errore presente nell'elaborazione della nuvola di punti è stato ritenuto accettabile, andando così a validare la nuvola di punti rappresentata e procedendo alla finale esportazione della stessa.

Il procedimento sopra esposto è stato applicato sia per il rilievo estivo, sia per quello invernale.

3.2. Fotogrammetria terrestre

Successivamente al rilievo in campo effettuato dalla reflex (fotogrammetria terrestre), sono state importate ed elaborate le immagini acquisite del fusto di castagno, per mezzo del software Agisoft Metashape, il quale andrà a produrre la relativa nuvola di punti per poi alla fine esportarla.

I fotogrammi acquisiti sia da terra (fotogrammetria terrestre) che dal drone (fotogrammetria aerea), permettono di determinare forma e posizione dell'individuo mediante una procedura di restituzione fotogrammetrica; per far ciò è necessario, partendo dai fotogrammi acquisiti, conoscere le relazioni geometriche in base a cui si sono formate le fotografie, ovvero una prospettiva centrale, geometricamente rigorosa, dell'oggetto fotografato.

Grazie all'algoritmo Structure from Motion, si costruisce una nuvola di punti tridimensionale, mediante la sovrapposizione di ciascun fotogramma, secondo i principi della fotogrammetria stereoscopica.

La differenza con la fotogrammetria convenzionale sta nel fatto che la presa della camera e la geometria sono ricostruite nello stesso istante utilizzando una procedura iterativa di aggiustamento con una quantità di dati molto ridondante. Questo processo lavora attraverso un'identificazione automatica di corrispondenze tra diverse immagini, identificando in ogni fotogramma delle caratteristiche comuni, rilevando così la posizione della posizione della camera e le coordinate oggetto. È importante sottolineare come questo procedimento sia applicabile in maniera più efficace ad un set di immagini con un alto grado di sovrapposizione che catturino l'intera struttura 3D da diverse angolazioni.

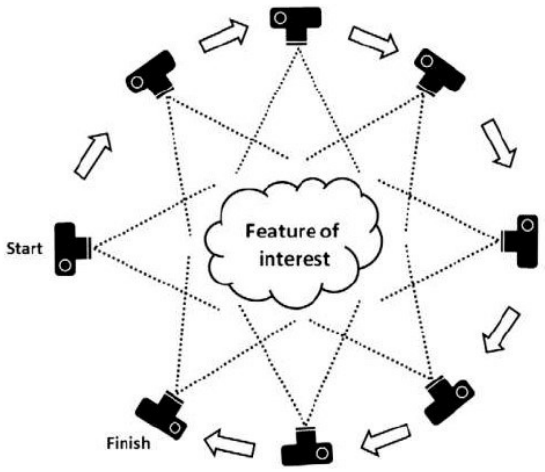


Figura 3.2.1. - Schema di acquisizione Structure from Motion

I procedimenti svolti nel software di analisi (importazione fotogrammi, stima della qualità, primo allineamento, applicazione marker, secondo allineamento ed ottimizzazione delle acquisizioni, costruzione della nuvola finale) sono stati effettuati in maniera analoga per l'elaborazione della nuvola densa rilevata dalla fotogrammetria da drone; una particolarità degna di nota è stata riscontrata durante la fase di allineamento dei fotogrammi, in quanto non è stata rappresentata la vista nadirale (rispetto alla nuvola prodotta per il drone) dell'individuo analizzato, ma ne sono state riprese la vista frontale e laterale, impostando come GCP i tre target tondi (applicazione dei marker), stanziati in corrispondenza dell'individuo durante il rilievo in campo.

Nel software Metashape, sono state elaborate ed allineate 63 foto, le quali (come precedentemente spiegato) acquisendo il fusto dell'individuo analizzato, hanno prodotto la nuvola densa di punti interessata.

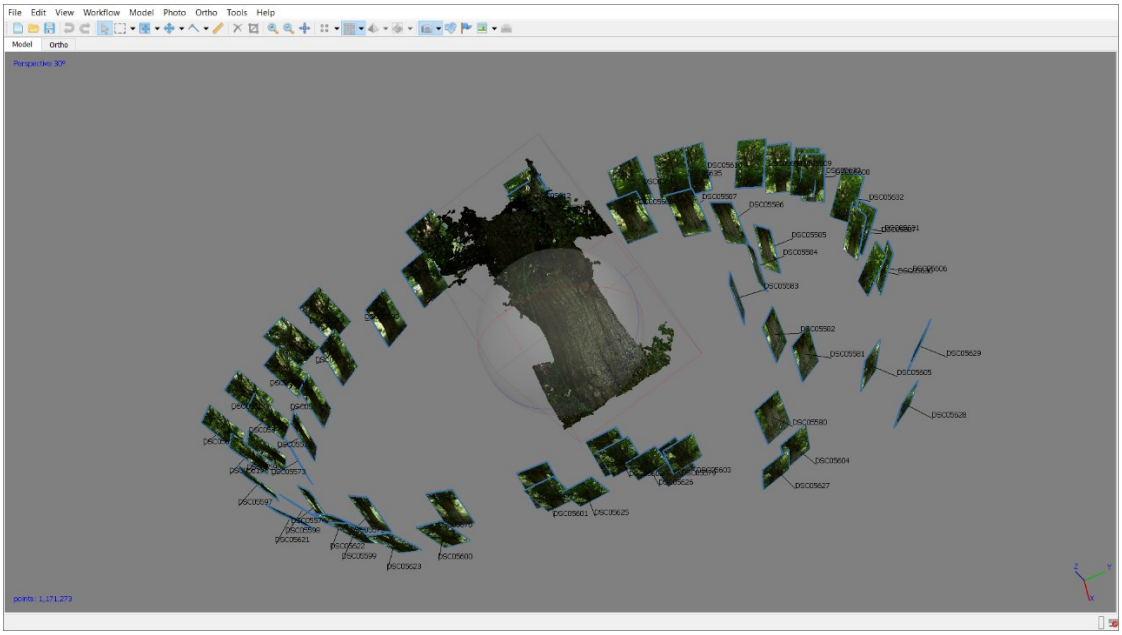


Figura 3.2.2. - Nuvola densa del fusto ottenuto con la fotogrammetria da reflex.

Una volta che quest'ultima è stata prodotta ed esportata, l'intero modello è stato posto ad elaborazione mediante l'ausilio del software CloudCompare, risultando fondamentale per la rappresentazione finale del castagno, insieme alle nuvole di punte ottenute dal Kaarta-Stencil 2 e dal drone.

3.3. Nuvola punti Kaarta-Stencil 2

In seguito al rilievo in campo, è stata importata ed elaborata la nuvola di punti, per mezzo del software CloudCompare, il quale oltre a rappresentare il castagno oggetto di analisi, ha riunito gli output prodotti dalla fotogrammetria aerea (chioma) e fotogrammetria terrestre (fusto e contrafforti radicali), consentendone così una completa e finale rappresentazione, la quale verrà trattata nel successivo capitolo.

Inizialmente è stata importata la nuvola di punti (in formato las) prodotta dal MLS, la quale include sia il castagno oggetto di analisi che il suo ambiente circostante, in quanto il Kaarta-Stencil 2, durante l'esecuzione di rilievo in campo, viene sorretto dall'asta, posto quindi ad una posizione superiore all'altezza effettiva dell'operatore che lo ha utilizzato, acquisendo di conseguenza un'area più ampia rispetto alla traiettoria effettuata.

Successivamente all'importazione, è stato impostato il Sistema di Riferimento locale (grazie alle coordinate prodotte dalla Stazione totale) dell'area di studio cui vegeta il castagno, in quanto il MLS è sprovvisto di sensore GNSS. Risoluzione, completezza dei dati rilevati, abilità dell'operatore e velocità di avanzamento dell'acquisizione sono parole chiave fondamentali per una corretta acquisizione della nuvola di punti, la quale verrà poi sottoposta ad elaborazione nel rispettivo software (Nocerino et al. 2017).

Al fine di identificare l'individuo, sono risultati utili i target tondi predisposti in campo, in quanto, essendo disposti di superficie riflettente, mediante fascio laser del Kaarta-Stencil 2 ne è risultata possibile l'identificazione nel software, con la possibilità di poter roto-traslare e scalare la nuvola di punti in un sistema geodetico noto grazie al rilievo topografico. Va sottolineato inoltre, che nel caso della modalità d'uso *hand-held*, in funzione all'esposizione in direzione orizzontale del fascio laser per poter rilevare superfici verticali più alte rispetto all'apertura del fascio laser, è possibile inclinare lo strumento, ma non più di 15° in modalità ferma.

Oltre la rappresentazione del castagno analizzato, la nuvola di punti generata dal Kaarta-Stencil 2, si presenta molto densa e particolarmente precisa. Nel software, la si può visualizzare in scala di grigi (grey scale) e nella scala dei valori scalari di tempo, intensità e riflettanza; questi ultimi conferiscono una facile e corretta interpretazione della nuvola stessa, mostrandone gli oggetti acquisti seguendo la traiettoria e tempistica del rilievo (time) e consentendo l'individuazione degli elementi presenti sulla base delle loro caratteristiche intrinseche come dimensione, componente metrica ed esposizione rispetto al fascio laser.

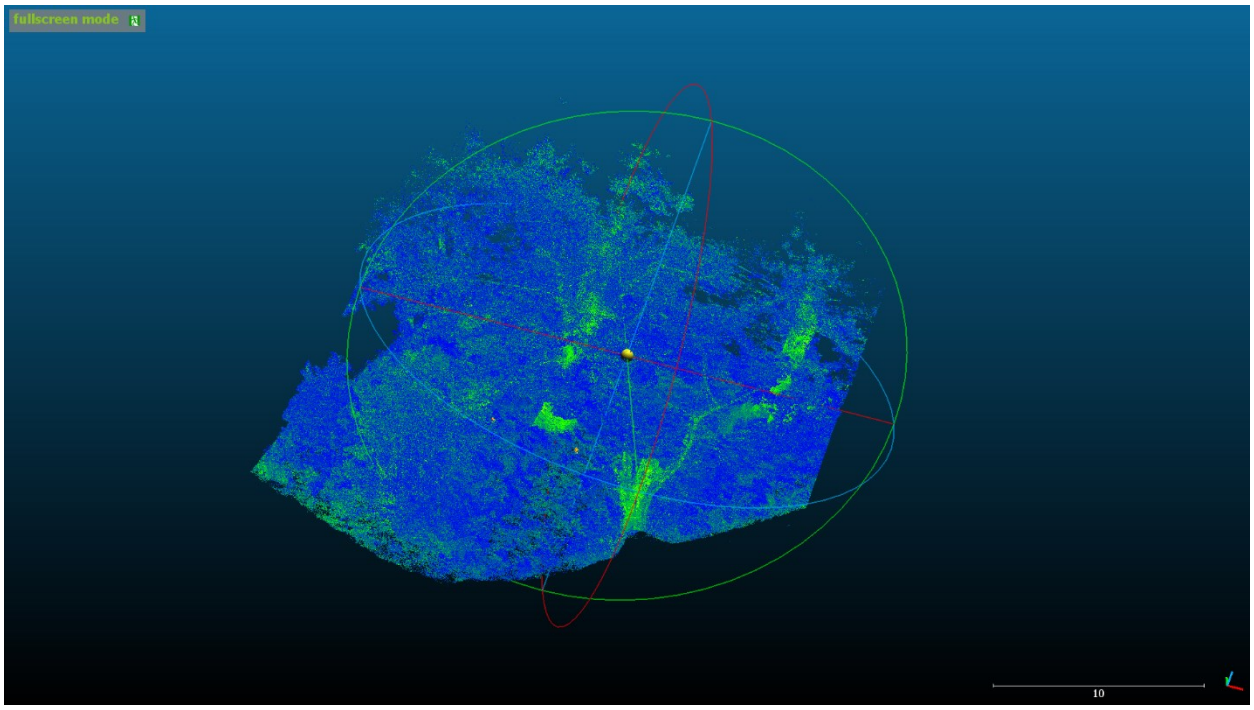


Figura 3.3.1. - Nuvola di punti acquisita, comprendente il castagno oggetto di analisi

La prima operazione effettuata ha consistito nella ripulitura ed isolamento dell'individuo di castagno, eliminandone l'ambiente ed il popolamento circostante, visualizzando così nel dettaglio l'individuo di analisi. Per far ciò, è risultata fondamentale nel ripulire la nuvola di punti acquisita dal Kaarta-Stencil 2, isolando il castagno oggetto di analisi. Tale operazione prende il nome di **segmentazione**, la quale (secondo la definizione riportata nel software), consente all'utente di segmentare o ritagliare le entità selezionate, attraverso un poligono (di norma rettangolare) o una polilinea 2D, la quale andrà ad eliminare, in tempo reale, i punti appartenenti alla nuvola di punti tridimensionale, a seconda di come viene orientata, ruotata o traslata. Tale processo può essere ripetuto più volte, il quale, in base ad ogni rototraslazione man mano effettuata, si elimineranno quei punti "sporchi" ottenendo così il prodotto finale oggetto di rappresentazione.

Tale operazione è stata applicata ad entrambe le nuvole di punti, la prima ottenuta nel rilievo estivo, la seconda nel periodo invernale, scorporando l'individuo oggetto di analisi in

Scheletro: comprendente fusto, rami principali, fino al punto d'inserzione chioma

Chioma: comprendente i rami secondari, foglie, raggiungendo il cimale

In contemporanea alla segmentazione, sono stati usati dei filtri, i quali hanno permesso la computazione di determinate caratteristiche geometriche (comando "Compute geometric features"), di una o più nuvole di punti, atte alla rappresentazione del modello finale. Durante la loro applicazione, due in particolare ne sono stati usati:

Number of Neighbors, il quale determina la densità di un rispettivo punto (o gruppo di punti) con quello adiacente, in relazione al volume o superficie del modello finale.

Verticality, relativo al gradiente d'intensità di un punto (o gruppo di punti) con quelli contigui, mediante una scala cromatica, la quale definisce l'intensità o tempo di ritorno con cui ciascun punto è stato registrato nel rilievo.

Nel software, è stato possibile regolare la loro intensità, per mezzo di una scala cromatica composta da colori caldi (rosso – giallo - verde chiaro), relativa ad una maggiore intensità dei punti in una determinata zona o parte di un oggetto (per entrambi i rilievi tali colorazioni sono state ritrovate lungo il fusto principale, rami primari e parte dei rami secondari) e colori freddi (verde scuro - blu) la quale la si ritrova lungo la chioma del fusto e buona parte dei rami secondari (in particolare, nelle foglie nel rilievo estivo e nei rami più piccoli nel rilievo invernale).

Durante l'applicazione dei filtri, è stato applicato un valore valido per entrambi (densità + intensità) pari a 0.08, in termini di dettaglio e precisione del filtro stesso nell'individuo oggetto di analisi.

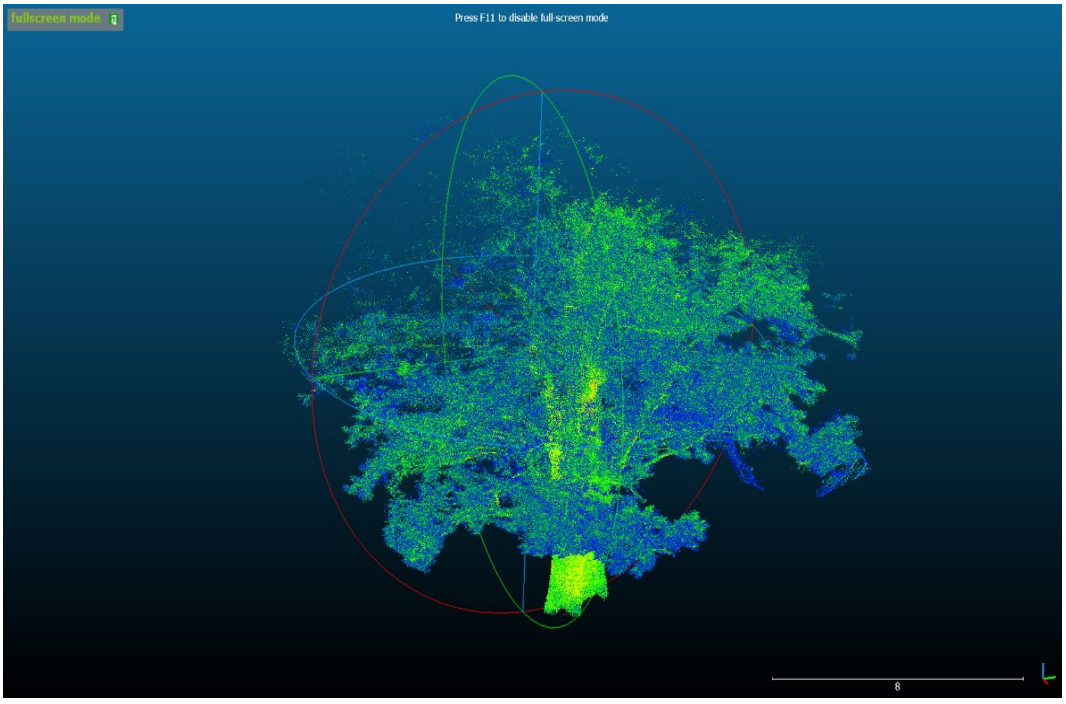


Figura 3.3.2. - Nuvola di punti del rilievo acquisito durante il periodo estivo

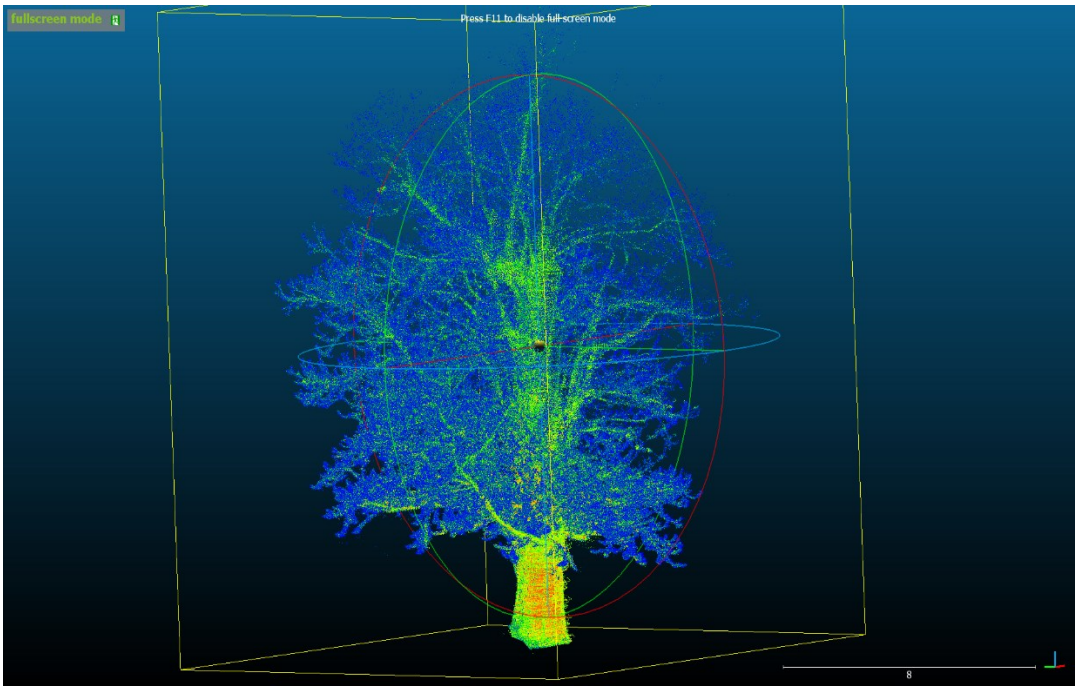


Figura 3.3.3. - Nuvola di punti acquisita durante il periodo invernale

Per entrambe le nuvole di punti elaborate, sono stati ottenuti i modelli relativi dello scheletro, chioma e modello merged (fuso), i quali verranno poi sottoposti a confronto nella fase finale di unione degli output e rappresentazione finale del castagno oggetto di analisi.

3.4. Unione degli output prodotti e rappresentazione finale

Le nuvole di punti ottenute dalla fotogrammetria aerea (chioma) e terrestre (fusto) sono state importate ed elaborate nel software CloudCompare, dove, assieme alla nuvola prodotta dal Kaarta-Stencil 2, ne è stato rappresentato il modello del castagno oggetto di analisi, grazie alle operazioni in seguito riportate.

In sintesi, il procedimento utilizzato è consistito in una serie di procedure comprendenti la pulizia delle nuvole di punti prodotte dalla fotogrammetria, l'assegnazione delle coordinate alla nuvola di punti del Kaarta-Stencil 2 mediante georeferenziazione, l'unione degli output prodotti con l'allineamento e la rappresentazione finale dell'elaborato completo, il quale verrà infine esportato.

L'operazione preliminare è consistita nell'importare le nuvole dei punti elaborate dalla fotogrammetria aerea e terrestre per mezzo di un'operazione intrinseca al software di analisi, la quale ha permesso la trasformazione delle coordinate acquisite per mezzo di una matrice di conversione, permettendone quindi il riconoscimento e la conseguente collocazione nello spazio di lavoro.

Una volta completata la procedura di importazione, entrambe le nuvole dense sono state ripulite mediante il processo di segmentazione, ovvero nella rimozione di quei punti "superflui" comprendenti il terreno, i target in prossimità del castagno e la vegetazione limitrofa, restituendone le rispettive nuvole della chioma e fusto; entrambe avranno la funzione di "texture" del modello finale, in quanto la nuvola ottenuta dal Kaarta-Stencil 2 andrà a costituire la struttura vera e propria.

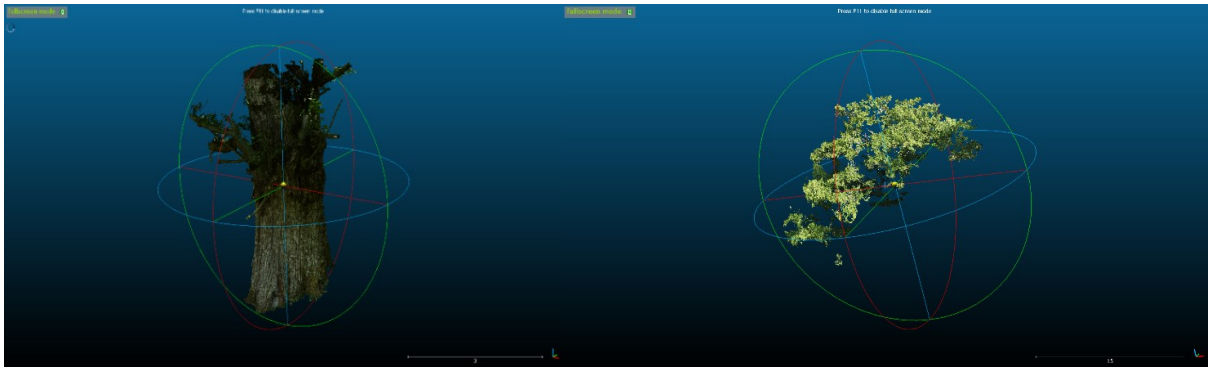


Figure 3.4.1. - Nuvole di punti ottenute dalla fotogrammetria da reflex (a sx) e da drone (a dx)

Prima di passare alla procedura successiva, è stato effettuato un preliminare confronto tra la nuvola del Kaarta-Stencil 2 e le nuvole fotogrammetriche, con il seguente verdetto:

1) essa non dispone di un sistema di coordinate locali, rispetto alle rispettive nuvole prodotte dalla fotogrammetria.

2) rapportando la suddetta nuvola con le sue corrispondenti fotogrammetriche, sono presenti incongruenze riguardanti la dimensione e posizionamento delle stesse.

Al fine di far fronte a tali problematiche, sono state effettuate le operazioni di scalatura ed allineamento delle tre nuvole di punti, affinché queste ultime possano disporre sia di un sistema di riferimento locale sia di dimensioni omogenee.

In sintesi, l'allineamento consiste nella sovrapposizione delle due nuvole di punti fotogrammetriche (chioma e fusto) con la nuvola di punti generata dal Kaarta-Stencil 2, per mezzo del comando "Allign two points by picking 4 point pairs".

Esso ha permesso di selezionare almeno tre punti noti appartenenti nuvole del fusto e della chioma, mettendole in correlazione con i corrispettivi presenti nella nuvola di punti del Kaarta-Stencil 2; in questo modo quindi, sono stati allineati sia i punti contenenti le coordinate note (nuvole fotogrammetriche) sia i punti oggetto di allineamento (nuvola Lidar), mediante la generazione di una matrice, la quale ha permesso la visualizzazione della terna di coordinate XYZ sia nel punto di cui queste sono note (nel caso della fotogrammetria) sia nel punto oggetto di matching, più una quarta colonna, la quale indica la tolleranza di errore scaturita dal un determinato punto cui è stata eseguita l'associazione.

Facendo un esempio pratico, data la selezione di un punto A noto dotato di coordinate (ad esempio un ramo principale rappresentato dalla reflex) risulta necessaria, al fine dell'allineamento, l'associazione del punto stesso con il corrispettivo A', presente nella nuvola di punti da allineare (ramo principale rappresentato dal Kaarta-Stencil 2), altrimenti, qualora venisse assegnato un punto completamente diverso (ad esempio la chioma, anziché il fusto), l'errore scaturito risulterebbe elevato, compromettendo di conseguenza l'intera operazione di allineamento, generando quindi un'errata sovrapposizione e posizione della nuvola di punti allineante e della rispettiva allineata.

Impostati i punti noti e i punti da allineare (errore scaturito totale trascurabile), si è proceduto all'allineamento vero e proprio (comando "Allign"), mediante una trasformazione a sette parametri (Trasformazione di Helmert) composta da 3 traslazioni + 3 rotazioni + 1 variazione di scala, la quale, mediante una rototraslazione delle nuvole di punti prodotte dalla fotogrammetria, ne ha permesso l'allineamento con la corrispettiva nuvola del Lidar, con la risultante del modello vero e proprio, il quale verrà infine unito (merged), permettendone la rappresentazione finale.

L’intera procedura di allineamento è stata applicata sia per il rilievo effettuato in estate sia per quello effettuato in inverno, andando ad utilizzare le nuvole di punti prodotte di chioma e fusto, correlandole a quella dal Kaarta-Stencil 2.

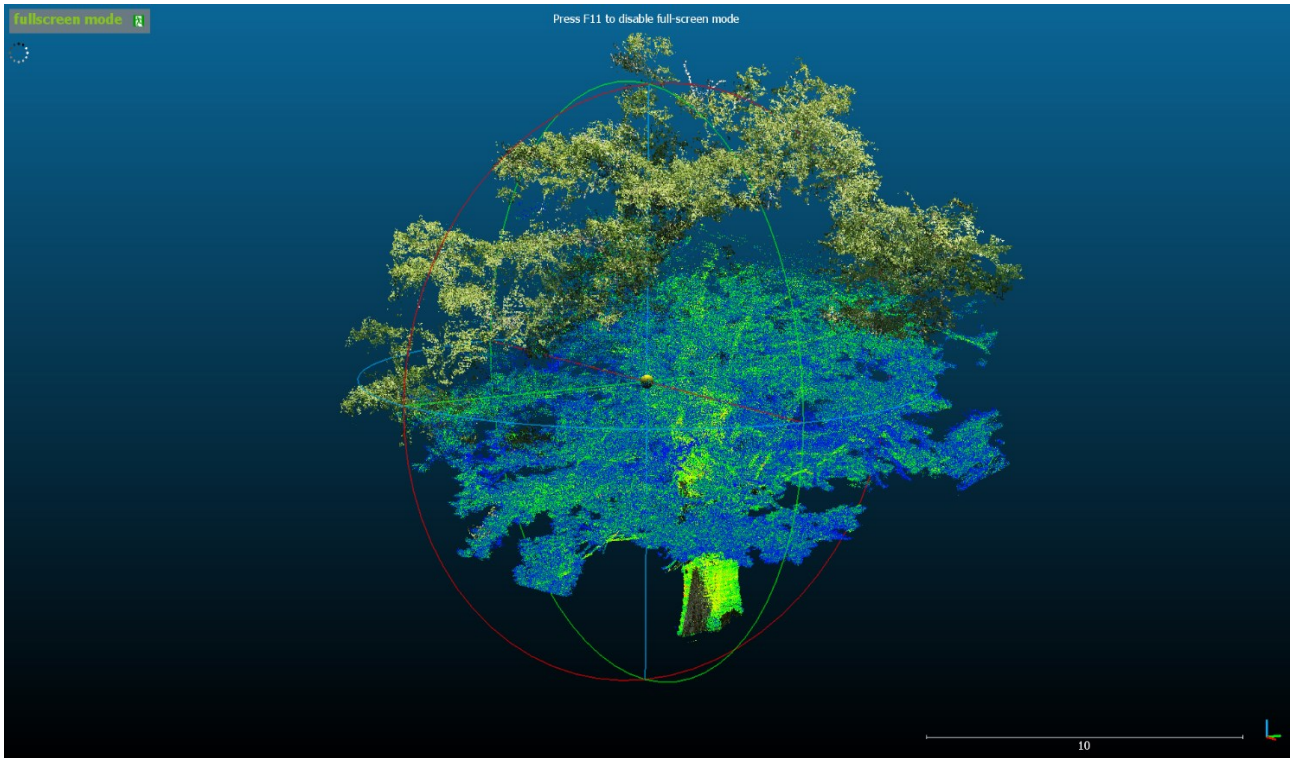


Figura 3.4.2. - Modello completo di castagno rappresentato in estate

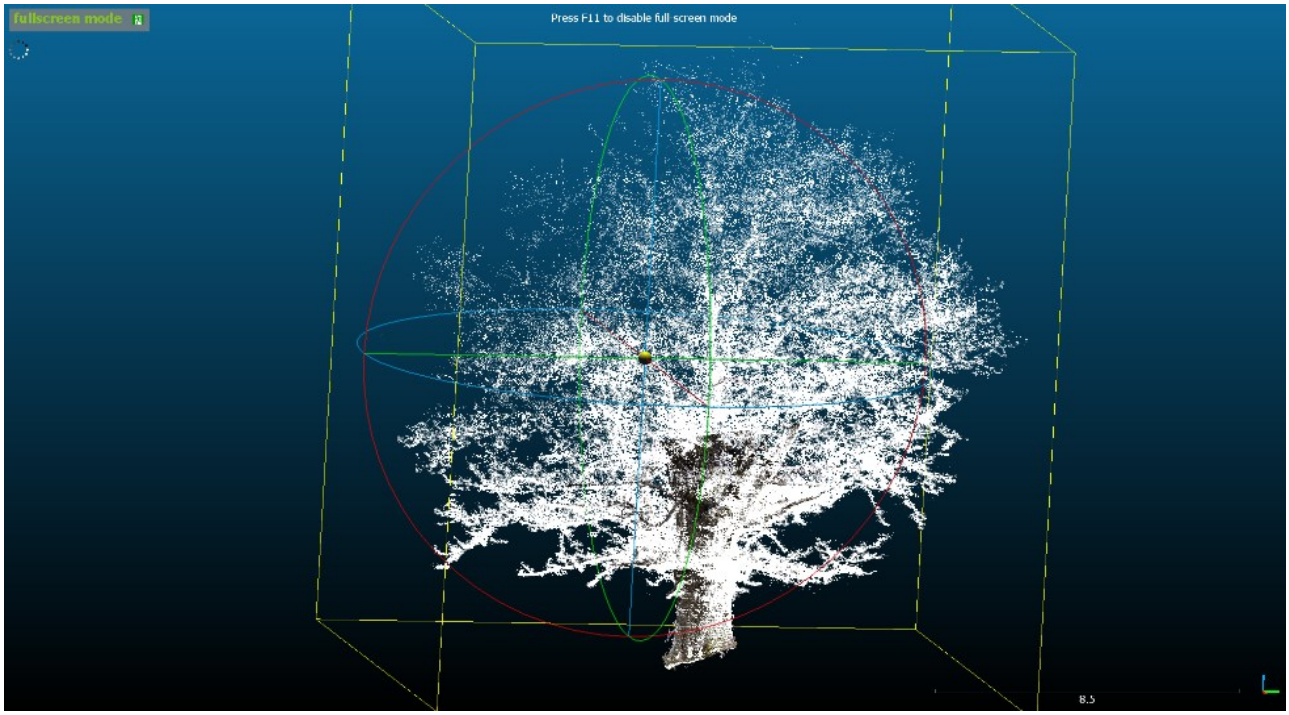


Figura 3.4.3. - Modello completo di castagno rappresentato in inverno

Differenza principale tra le due consiste nell'assenza di foglie nel modello invernale, data l'acquisizione completa dell'intero "scheletro" da parte del Kaarta-Stencil 2; il modello elaborato può risultare rilevante per la computazione di dati metrici, come ad esempio il volume dendrometrico e cormometrico dell'individuo oggetto di analisi.

A differenza del modello acquisito in inverno, in quello estivo è possibile visualizzare la piena espansione della chioma, potendone calcolare ad esempio la proiezione della chioma stessa al suolo, oppure se quest'ultima è soggetta allo svernamento e nidificazione di determinate specie, andando di conseguenza ad incrementare il proprio Valore Ecologico, quest'ultimo requisito fondamentale per l'Albero Monumentale.

Prima di procedere all'esportazione di entrambi i modelli elaborati, è stato effettuato un confronto Cloud to Cloud (C2C) valutandone, mediante computazione metrica, errori e distanze relative ad entrambi ai modelli, estrapolandone infine due valori riportanti l'errore medio tra le nuvole di punti impiegate e l'accuratezza finale dei modelli elaborati, validando così l'intera procedura effettuata nella creazione degli stessi.

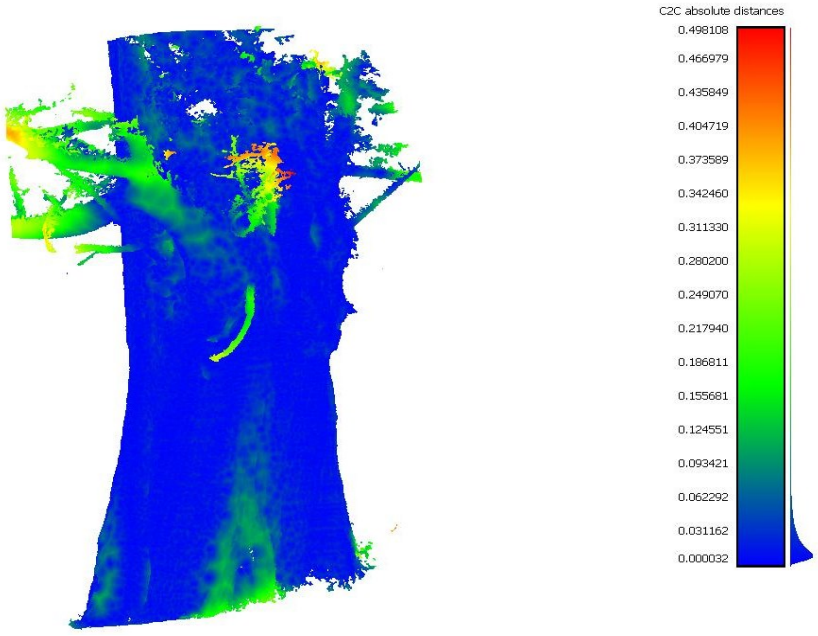
Di norma, tale approccio si rivela utile per effettuare confronti, monitoraggi e cambiamenti avvenuti tra i modelli prodotti, nei quali viene sia effettuato un calcolo degli errori medi delle nuvole di punti che lo costituiscono, sia un calcolo delle distanze tra i modelli mediante deviazione standard, determinando così l'accuratezza finale di ciascuno.

Il procedimento finale utilizzato ha calcolato media e deviazione standard per entrambi i modelli di castagno generati nel periodo estivo ed invernale, andando a considerare:

1) l'errore medio prodotto tra la nuvola dei punti portante la verità a terra (Kaarta-Stencil 2) e la nuvola fotogrammetrica (reflex), generando un errore medio totale scaturito dalle fasi di scalatura ed allineamento, producendone i rispettivi modelli.
2) il confronto effettivo tra i modelli elaborati in estate ed in inverno, mediante il calcolo della distanza effettiva tra i due set di dati ottenuti; tuttavia, non avendo una verità assoluta, il valore numerico elaborato è relativo alla distanza effettiva tra le nuvole valutandone così l'accuratezza di entrambi i modelli elaborati.

I risultati prodotti per entrambi i modelli sono stati ritenuti più che soddisfacenti in termini di computazione metrica, riportando per il modello rilevato in estate un errore medio di circa **0.040 metri** (errore provocato principalmente dai rami acquisiti mediante la reflex) e una distanza fra le nuvole di punti impiegate pari a circa **0.053 metri**, mentre per il modello acquisito in inverno l'errore medio riportato è pari a **0.050 metri** e la distanza fra le nuvole di punti impiegate di circa **0.075 metri**, rilevando quindi per entrambi i modelli un livello di

errore ed accuratezza minimo, tendente alla perfezione, confermando di conseguenza la validità complessiva delle tecniche geomatiche applicate, le quali hanno valorizzato l'intero lavoro svolto.



Mean distance	Standard deviation
0.040 m	0.053 m

Mean distance	Standard deviation
0.056 m	0.075 m

Figura 3.4.4. – Gradiente ottenuto dal confronto C2C dei modelli di castagno acquisiti, con relativo errore medio e deviazione standard

4. DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

Nella comunità scientifica della geomatica si ha un crescente interesse verso l'adozione di quei metodi di rilievo che, garantiscano modalità di acquisizione speditive e allo stesso tempo complete e che racchiudano anche particolari esigenze come facilità d'uso, affidabilità, accuratezza, efficienza, costi e sforzo umano ridotti. È noto, infatti, che l'integrazione di dati eterogenei, provenienti da fonti diverse, è in qualche modo inevitabile nel caso di rilievi 3D complessi (Remondino, 2011).

Nella fase antecedente l'acquisizione dei dati è opportuno conoscere la tipologia di ambiente cui si attua il rilievo, date le caratteristiche intrinseche dello stesso le quali possono influenzare alcuni fattori nella restituzione dell'output finale. A seconda dell'ambiente di applicazione è richiesta la configurazione di quei parametri di sistema poiché tengano conto della risoluzione della nuvola di punti cui si va a generare.

Data la complessità nell'acquisizione dei dati negli ambienti forestali, l'andamento richiesto risulta alquanto articolato da seguire, creando all'operatore ingenti costi in tempo e fatica nel rilievo di un singolo individuo, o di un intero popolamento.

Individuare la migliore metodologia di lavoro (e quindi definire il progetto di rilievo) è la prima e fondamentale operazione per riuscire a ottenere il risultato prestabilito.

Le strumentazioni ed i software impiegati nel lavoro hanno permesso di creare, gestire nel miglior modo possibile e a basso costo le nuvole dense prodotte, permettendone l'unione di ciascun output prodotto dal rispettivo strumento e rappresentazione del modello finale, andando quindi ad unire fotogrammetria (aerea e terrestre) e laser scanner, appartenenti alla medesima branca, ovvero la geomatica.

Date le complesse condizioni dell'ambiente di rilievo, relative alla morfologia e vegetazione presente, è risultata difficoltosa l'utilizzazione del GNSS, giungendo quindi alla conclusione di non poter posizionare nello spazio l'oggetto interessato. Soluzione a tale problematica ha consistito nel cercare uno o più "agganci" necessari grazie all'ausilio della Stazione totale, la quale per mezzo dei target applicati in campo (marker nel software) ha fornito all'individuo rilevato una terna di coordinate XYZ, dotate di Sistema di Riferimento locale, permettendone di conseguenza un corretto posizionamento ed allineamento delle rispettive nuvole di punti nel software dedicato, con la risultante della georeferenziazione del modello finale rappresentato.

Nel seguente lavoro di tesi è stato preso in analisi un individuo di castagno (*Castanea sativa* Mill.) situato nella frazione di Umito (AP), mediante l'utilizzo di tecniche geomatiche consistenti nell'acquisizione dello stesso in campo per mezzo di apposita strumentazione, elaborazione delle rispettive nuvole di punti e rappresentazione finale del modello completo in ambiente informatico, potendone analizzare gli aspetti relativi al suo carattere di monumentalità.

In sintesi, sono stati inizialmente effettuati due rilievi in campo, in estate e in inverno, dei quali poi ne sono state acquisite, mediante le strumentazioni utilizzate (drone, reflex, Kaarta-Stencil 2) le rispettive nuvole di punti, elaborate poi per mezzo dei software Metashape e CloudCompare, ricostruendone il modello finale, il quale è stato infine esportato ed inserito nel WebGis della Regione Marche, aperto a qualsiasi tipologia di utenza.

Differenza tra i due modelli acquisiti consiste nella caduta delle foglie, constatando una maggiore evidenza dello "scheletro" in inverno e una massima espansione della chioma in estate; tale affermazione, seppur ovvia, potrebbe risultare utile per determinare ad esempio il calcolo della proiezione della chioma al suolo in estate ed il volume legnoso dendrometrico in inverno (in quanto facilmente rappresentabile nella suddetta stagione), visualizzandone di conseguenza l'andamento di ogni singolo ramo componente il fusto e il relativo decorso.

Il processo di validazione del modello costituisce la parte fondamentale per la creazione dell'elaborato finale, ottenendone vantaggi nell'ambito del Machine Learning in termini di accuratezza, rapidità, e facilitazione nell'elaborazione del modello stesso, riducendone complessivamente l'errore scaturito durante ciascuna fase atta alla sua produzione e finale rappresentazione.

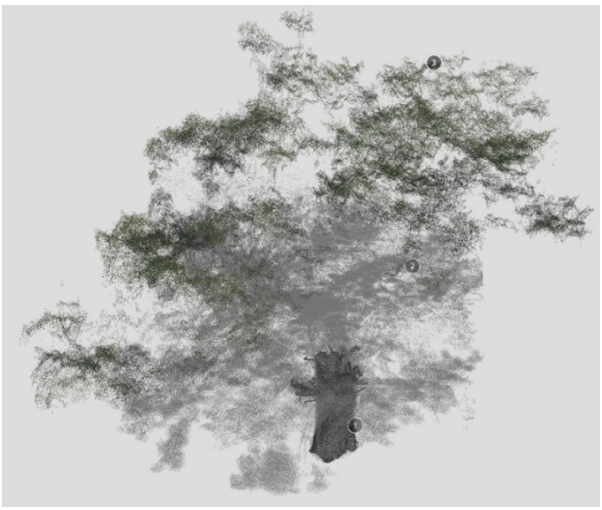
La metrica utilizzata per valutare la prestazione del modello consiste nella determinazione Cloud to Cloud (C2C) del Root Mean Square Error o **Scarto quadratico medio (RMSE),** quest'ultimo utilizzato per determinare l'effettiva accuratezza dello stesso, andando quindi a costituire una prova schiacciante della bontà delle tecniche geomatiche utilizzate, rispetto ad esempio ad un rilievo in campo eseguito interamente con l'ausilio della scheda di identificazione dell'Albero Monumentale, aumentandone significativamente il margine di errore finale.

Il confronto **Cloud to Cloud (C2C)** invece, ha rivelato il livello di errore ed accuratezza impiegata nei modelli elaborati, effettuando prima un confronto tra le nuvole di punti del modello stesso, successivamente un confronto tra i due differenti modelli, riportandone errore

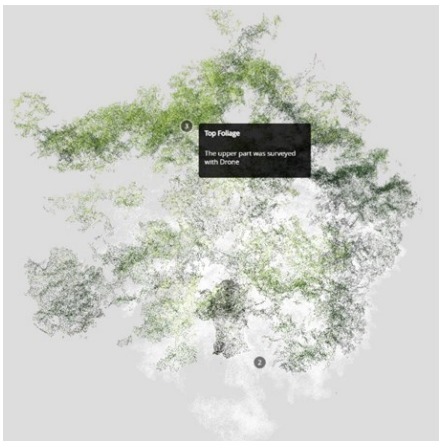
medio ed accuratezza nei report dedicati, costituendo quindi una prova effettiva di quanto l'impiego della geomatica in campo sia risultata fondamentale nel lavoro svolto.

Il lavoro realizzato ha dimostrato non solo una restituzione grafica tridimensionale del modello di castagno analizzato, ma alla possibilità di giungere ad una misurazione di dettaglio di tali individui poco idonei ad essere sottoposti alle normali tecniche di cubatura proposte dalla dendrometria.

Il castagno analizzato può essere quindi utilizzato come "contenitore di dati" e reso modificabile da qualsiasi tipologia di utenza, in quanto rappresentato come nuvola di punti; tutto ciò grazie alla sinergia ed applicazione delle discipline geomatica e scienze forestali, ricavandone un errore complessivo minimo, una corretta rappresentazione della nuvola di punti e la possibilità di un continuo aggiornamento nel tempo della stessa, integrandola ad esempio con nuovi dati e applicazioni, andando ad incrementare il pool di conoscenze riguardanti il castagno analizzato ed il suo popolamento circostante, date le finalità preposte di utilizzazione dell'elaborato finale.

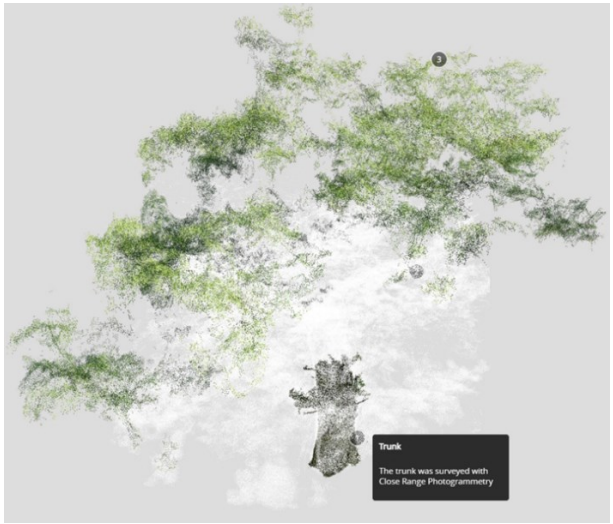


a)



b)

c)



d)

Figure 4.1. a) b) c) d) - Rappresentazione su software completa (sopra) e vertex (sotto) del modello di castagno analizzato, analizzandone le modalità di acquisizione dati, relativi al fusto e chioma dello stesso, attraverso le apposite tecniche e strumentazioni.

FONTE: Sketchfab.com

A seconda dei rilievi dendrometrici effettuati in campo (età, altezza e diametro), il castagno analizzato risulta un ottimo candidato per il novero tra gli Alberi Monumentali d'Italia (AMI), potendo quindi rientrare tra le Formazioni Vegetali Monumentali (FVM), in quanto detentore di un vero e proprio archivio naturale, testimoniandone la valenza scientifica e dendrocronologica, oltre che ambientale e paesaggistica dei vecchi castagneti da frutto del Piceno. L'importanza di preservare tali "patriarchi verdi" dovrebbe essere una priorità, soprattutto in aree protette (nel caso specifico il Parco Nazionale del Gran Sasso e dei Monti della Laga).

Il castagno rappresentato, se rapportato a scala di popolamento, potrebbe essere utilizzato come determinante per la valutazione degli stock di carbonio prodotti dai patriarchi monumentali, mediante l'assegnazione del **Fattore di Espansione della Biomassa (BEF)** espresso in tonnellate ad ettaro.

Tale moltiplicatore quantifica l'incremento di biomassa del popolamento stesso, costituendo, sotto un punto di vista ecologico ed economico, un complemento prezioso integrabile in un modello di crescita dinamica, convertendo le variabili di popolamento raccolte in stime effettive di biomassa.

Grazie alla determinazione della biomassa nell'individuo, queste informazioni potrebbero tornare utili nel calcolo delle variazioni degli stock di carbonio delle foreste a livello nazionale ed europeo.

L'analisi di tale lavoro di tesi si è incentrata attualmente nel singolo individuo; tuttavia, può essere riproiettata in scala più ampia, aggiungendo o ampliando gli argomenti affrontati atti alla definizione di Albero Monumentale, integrando e/o accomunando altre materie volte alla valorizzazione del castagno patriarca, mediante le conoscenze nel tempo acquisite ed integrate nel modello reso opensource.

Le tecniche geomatiche integrate nel lavoro hanno consentito alle Scienze Forestali proprietà come facilitazione, rapidità, uniformità ed accuratezza, applicate sia durante la fase di rilievo in campo e preprocessamento sia durante la fase di elaborazione ed unione degli output prodotti dalla fotogrammetria aerea da drone, fotogrammetria terrestre da reflex e dal Mobile Laser Scanner dal Kaarta-Stencil 2.

5. BIBLIOGRAFIA

"Flora d'Italia", S.Pignatti, 1982 *Castanea sativa* Miller

AA.VV. - “Flora protetta delle Marche” - Regione Marche, Assessorato all’Ambiente, Ancona, 1979.

Betetto C., Bolzon P., Doimo I., Gatto P., Lingua E., Pagot G. (2020). Valutazione della biodiversità degli ecosistemi forestali transfrontalieri. Studio e Sviluppo di Meccanismi PES delle foreste. Unipd, TESAF

Bounous G., 2002 – Il Castagno. Coltura, ambiente ed utilizzazione in Italia e nel Mondo.Edagricole.

Bronzino, G. P. C., Grasso, N., Matrone, F., Osello, A., & Piras, M. (2019). Laser visual-inertial odometry based solution for 3d heritage modeling: the Sanctuary of the lessed virgin of trompone. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(2/W15), 215–222.

Chang, L., Niu, X., Liu, T., Tang, J., & Qian, C. (2019). GNSS/INS/LiDAR-SLAM integrated navigation system based on graph optimization. Remote Sensing, 11(9).

Checklist 2018, in Bartolucci & al., Galasso & al. e aggiornamenti *Castanea sativa* Mill.

Chiabrando F., Donadio E., Rinaudo F., SfM for orthophoto generation: a winning approach for cultural heritage knowledge, 25th International CIPA Symposium 2015, Taipei, Taiwan, (31 August – 04 September 2015).

D. Avanzato, ed., Following Chestnut Footprints (Castanea spp.) – Cultivation and Culture, Folklore and History, Tradition and Uses, vol. 9 of Scripta Horticulturae (International Society for Horticultural Science, 2009).

D’Apostoli R., Giampaolo S., 2018 - Guida pratica al rilievo topografico con GPS e stazione totale. EPC editore.

Di Pietra, V., et al.: Characterization of a Mobile Mapping System for Seamless Navigation. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 43, 227-234 (2020).

Di Stefano, F., Piccinini, F., Rahali, A., Pierdicca, R., Malinverni E.S.: Applicazione e validazione nell’uso di un mobile 3D scan LiDAR. Università Politecnica delle Marche. Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell’Architettura (DICEA), (2021).

Fangi G., D’Annibale E., (2012). Fotogrammetria close-range e visual design per i beni culturali. Univpm

Fay N., 2011 – Learning from old trees, artists and poets. Conservation Arboriculture.

Fay N., Dowson D., Hellwell R., 2005 – Tree Surveys: a guide to good practice. The Arboricultural Association.

G. Bounous, ed., Il castagno (Edagricole, Bologna, 2014).

G. Petri, Mobile mapping systems: an introduction to the technology, GeoInformatics 13 (1), 32–43 (2010).

Gollob, C., Ritter, T., & Nothdurft, A. (2020). Forest Inventory with Long Range and High Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. Remote Sensing, 12(9), 1509.

Hackel, T., D. Wegner, J., Schindler, K. (2016). Contour detection in unstructured 3D point clouds. ETH Zurich

J. Lemaire, Forêt-entreprise 179, 18 (2008)

Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. Sensors (Switzerland), 12(9), 11712–11733

M. Conedera, F. Barthold, D. Torriani, G. B Pezzatti, Acta Horticulturae 866, 297 (2003).

Manzino A., Di Marco F., AA 2019/2020 - Fotogrammetria diretta da drone per la misura e il monitoraggio delle frane. Politecnico di Torino. Tesi Laurea Magistrale

Menéndez-Miguélez M., Canga E., Barrio-Anta M., Majada J., Álvarez-Álvarez P., 2013. A three level system for estimating the biomass of *Castanea sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain

Micieli M., 2019 - Aerofotogrammetria con i droni. Mappatura e modellazione 3D del territorio con tecniche aerofotogrammetriche da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), Dario Flaccovio Editore.

Nascetti A., Di Rita M., Ravanelli R., Fortunato M., Tagliacozzi C.F., Belloni V., Mazzoni A., Crespi M. (2017). La fotogrammetria diretta close-range come strumento di modellazione 3d in glaciologia: applicazioni nelle Alpi e nella Patagonia cilena. Università di Roma "La Sapienza", DICEA

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., & Rodríguez-Gonzálvez, P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV, 10332, 103320I.

P. Schütt, et al., Enzyklopädie der Laubbäume: Die große Enzyklopädie (Nikol, Hamburg, 2006).

Paparelli L., Santini E., Urbinati C., 2009 – Un'analisi dendrocronologica su vecchi castagni dei Monti della Laga . Università Politecnica Marche. Poster a “Castanea 2009”.
Piano del settore Castanicolo 2010/2013 – Ministero delle Politiche agricole e Forestali
Puente, I., et al.: Review of mobile mapping and surveying technologies. Measurement, 46(7), 2127-2145 (2013)
Razavian, R. S., Greenberg, S., & McPhee, J. (2019). Biomechanics imaging and analysis. In Encyclopedia of Biomedical Engineering (Vols. 1–3). Elsevier.
Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote Sensing, 3(6), 1104–1138.
Rubio, et al., InvestigacioÌn agraria: Sistemas y recursos forestales 11, 373 (2002).
Toschi, I., Fabio, R., & Simone, O. (2015). Mobile Mapping Systems: recenti sviluppi e caso applicativo. GEOmedia, 4, 6–10.
Ullrich, A. & Pfennigbauer M.: Advances in lidar point cloud processing, Proc. SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050K (2019).
W. Tinner, et al., The Holocene 10, 565 (2000).
Westling, F., Mahmud, K., Underwood, J., & Bally, I. (2020). Replacing traditional light measurement with LiDAR based methods in orchards. Computers and Electronics in Agriculture, 179(May)
Zapponi L., Mazza G., Farina A., Roversi P. F., Sabbatini Peverieri G., Mason F. (2017). Gli alberi monumentali per la conservazione della biodiversità - Il rilievo del criterio ecologico. Sherwood, 229
Zapponi L., Mazza G., Farina A., Roversi P.F., Sabbatini Peverieri G., Mason F. (2016). Censimento degli alberi monumentali: guida al rilievo del valore ecologico, Corpo Forestale dello Stato, CREA, 36 pp

6. SITOGRAFIA

Chestnut Tree: https://sketchfab.com/3d-models/chestnut-tree a4023d602ea44e75801789f6f4c96d2e

Le Formazioni Vegetali Monumentali delle Marche: http://www.carabinieri.it/media---comunicazione/natura/la-rivista/home/tematiche/ambiente/le-formazioni-vegetali-monumentali-delle-marche

MIPAAF - Censimento alberi monumentali CFS 1982 (politicheagricole.it): https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/11266

NETGEO: GNSS: http://www.netgeo.it/page.php?Id=63

Rete Natura 2000 Marche: 9260 – Boschi di *Castanea sativa*: https://www.regione.marche.it/natura2000/pagina_baseee53.html?id=1662

Castanea sativa Mill: https://www.floraitaliae.actaplantarum.org/viewtopic.php?t=614