



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

L'Impiego di Immagini da Drone e Fotogrammetria
per la Valutazione dell'Impatto del Bostrico su un
Popolamento Forestale in Agordino

Relatore
Prof. Stefano Grigolato
Correlatore
Dott. Luca Marchi
Dott. Alberto Udali

Laureanda/o
Walther Da Campo
Matricola n. 1221456

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

Indice

Riassunto	3
Introduzione	5
Stato attuale e disciplinare	8
Droni ad ala fissa e convertiplani	8
Droni Multicotteri	9
Droni Professionali, Enterprise e Semiprofessionali	10
Regolamento	11
Categoria OPEN	12
Categoria SPECIFIC	14
Scenario standard	14
SORA (Specific Operation Risk Assessment)	15
PDRA (Predefined Risk Assessment)	15
Aree geografiche APR	16
Caso studio	17
Area di studio	17
Materiali e Metodi	18
Droni	18
DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	19
DJI Mavic 3 Enterprise	20
Rilievo e Analisi	21
Pianificazione dei voli	22
Raccolta Punti di Controllo (GCP)	25
Analisi fotogrammetrica	25
Elaborazioni spaziali	28
Riclassificazione delle ortofoto e differenza raster	29
Risultati e Discussioni	31
Conclusioni	35
Bibliografia	37

Riassunto

[ITA]

Negli ultimi anni il mondo dei droni ha subito un'espansione esponenziale, trovando impieghi professionali in moltissimi campi. Questo insieme a calcolatori sempre più potenti ha permesso una ampia diffusione di metodi di analisi fino a qualche anno fa ritenuti elitari, come la fotogrammetria aerea.

Anche nell'ambito forestale l'impiego di droni si è ampiamente diffuso soprattutto in quanto permette di semplificare e velocizzare la raccolta di informazioni su piccola - media scala, fornendo in tempi molto brevi informazioni con una precisione elevata. Questo permette di avere dati aggiornati ed affidabili ad un costo relativamente basso.

Le elaborazioni che si possono fare utilizzando questi dati sono innumerevoli, considerando che gli output possono andare da semplici foto aeree fino ad arrivare a modelli tridimensionali e multispettrali.

Lo scopo di questo studio è quello di provare a identificare e monitorare l'espansione del bostrico in un popolamento forestale nel comune di Voltago Agordino utilizzando un rilievo con tecnica fotogrammetrica tramite drone. Per il rilievo sono stati utilizzati due modelli di drone: un DJI Mavic 2 Enterprise Advanced, e due DJI Mavic 3 Enterprise.

L'approccio scelto per l'individuazione del bostrico è stata la valutazione del colore dei pixel da ortofoto georeferenziate. Un approccio relativamente semplice, ma soggetto a numerose limitazioni, prima tra tutte la luce. Infatti si è notato come i pixel che compongono le chiome illuminate da una luce forte e diretta creano dei riflessi che falsano i dati raccolti. Le elaborazioni, svolte con l'impiego del software open source QGIS, si sono basate sull'analisi dei valori di una singola banda colore; i risultati migliori si sono ottenuti con la banda del blu nel caso di luce diffusa e con la banda del rosso nel caso di luce forte e diretta. Si è notato come le piante presumibilmente malate (marroni) hanno valori tendenzialmente più alti rispetto alle piante sane (verdi).

Una volta definita la media dei valori per i due stati, tramite Excel sono state definite delle soglie, tramite le quali sono state riclassificate le ortofoto identificando con "M" i pixel di alberi marroni e "S" i pixel di alberi verdi. Il monitoraggio è stato eseguito mettendo in relazione ortofoto della stessa area scattate in momenti successivi. In 8 mesi di rilievi si è notato un'espansione di circa il 5 % del bostrico che sull'area totale di 192,6 ettari corrisponde a circa 8.6 ha.

[EN]

In recent years, the world of drones has undergone exponential expansion, finding professional applications in many fields. This, together with increasingly powerful computers, has enabled the widespread use of analysis methods that were considered elite until a few years ago, such as aerial photogrammetry.

In the forestry sector, the use of drones has also become widespread, primarily because it simplifies and speeds up the collection of information on a small to medium scale, providing highly accurate information in a very short time. This allows for updated and reliable data at a relatively low cost.

The analyses that can be performed using this data are numerous, with outputs ranging from simple aerial photos to three-dimensional and multispectral models.

The purpose of this study is to attempt to identify and monitor the spread of bark beetle infestation in a forest stand in the municipality of Voltago Agordino using a photogrammetric survey by drone. Two drone models were used for the survey: a DJI Mavic 2 Enterprise Advanced and two DJI Mavic 3 Enterprise.

The approach chosen for the identification of the bark beetle was the evaluation of the color of pixels from georeferenced orthophotos. This is a relatively simple approach but subject to numerous limitations, foremost among them being light. It was noted that the pixels comprising the canopies illuminated by strong, direct light create reflections that distort the collected data. The analyses, conducted using the open-source software QGIS, were based on the analysis of the values of a single color band; the best results were obtained with the blue band in the case of diffused light and with the red band in the case of strong, direct light. It was observed that the presumably diseased (brown) trees have higher values than the healthy (green) trees.

Once the average values for the two states were defined, thresholds were determined using Excel, which were then used to reclassify the orthophotos, identifying the pixels of brown trees with "M" and those of green trees with "S". The monitoring was carried out by comparing orthophotos of the same area taken at different times. Over 8 months of surveys, an expansion of about 5% of the bark beetle infestation was noted, which corresponds to approximately 8.6 hectares out of the total area of 192.6 hectares.

Introduzione

Oggigiorno, la disponibilità di possedere dati e informazioni quanto più recenti e precisi è un requisito fondamentale per qualsiasi progetto, studio, lavoro o intervento, anche di carattere emergenziale. Questi permettono una valutazione più precisa ed uno sviluppo di soluzioni più puntuali, che permettono di ottimizzare le risorse, sia in termini economici che in termini di tempo.

Per quanto riguarda le informazioni geografiche e territoriali reperirle non sempre è possibile e in molti casi se lo è, i dati disponibili non sono sufficientemente aggiornati.

Negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico ha permesso di poter acquisire ed elaborare in autonomia questo tipo di informazioni, in brevissimo tempo e con un costo relativamente contenuto. Il sistema più utilizzato per raggiungere questo obiettivo ha visto un utilizzo su larga scala di droni o, meglio, Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR o UAS *Unmanned Aircraft System*), che stanno vedendo sviluppo e applicazione in diversi campi, tra cui quello forestale.

La possibilità di coprire piccole e medie superfici in brevissimo tempo raccogliendo ogni tipo di dato, come semplici foto che permettono di ottenere degli ortomosaici con definizione anche molto alta, o nuvole di punti LIDAR con cui si possono ottenere dei DTM molto precisi rimuovendo la vegetazione, o immagini termiche e multispettrali, hanno fatto diventare i droni uno strumento quasi fondamentale nella gestione forestale moderna.

Seppur con qualche limite, come analizzato da Dainelli et al. (2021) ‘*Recent advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing – a Systematic Review. Part II: Research Applications* che evidenzia l’impossibilità di elaborare in tempo reale le immagini e la scarsa diffusione di alcune tipologie di sensori, unite ad un contesto normativo in continuo aggiornamento, limitano fortemente l’espansione di questa tipologia di rilievo tra i professionisti, limitandolo al mondo accademico, nonostante la sua comprovata utilità in più scenari.

Nell’ambito degli interventi di utilizzazione forestale per la gestione selvicolturale delle foreste, i dati raccolti tramite drone e la loro analisi, possono essere utilizzati principalmente in tre fasi:

1. la pianificazione degli interventi, attraverso il reperimento di informazioni spaziali di carattere attuale e puntuale, fondamentale nei casi in cui ci sia stata una modificazione improvvisa, per esempio dovuta a disturbi come schianti da vento, alluvioni, frane, o incendi;
2. la progettazione dell’intervento attraverso l’elaborazione dei dati raccolti;
3. il monitoraggio dell’intervento stesso e dell’evoluzione post-intervento.

Nel caso di disturbi forestali, il Nord-Est Italia è stato interessato negli ultimi anni da eventi di elevata intensità, come la tempesta Vaia nel 2018, che sono poi culminati nell'epidemia di bostrico esplosa negli anni a seguire dalla tempesta e che continua ancora ad oggi.

Il bostrico tipografo, o *Ips typographus* (L.), è un insetto dell'ordine dei coleotteri e della famiglia dei curculionidi, parassita dell'abete rosso (*Picea abies* L. H. Karst), che normalmente attacca solo alberi morti o in fase di deperimento, scavando dei caratteristici canali appena sotto la corteccia. Queste incisioni, se scavate nella pianta viva, interrompono i canali che permettono il trasporto dell'acqua e sali minerali dalle radici agli aghi, impedendo in questo modo la fotosintesi e portando ad un rapido deperimento della pianta.

Negli anni si sono sperimentati diversi metodi per identificarlo sia nella fase iniziale in cui attacca la pianta, ma questa è ancora verde, che nella seconda in cui gli aghi cambiano colore virando verso un marrone rossastro. La seconda fase, visibile ad occhio nudo, è più facile da identificare, ma sicuramente meno utile in un'ottica di pianificazione, per cui non si sono trovati studi importanti a riguardo.

Ovviamente identificarlo nella prima fase è molto più complicato, ma molto più utile, visto che si potrebbe essere ancora in tempo per attuare strategie atte a limitare l'espansione. Alcuni risultati positivi in questa direzione si sono ottenuti con delle immagini multispettrali ed iperspettrali, come lo studio redatto da ARPA Lombardia in collaborazione con ERSAF (Bellingeri et al 2018) che ha combinato immagini satellitari (Sentinel 2) ad immagini termiche, multispettrali ed iperspettrali acquisite da droni. I risultati sono stati molto utili già prima dell'infestazione del bostrico per l'identificazione e delimitazione di aree sofferenti di bosco. La stessa tecnica è stata utilizzata anche per il bostrico successivamente portando ad ottimi risultati.

Recentemente, uno studio ha sviluppato un modello che con l'implementazione dell'intelligenza artificiale permette l'individuazione e classificazione delle piante attaccate da bostrico. I primi risultati sono molto promettenti visto che si attestano a valori medi di precisione intorno all'80%.

Gli studi che mirano a identificare la prima fase funzionano anche abbastanza bene come abbiamo visto, ma utilizzano tecnologie e programmi che prevedono elaborazioni abbastanza lunghe e tempistiche altrettanto lunghe, che in ottica di studio vanno benissimo, ma nel caso serva una valutazione speditiva ed a basso costo, risultano del tutto incompatibili. Per esempio ad oggi i droni capaci di montare camere multispettrali sono molto pochi.

Come accennato prima però tutti questi riferimenti si riferiscono al mondo accademico, non professionale, l'obiettivo che si pone questa tesi, dopo un inquadramento generale del mondo degli UAS, è lo sviluppo di un modello che permetta l'impiego di immagini tradizionali (RGB) acquisite tramite drone e analizzate con tecniche di fotogrammetria, per la valutazione dell'impatto del

bostrico, tutto ciò nel modo più semplice e veloce possibile, pensato più per un utilizzo professionale che di studio.

Il lavoro sarà organizzato in due parti.

- Nella prima parte verranno presentate le principali tipologie e modelli di APR utilizzati attualmente nel settore del monitoraggio di eventi e delle emergenze, con un focus sui modelli più utilizzati attualmente nel settore della ricerca in ambito forestale. In questa parte verrà anche sintetizzato quello che attualmente è il regolamento che disciplina l'utilizzo di questi sistemi in Italia e in Europa
- Nella seconda parte verrà invece esposto il caso studio su cui è stato provato questo metodo, all'interno di un popolamento forestale affetto da bostrico nel Comune di Voltago Agordino (BL).

Stato attuale e disciplinare

Negli anni sono state sviluppate diverse tipologie di APR, per potersi adattare a esigenze diverse, dal semplice divertimento alle operazioni più specialistiche. Seguirà un rapido inquadramento delle principali tipologie presenti sul mercato.

Droni ad ala fissa e convertiplani

I droni ad ala fissa nascono da aeromodelli a cui vengono montati un GPS, una bussola ed un sensore: solitamente una telecamera sullo spettro del visibile. Hanno dimensioni variabili da 40 cm a vari metri e tempi di volo compresi tra 30 e 120 minuti. Non possono stazionare in volo ma hanno velocità che possono superare i 200 km/h. Hanno bisogno di essere lanciati da catapulte e non possono atterrare in verticale, hanno bisogno di una ‘pista’. Sono utilizzati soprattutto per la mappatura di grandi superfici. Per l’ambito forestale sono i più indicati sempre avendo a disposizione lo spazio di decollo e atterraggio.

I convertiplani, invece, uniscono i vantaggi dei droni ad ala fissa: velocità di crociera e tempi di volo, con quelli dei multicotteri: stazionamento in volo atterraggio e decollo verticali.

Montano un sensore ibrido visibile-termico hanno un’apertura alare che può avvicinarsi ai 3 m. Non sono molti sul mercato oggi ed hanno prezzi abbastanza proibitivi



a) SenseFly eBee



b) Autel Dragonfish

Figura 1. Esempi di (a) drone ad ala fissa e (b) convertiplano.

Droni Multicotteri

Sono gli APR più diffusi, composti da un telaio con un minimo di 4 fino a 12/14 rotori. A differenza dei droni ad ala fissa possono stazionare in volo ed essere molto più precisi nei controlli, ciò gli permette di volare anche all'interno di edifici.

Ne esistono di varie tipologie con destinazioni d'uso diverse.

I droni giocattolo (Figura 2a) sono piccoli droni senza sensori, con pochi minuti di autonomia, senza GPS e bussola, e con segnale di trasmissione tra controller ed APR di portata limitata, queste limitazioni li rendono inutilizzabili per operazioni di qualsiasi tipo.

I droni FPV/Cinefilter (Figura 2b) sono aeromobili sviluppati per essere il più veloce ed agile possibile, utilizzati principalmente per riprese cinematografiche molto dinamiche, possono raggiungere i 250 km/h, ma volano per pochi minuti.

I droni cinematografici (Figura 2c) sono strumenti progettati per ottenere la miglior qualità video possibile, per questo la componente principale è la telecamera che presenta obiettivi intercambiabili e può essere controllata indipendentemente dal drone. Il carrello d'atterraggio solitamente si solleva per uscire dal campo visivo della camera principale permettendole di ruotare indipendentemente dal drone. Normalmente vengono pilotati da almeno due persone: il pilota e l'operatore della camera; che lavora solo sullo spettro del visibile. Possono montare telecamere secondarie anche a visione notturna ma solo per il volo, utilizzarli per operazioni specialistiche è complicato. Sono dotati di sistemi di evitamento ostacoli a 360°, hanno un'autonomia di volo che può raggiungere i 40 minuti e velocità massima intorno ai 100km/h.

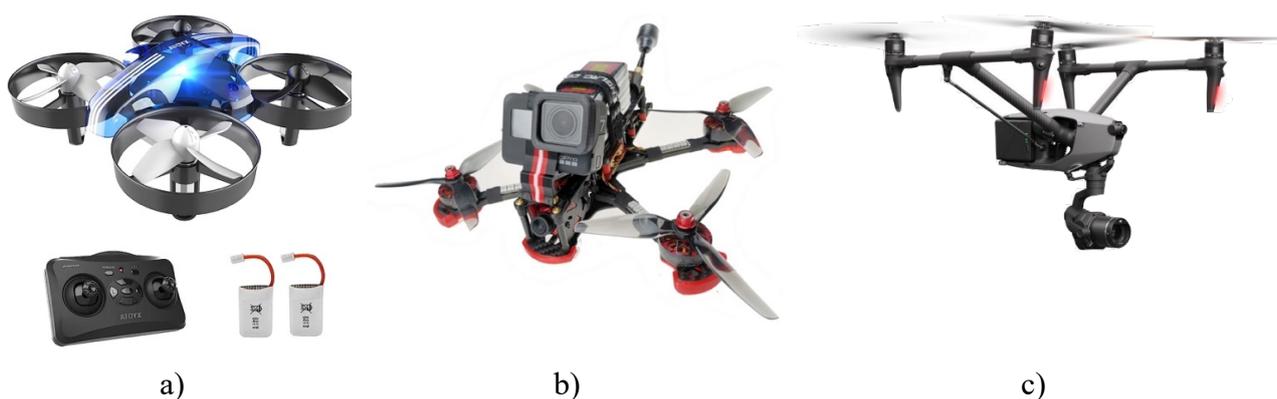


Figura 2. Esempio di droni (a) giocattolo, (b) FPV/Cinefilter, e (c) cinematografici.

Droni Professionali, Enterprise e Semiprofessionali

I droni professionali e enterprise (Figura 3a) sono sviluppati per operazioni specialistiche, solitamente sono dei multicotteri modificati per poter montare sensori di tutti i tipi (payload), anche più di uno se richiesto dall'operazione: dalle camere sullo spettro visibile con zoom a 100x, camere termiche e visione notturna, sensori LiDAR, camere multispettrali. Sono le macchine utilizzate per la maggior parte dei rilievi, anche dai vigili del fuoco e dalla polizia per operazioni di pubblica sicurezza e monitoraggio del territorio. Possono essere pilotati da due persone: un pilota ed un operatore dei payload. Hanno tempi di volo che raggiungono l'ora, con possibilità di essere ancorati ed alimentati da terra permettendo un tempo di volo virtualmente infinito. Sono dotati di un'avionica ridondante e sistemi di evitamento ostacoli a 360° avanzati con possibilità di montare dei radar per rilevare fili e volare in sicurezza anche in presenza di forti interferenze elettromagnetiche.

Sono APR anche di ingombro non indifferente, in quanto la diagonale tra due rotori può variare da 30 cm fino ad un metro, con velocità massima attorno agli 80 km/h.

I droni semiprofessionali (Figura 3b) costituiscono la maggior parte dei droni che si trovano sul mercato. Possono montare da una a tre telecamere tutte sullo spettro visibile. Nascono con lo scopo di fare foto e video di qualità, ma allo stesso tempo essere accessibili a più persone possibili. Possono arrivare a 80 km/h e le dimensioni variano da 10 a 40 cm. Possono essere dotati di sistemi di evitamento ostacoli. Assieme ad un software di pianificazione del volo, costituiscono il livello minimo per effettuare operazioni specialistiche come ispezioni e semplici operazioni di fotogrammetria.



Figura 3. Esempi di (a) droni professionali e enterprise, e (b) droni semiprofessionali.

Regolamento

Dal dicembre 2020 in tutti gli stati membri dell'unione europea è in vigore il regolamento droni EASA. Questo si è reso necessario visto che i droni moderni hanno specifiche che gli permettono di diventare un pericolo sia per l'aviazione tradizionale, sia per le persone che possono essere coinvolte a terra. A partire da quella data i droni sono classificati come aeromobili e divisi per classi, principalmente in base del loro peso. Lo spazio aereo di ogni stato è stato suddiviso in aree geografiche, che specificano le restrizioni presenti in quell'area. Sono poi state individuate tre categorie di operazioni che si differenziano in base al drone che viene utilizzato e all'area in cui si trova. Successivamente sono state introdotte delle abilitazioni specifiche per condurre queste 3 tipologie di operazioni. In più tutti gli operatori che intendono operare con droni che possono montare dispositivi per catturare immagini, di qualsiasi tipo, sono tenuti a registrarsi in un sito nazionale, che rilascerà un QR code da applicare sul velivolo. Per l'Italia questo sito è D-FLIGHT, che mostra anche le aree geografiche in cui si può o non si può volare.

È bene precisare che l'operatore non è obbligatorio che sia il pilota dell'UAS: le due figure sono distinte e possono essere ricoperte da due persone diverse.

Altro obbligo che viene imposto dal regolamento europeo è che qualsiasi drone, non giocattolo, abbia un'assicurazione aeronautica adeguata al tipo di operazione che si intende svolgere.

Le tre macrocategorie di operazioni sono definite dal regolamento UE 947/2019 e divise in:

- OPEN
- SPECIFIC
- CERTIFIED (rientra nell'aviazione generale la licenza di volo è il ppl (Private Pilot License), non verrà trattata in questa tesi)

La classificazione dell'operazione è definita in base all'area in cui si intende volare ed il tipo di drone che si utilizzerà. Tutti gli UAS con telecamera e non considerati giocattoli, sono classificati in base al peso massimo al decollo o MTOM (Max Take Off Mass) e da questa dipende la marcatura che potranno ottenere.

Le marcature attualmente approvate vanno dalla C0 alla C6 e saranno obbligatorie su tutti i droni venduti dal 1° gennaio 2024. Per ottenere le marcature di classe oltre al peso si dovranno rispettare alcuni standard definiti dal regolamento UE 945/2019.

Categoria OPEN

La categoria OPEN prende in considerazione le operazioni a “basso rischio”, che a loro volta si suddividono in A1-volo sulle persone, A2-volo vicino alle persone, e A3-volo lontano alle persone.

In questa categoria rientrano la maggior parte delle operazioni svolte in ambito amatoriale e anche buona parte delle operazioni professionali, visto che non richiede nessun tipo di autorizzazione è la più semplice e veloce da svolgere.

La categoria open prevede solo volo VLOS (Visual Line Of Sight) dove il drone deve essere sempre in vista del pilota senza l’ausilio di nessun ausilio visivo e un’altezza massima di 120 m dal suolo (AGL: At Ground Level), che possono diventare 15 m in più dell’ostacolo se questo supera i 120m.

È vietato il lancio di ogni tipo di merce ed il trasporto di merci pericolose (esplosivi, prodotti chimici, sangue). La Figura 4 descrive tutte le sottocategorie con i rispettivi limiti e abilitazioni necessarie per lo svolgimento dell’operazione. Se per l’operazione non si possono soddisfare tutte le specifiche sopra descritte si passa in categoria SPECIFIC: operazioni a medio rischio.

Operazione		UAS				Operatore UAS		Pilota UAS	
Sottocategoria	Area operativa	Classe	MTOM / Velocità	Scadenza	Registrazione	Età minima	Competenze		
Tutte	<ul style="list-style-type: none"> Altezza max 120m AGL + 15 m dall'ostacolo No lancio materiale No trasporto merci pericolose 	Costruiti privatamente	< 250 g < 19 m/s	/	Solo se equipaggiati con telecamera	Se con supervisione di un altro pilota 16 anni			
		No ma, Venduto prima del 1/1/2024	< 250 g	/				<ul style="list-style-type: none"> Leggere il manuale di uso e manutenzione 	
A1	<ul style="list-style-type: none"> Volo su persone non coinvolte, ma non assembrate 	C0	< 250 g < 19 m/s	/					
		C1	< 900 g < 80 J	/	Si	16	<ul style="list-style-type: none"> Leggere il manuale di uso e manutenzione Training online Test online 		
		Limited A1	< 500 g	31/12/2023			<ul style="list-style-type: none"> Test A2 		
A2	<ul style="list-style-type: none"> Max 30m orizzontali da persone non coinvolte Max 5m se in modalità a bassa velocità 	C2	< 4 kg	/	Si	16	<ul style="list-style-type: none"> Leggere il manuale di uso e manutenzione Training online Test online Test A2 Addestramento pratico autonomo 		
		Limited A2	< 2 kg	31/12/2023					
		C3	<25 kg	/	Si	16	<ul style="list-style-type: none"> Leggere il manuale di uso e manutenzione Training online Test online 		
A3	<ul style="list-style-type: none"> No persone non coinvolte nell'area Max 150m orizzontali da zone residenziali, commerciali o industriali 	C4							
		Costruiti privatamente							
		Venduto prima del 1/1/2024							

Figura 4. Figura riepilogativa della regolamentazione per la categoria di operazioni OPEN.

Categoria SPECIFIC

Nella categoria Specific sono comprese le operazioni definite a “medio rischio” e per questo oltre alla registrazione prevedono una dichiarazione di operatore Specific rilasciata a D-FLIGH. L’operatore deve prevedere un manuale delle operazioni ed il drone deve essere dotato di terminatore di volo.

I limiti categorici della categoria open qui decadono, soprattutto se si parla di PDRA e Risk Assessment, per esempio possono essere svolte operazioni in BVLOS. In Italia al momento si suddividono come riportato in Tabella 1.

Tabella 1. Suddivisione in scenari operativi

Sufficiente la dichiarazione scenari standard	<ul style="list-style-type: none">• STS-EU 01• STS-EU 02• IT-STS 01• IT-STS 02
Necessaria approvazione da parte di ENAC	<ul style="list-style-type: none">• Risk assessment (SORA)• PDRA
Solo in caso di operatore certificato	<ul style="list-style-type: none">• LUC (Light UAS operator)

Scenario standard

Sono scenari in cui è stata svolta una valutazione del rischio completa dall’ente regolatore, se si riesce a rientrare in tutti i parametri sono sufficienti la formazione e la dichiarazione, non è necessaria l’autorizzazione diretta dall’ente gestore dell’aviazione, ENAC per l’Italia.

- **STS-EU 01.** Scenario standard europeo VLOS in corso di definizione si potrà eseguire con droni C5 e C6.
- **STS-EU 02.** Scenario standard europeo BVLOS in corso di definizione si potrà eseguire solo con droni C6.

Gli scenari standard italiani (**IT-STS-01 / 02**), se dichiarati prima del 31 dicembre 2023 sono validi fino al 31 dicembre 2025. Sono scenari istituiti per permettere agli operatori di lavorare nel periodo in cui non ci sono fisicamente droni marchiati C5 e C6. Si possono condurre con droni marchiati come no. Si differenziano per la tipologia di ambiente in cui sono condotti: l’It-sts-01 corrisponde ad uno scenario urbano, mentre l’It-sts-02 corrisponde ad uno scenario non urbano scarsamente popolato.

Prevedono un peso limite di 10 kg per lo 01 e 25 kg per lo 02 ed un’altezza massima di 120m.

Sono molto simili ad un open A3 solo spostato in uno scenario più complesso. Per entrambi va definita l'area dell'operazione che non deve contenere persone non coinvolte, un'area di contingency, in cui si deve riportare il drone nell'area delle operazioni ed un area di buffer, in cui il drone deve essere terminato (va fatto schiantare prima che vada in aree non controllate).

In più per tutta la durata dell'operazione deve essere attivo un ERP (Emergency Response Plan), una lista di procedure d'emergenza da attivare nel momento in cui si presentano situazioni impreviste come Fly Away (perdita di controllo), collisioni, o altre emergenze di qualsiasi genere.

SORA (Specific Operation Risk Assessment)

Nel SORA non vi sono linee guida o specifiche limitazioni, ma viene richiesto di poter dimostrare che l'operazione che si vuole svolgere è sicura e che si sono prese tutte le precauzioni del caso, per questo motivo le operazioni sono soggette ad approvazione dell'ente per l'aviazione civile.

SORA si basa su una prima valutazione del rischio a terra ed in aria dell'operazione e una seconda valutazione dopo le misure adottate per ridurre quel rischio (Figura 5). È una procedura molto complicata, il documento finale, solitamente sul migliaio di pagine, può richiedere mesi per essere compilato, e non ci sono certezze sull'accettazione da parte dell'ente.



Figura 5. Rappresentazione schematica della metodologia SORA come descritta da EASA.

PDRA (Predefined Risk Assessment)

Per venire incontro agli operatori, EASA ha messo a disposizione cinque PDRA. Sono dei modelli di SORA precompilati e preventivamente valutati che, in modo paragonabile agli scenari standard, mettono delle limitazioni. Ovviamente studiati per operazioni molto complesse rendono il processo di autorizzazione molto più semplice riducendo i tempi a qualche settimana. Ad oggi sono l'unico modo per svolgere operazioni BVLOS, quindi risultano molto importanti per l'ambito forestale.

Abilitazione SPECIFIC

Decisamente più complicata rispetto alle open, si può conseguire solo dopo l'A1-A3 ed A2. Si compone di 6 moduli obbligatori ed altri 5 volontari tutti erogati in presenza presso scuola di volo:

- Corso scenari standard 01/02
- Corso comunicazioni aeronautiche
- Corso HM (Human Factor)
- Corso CRM (Crew Resource Management)
- Corso SORA
- Addestramento pratico
- 5 Addestramenti specifici uno per ogni PDRA

Aree geografiche APR

In ogni nazione ci sono aree in cui i droni non sono permessi principalmente per questioni di sicurezza: permettere ai droni di volare indiscriminatamente vicino ad un aeroporto può risultare pericoloso per il traffico in decollo o avvicinamento, sorvolare carceri o altre infrastrutture sensibili può risultare sospetto, volare nei parchi naturali può arrecare disturbo alla fauna.

Il regolamento EASA obbliga attraverso il regolamento 947/2019 ogni stato ad incaricare un portale sul quale siano reperibili tutte le informazioni delle aree geografiche APR. Per l'Italia il portale scelto è D-FLIGHT (Figura 6).

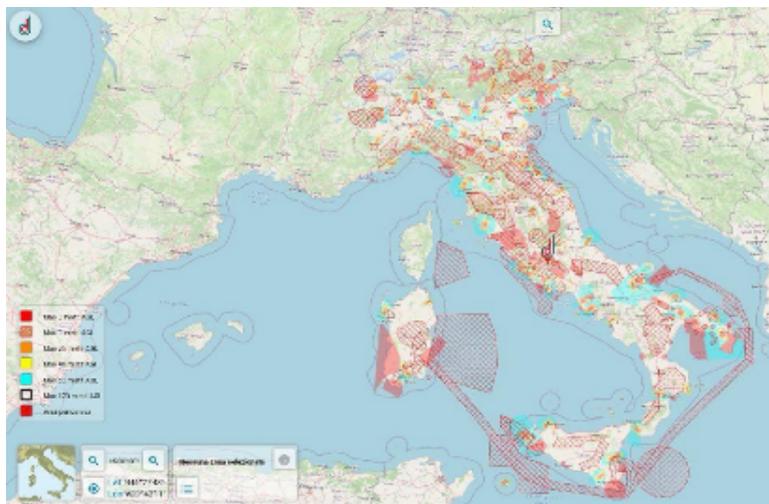


Figura 6. Esempio di schermata del portale D-FLIGHT. I colori delle varie zone indicano la quota massima di volo (rispetto al suolo) consentita e la possibilità di effettuare il volo.

Con un abilitazione SPECIFIC si potrà fare richiesta per volare in zone normalmente interdette, come le aeroportuali. Importante ricordare che ENAC è l'unica autorità che può limitare lo spazio aereo, ordinanze emesse da comuni o parchi naturali per vietare i droni sul loro territorio, non hanno valenza legale. La procedura per riservare uno spazio aereo o fare domanda per volare nelle zone rosse, è la circolare ATM-09, una volta approvata la richiesta, l'area comparirà su D-FLIGHT e sugli AIP Italia sotto forma di NOTAM (Notice To AirMen)

Caso studio

Il caso scelto per sperimentare l'utilità di questi sistemi nell'ambito forestale è stato il monitoraggio del bostrico (*Ips typographus* L.) in un popolamento di abete rosso (*Picea abies* (L.) H. Karst) nel comune di Voltago Agordino, nella provincia di Belluno.

Lo scopo è sperimentare una metodologia semplice, utilizzabile anche da tecnici e professionisti, per identificare gli alberi malati attraverso delle foto nella banda del visibile o RGB (Red-Green-Blue), per stimare un eventuale espansione della superficie interessata dalle piante colpite dall'infestazione attraverso una serie temporale di foto ad alta risoluzione. Questo approccio permette l'utilizzo di droni semiprofessionali, senza bisogno di essere equipaggiati con camere o sensori professionali, come LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) o multispettrali.

Le elaborazioni dei dati sono state realizzate attraverso l'utilizzo di software comunemente utilizzati, quali Metashape, QGIS, ed Excel.

Area di studio

L'area oggetto di studio (Figura 7) è la quasi totalità del versante nord del Poi, un piccolo colle che si divide nei comuni di Gosaldo, Rivamonte Agordino e Voltago Agordino, tre Comuni della provincia di Belluno. Colpita nel 2018 dalla tempesta Vaia, l'area ha visto i primi interventi di rimozione degli schianti nel 2021, tempo più che sufficiente per permettere la proliferazione del bostrico permettendogli di passare, come in moltissime altre zone dolomitiche, dalle piante abbattute alle piante vive.

Il bosco del Poi nel 2023 ha ricevuto finanziamenti da un progetto UNESCO per la valorizzazione del territorio montano post Vaia: questi fondi sono stati destinati per lo sviluppo di un piano di abbattimento per le particelle pubbliche presenti nell'area. Il monitoraggio è cominciato nell'Aprile 2023 ed è proseguito fino a Novembre 2023.

L'area studio si estende su una superficie di 198 ha, con una pendenza media intorno al 30% ed è percorsa da una pista forestale, che la taglia circa a metà, percorribile da un fuoristrada. All'interno dell'area principale sono state individuate due microaree per permettere un monitoraggio più puntuale dell'espansione del bostrico. Le caratteristiche dell'area sono riportate in Tabella 2.

La scelta delle due microaree ha seguito i seguenti criteri di eleggibilità: (i) trovarsi all'interno dell'area totale; (ii) presenza di bostrico accertata già dal primo sorvolo dell'area totale; (iii) garantire oltre ad un semplice raggiungimento anche un contatto visivo stabile e costante con il drone.

Inoltre, la superficie di queste microaree è stata dimensionata sulla durata di una batteria del drone utilizzato per i rilievi, circa 20 min che corrispondono a circa 4 ettari.

Tabella 2. Principali caratteristiche dell'area studio del Bosco del Poi e delle microaree studio.

Caratteristiche dell'area				
		Bosco del Poi	Microarea 1	Microarea 2
Superficie	ha	198	~4	~4
Pendenza media	%	~30	40	25
Altitudine media	mslm	1324	1311	1329

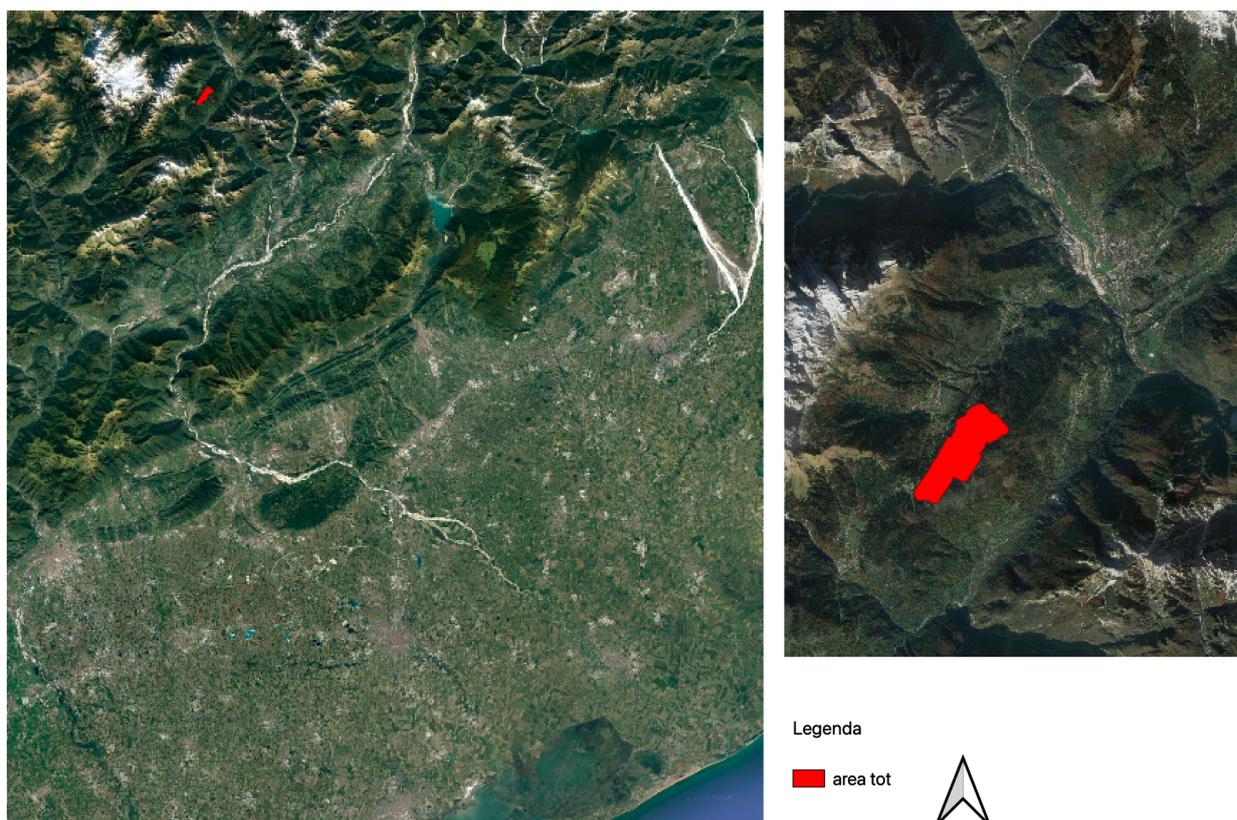


Figura 7. Panoramica dell'area studio e del Bosco del Poi.

Materiali e Metodi

Droni

Per il rilievo sono stati utilizzati due modelli di drone semiprofessionali. Il drone del Comune di Voltago Agordino in dotazione al gruppo di protezione civile: un DJI Mavic 2 Enterprise Advanced, ed i droni del dipartimento TESAF dell'Università degli Studi di Padova e dello studio Ecosinergia di Sedico, entrambi DJI Mavic 3 Enterprise.

DJI Mavic 2 Enterprise Advanced

Le caratteristiche del drone (Figura 8a) e dell'equipaggiamento utilizzato sono riportati in Tabella 4. Il drone ha un MTOM di 1,1kg e rientra nella classe Open A3. È dotato di un sistema di rilevamento ostacoli omnidirezionale: ottico binoculare frontale posteriore ed inferiore, ottico monoculare laterale e infrarosso superiore ed inferiore. Il radiocomando utilizzato (Figura 8b) è uno Smartcontroller di prima generazione su cui è installata l'app di controllo DJI Pilot. Il drone è equipaggiato con due camere: una RGB nello spettro del visibile e una termica, fondamentale nelle operazioni di ricerca e soccorso o monitoraggio incendi, permettendo anche il volo di notte.



Figura 8. Equipaggiamento per il monitoraggio in a) DJI Mavic 2 Enterprise Advanced utilizzato e b) radiocomando.

Caratteristiche del drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	
MTOM (Max Take Off Mass)	1100 g
Velocità massima	72 km/h
Resistenza al vento	10 m/s
Autonomia	20 min
Fotocamera RGB	
Sensore	CMOS da 1/2, pixel effettivi: 48 MP
Obiettivo	FOV: 84° Formato equivalente: 24 mm Apertura: f/2.8 Messa a fuoco: da 1 m a ∞
Intervallo iso	100-1600
Dimensione massima dell'immagine	8.000x6.000
Fotocamera termica	
Sensore	Microbolometro VOx non raffreddato
Obiettivo	38mm
Risoluzione	640×512 @30Hz
Banda spettrale	8-14 μm

Tabella 4. Caratteristiche del drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced e delle fotocamere utilizzate

DJI Mavic 3 Enterprise

La diretta evoluzione del Mavic 2 Enterprise questo drone nasce per la fotogrammetria; infatti, monta di serie il modulo RTK e la fotocamera principale ha un sensore micro 4/3 con apertura variabile ed otturatore meccanico (Figura 9a). Dettaglio importante, in ottica del regolamento, è nativamente classificato C2. Anche il sistema di rilevamento ostacoli ha subito un'evoluzione importante, su questo modello rimane omnidirezionale, ma si basa solamente su quattro fotocamere *fisheye*, il sistema binoculare inferiore rimane dedicato al *precision landing*, il *beacon*, prima accessorio installabile, è in questa evoluzione parte integrante del corpo del drone. Il radiocomando utilizzato è un DJI RC Enterprise (Figura 9b), con caratteristiche simili a quelle dello Smartcontroller, mentre anche l'applicazione di controllo *Dji Pilot 2* ha subito anch'essa un'importante aggiornamento. Le caratteristiche del drone e dell'equipaggiamento utilizzato sono riportati in Tabella 5.

Nascendo questo drone per la fotogrammetria, la fotocamera è molto diversa da quella che monta la precedente generazione, che presenta sempre due obiettivi, ma entrambi lavorano sulla gamma RGB.



Figura 9. Equipaggiamento per il monitoraggio in a) DJI Mavic 3 Enterprise utilizzato e b) radiocomando

Tabella 3. Caratteristiche del drone DJI Mavic 3 Enterprise e delle fotocamere utilizzate.

Caratteristiche del drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	
MTOM (Max Take Off Mass)	1050 g
Velocità massima	80 km/h
Resistenza al vento	12 m/s
Autonomia	45 min
Fotocamera RGB (1)	
Sensore	CMOS da 1/2", pixel effettivi: 12 MP
Obiettivo	FOV: 15° Formato equivalente: 162 mm Apertura: f/4.4
Intervallo iso	100-6400
Dimensione massima dell'immagine (nativa)	4000x3000
Fotocamera RGB (2)	
Sensore	CMOS da 4/3, pixel effettivi: 20 MP
Obiettivo	FOV: 84° Formato equivalente: 24 mm Apertura: f/2.8-f/11
Intervallo iso	100-6400
Dimensione massima dell'immagine (nativa)	5280x3956

Rilievo e Analisi

Le modalità di rilievo e analisi dati sono infine schematizzati in Figura 10. Questi verranno poi sinteticamente riportati nelle sezioni successive della trattazione.

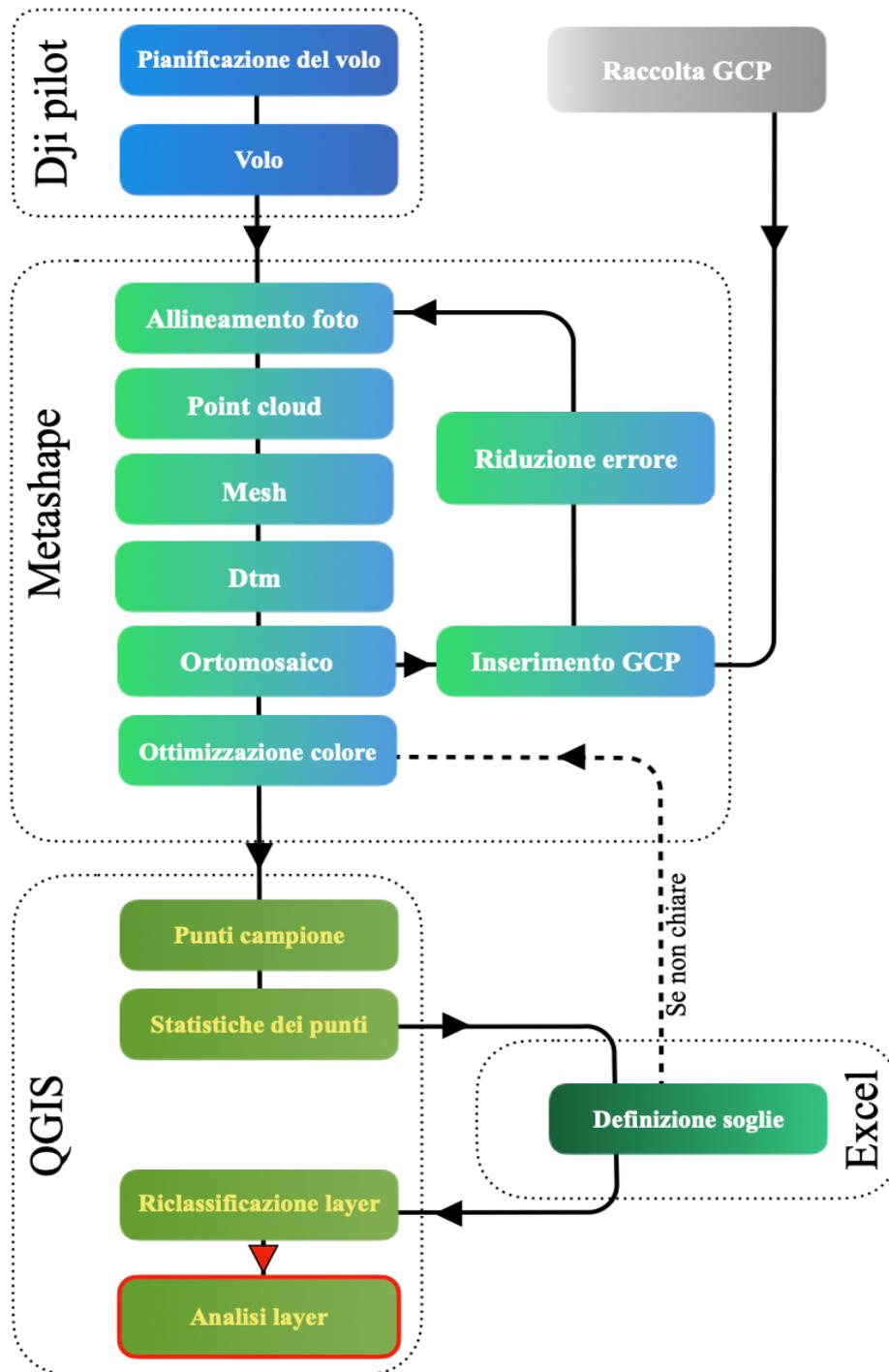


Figura 10. Schema riassuntivo della metodologia utilizzata.

Pianificazione dei voli

A seguito di una prima analisi del territorio e delle mappe catastali, è stata definita l'area d'interesse. Dopo una rapida verifica su D-FLIGHT, che ha confermato la non intersezione dell'area d'interesse con lo spazio aereo vietato del Parco Nazionale delle Dolomiti Bellunesi, questa è stata utilizzata per definire i piani di volo necessari al completamento dell'operazione. Una delle criticità rilevate è l'impossibilità di caricare su D-FLIGHT un file georeferenziato dell'area, né di scaricare le mappe delle aree vietate. Questa valutazione è stata realizzata aggiungendo una trasparenza alla mappa di Google Earth e posizionandola manualmente su uno screenshot di D-FLIGHT, usando la strada come punto di riferimento (Figura 11).

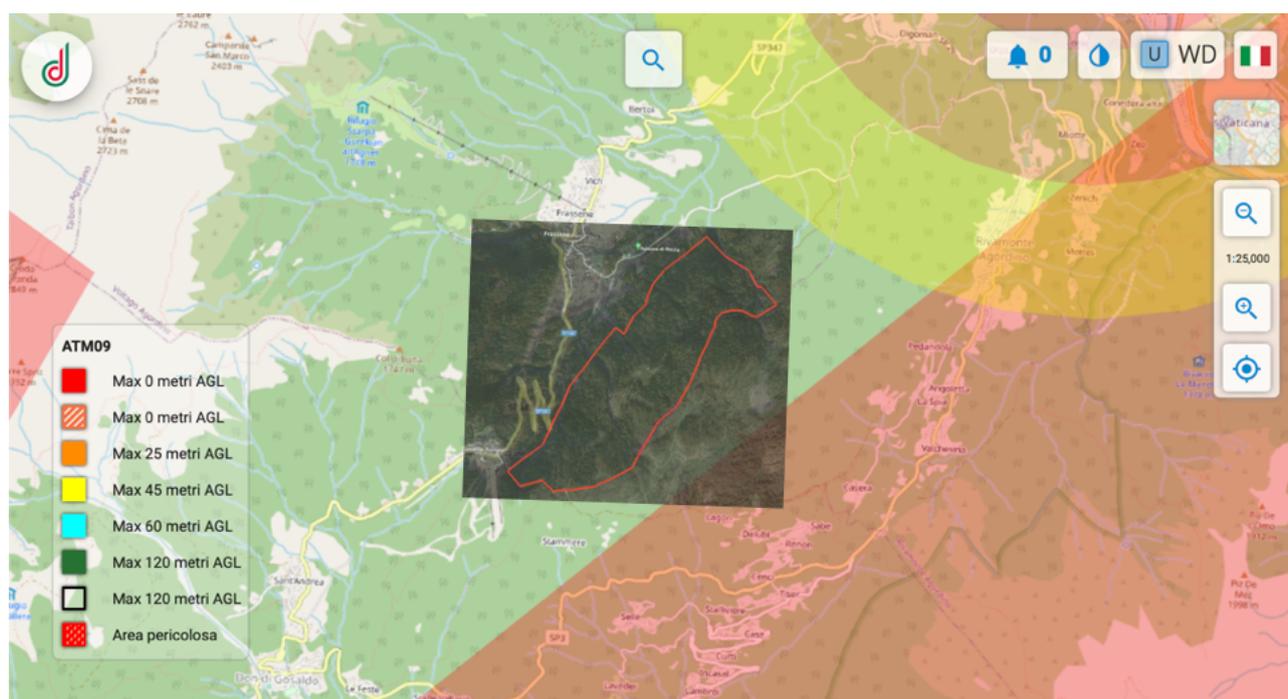


Figura 11. Dettaglio dell'individuazione dell'area di sorvolo.

Per la pianificazione dei voli sull'area totale è stato utilizzato DJI Flight Hub che ha permesso l'importazione dei file kml relativi sugli smartcontroller, dai quali con cui sono stati elaborati i piani di volo. Considerando l'estensione dell'area, oltre che l'autonomia di volo dei droni in questione, si è scelto di dividere l'area in tre voli con altrettanti punti di decollo diversi (Figura 11).

Durante il volo è stata utilizzata una funzione propria dei droni DJI Mavic 3 Enterprise, definita "DTM follow", che permette al velivolo di mantenere la quota impostata rispetto ad un modello digitale del terreno (DTM) precedentemente scaricato da internet. Questa tecnologia unita al posizionamento centimetrico garantito dall'RTK ha permesso una pianificazione semplice, veloce e sicura dei voli. Non necessitando di precisioni elevatissime l'altezza scelta è di 120m rispetto al suolo (limite legale per la categoria open) che garantisce una precisione di circa 2,5 cm pixel.

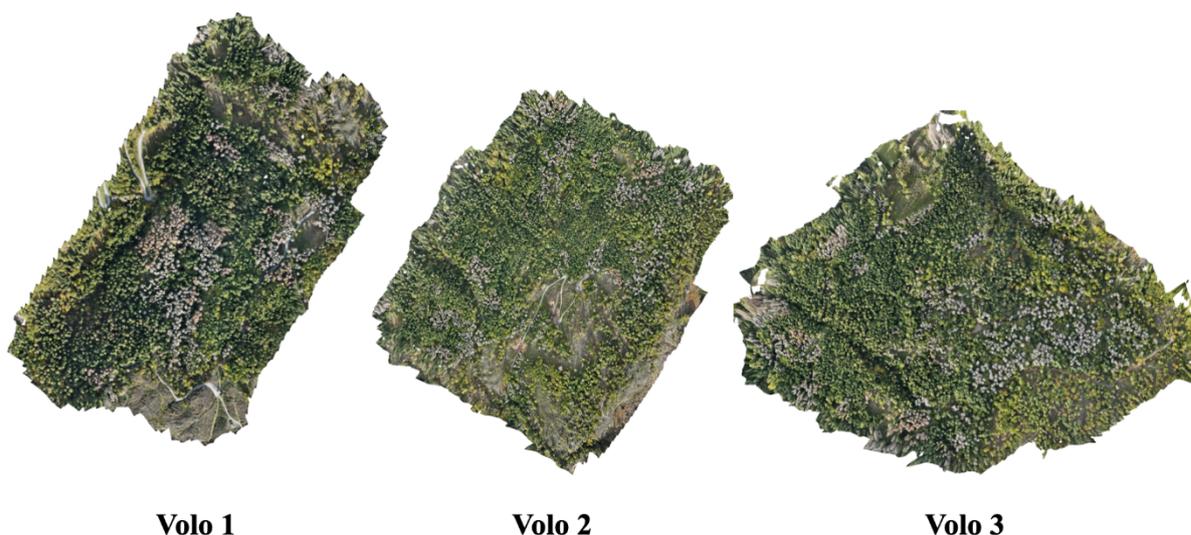
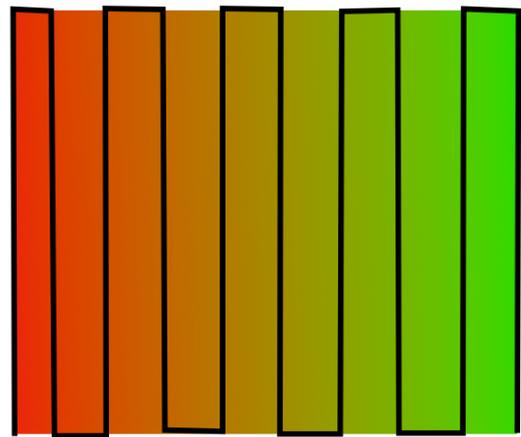
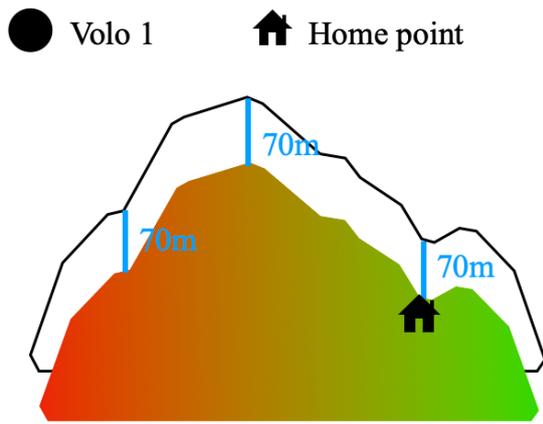


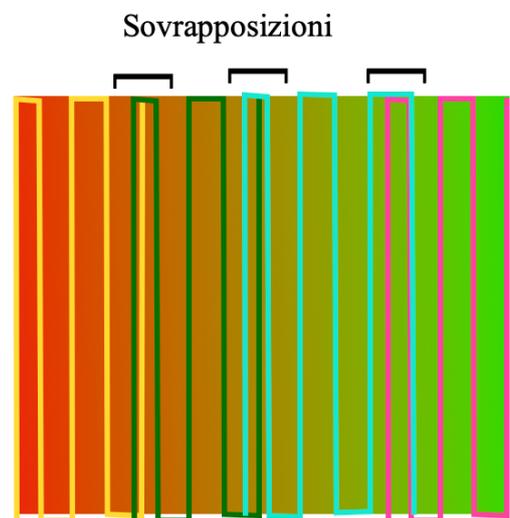
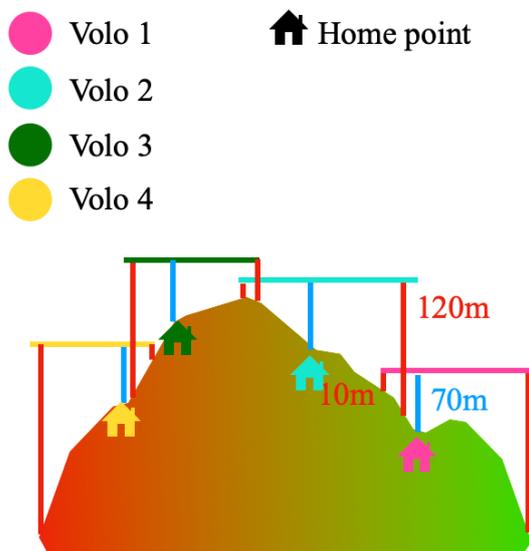
Figura 12. Dettaglio dell'estensione e della restituzione finale dei tre voli effettuati per coprire l'area di interesse del Bosco del Poi.

Il DJI Mavic 2 Enterprise Advanced, non possedendo questa funzione, mantiene per tutto il volo una quota, relativa al punto di decollo, indipendentemente dalla reale distanza dal suolo.

In fotogrammetria per poter ottenere un modello preciso tutte le foto devono avere la stessa definizione, e se queste vengono scattate a distanze differenti hanno per forza definizioni differenti. Trovandosi tutta l'area in un terreno con pendenza non trascurabile, la mancanza di questa funzione ha complicato non di poco la pianificazione dei voli. La soluzione trovata per cercare di ridurre la differenza di definizione finale è stata quella di volare "a gradini" dividendo in diversi piani di volo la singola area calcolando delle sovrapposizioni tra i voli (Figura 13). Per aumentare la precisione e ridurre la deformazione dovuta a quote di volo diverse si sono dovute predisporre 2/3 spazzate di sovrapposizione per ogni volo rispetto agli adiacenti. Oltre alla sovrapposizione laterale tra voli differenti si sono dovute considerare anche le sovrapposizioni all'interno dello stesso volo. Queste sempre basate sulla quota relativa al punto di decollo vengono sfalsate nel momento in cui il terreno si trova a distanze differenti rispetto a quello che il drone si aspetta. Per questo nei voli in cui si è dovuto aumentare la quota per mantenere più o meno la stessa altezza dal suolo, si sono dovute aumentare anche le sovrapposizioni sia frontale che laterale.



a)



b)

Figura 13. Schemi di volo utilizzati per a) DTM follow e b) volo "a gradini".

Definiti i piani di volo e gli schemi di sovrapposizione dei voli, questi sono stati ripetuti lungo il periodo di monitoraggio con scadenza mensile (Tabella 4). La scelta dei giorni ha seguito i seguenti criteri

- Assenza di precipitazioni e fenomeni atmosferici che rendessero pericoloso il volo
- Disponibilità del pilota
- Accessibilità al sito
- Presenza di un NOTAM per addestramento militare (mese di Agosto)

Tabella 4. Cadenza dei voli su Area totale e microaree.

Mese (2023)	Data di volo	Area totale	Microarea 1	Microarea 2	Denominazione
Aprile	06/04/2023	x			AT-04
Maggio					
Giugno					
Luglio	12/07/2023		x		AM1-07
Agosto					
Settembre	05/09/2023		x	x	AM1-09, AM2-09
Ottobre	13/10/2023		x	x	AM1-10, AM2-10
	23/10/2023	x	x	x	AT-10, AM1- 10.2, AM2- 10.2

Raccolta Punti di Controllo (GCP)

La raccolta dei punti di controllo a terra (Ground Control Points, GCP) per l'area totale è stata svolta dallo studio Ecosinergia simultaneamente al primo volo (6/4/2023) attraverso una sistema GNSS-RTK base-rover stazione collegati alla rete GPS della Regione del Veneto. Per tutti i voli effettuati la stazione è stata posizionata in tre punti differenti per garantire una copertura adeguata dell'area. Per le microaree i GCP sono stati raccolti dai ricercatori del TESAF con la medesima tecnica in due date diverse (12/7/2023 area 1 e 23/10/2023 area 2) posizionando la stazione nelle medesime coordinate individuate nella raccolta dei punti totali.

Sono stati raccolti 8 punti per la microarea 1 e 9 per la microarea 2, con una precisione media di 51.0mm.

Analisi fotogrammetrica

Una volta scattate le foto sono state elaborate con Agisoft Metashape®. Il procedimento e i parametri utilizzati sono riportati in Tabella 5. Nonostante siano state restituiti con gli stessi passaggi, le ortofoto derivanti dai due droni presentano comunque delle differenze (Figura 14), risultato del tutto attendibile considerando i 4 anni che separano le due macchine. La limitazione forse più importante del M2EA è la mancanza dell'otturatore meccanico, che si traduce in foto non nitide soprattutto in condizioni di scarsa illuminazione.

Tabella 5. Procedimento e settaggi dell'elaborazione fotogrammetrica effettuata in Metahsape per la restituzione dei mosaici di foto delle aree studio.

PROCESSO	PASSAGGI / SETTAGGI
Caricamento e pulizia delle foto dai dati di location e rotation	
Primo allineamento delle foto	
Prima nuvola di punti sparsa	
Prime mappe di profondità	
Nuvola densa	Quality = high - Depth filtering = moderate
Elaborazione del DEM	Geographic - WGS 84 / utm zone 32N (epsg 32632) - Source = Point cloud
Creazione dell'ortomosaico	Surface = DEM - Blending mode = Mosaic
Inserimento dei marker sui punti a terra	Add marker - Filter photos by marker - posizionamento manuale dei marker
Importazione coordinate dei punti	Import Reference - adattamento tabella a Easting / Northing / Altitude
Riallineamento delle foto	
Ottimizzazione camere	Ottimizzazione scegliendo 2-3 marker con confidenza più alta
Riduzione dell'errore tramite la rimozione dei punti incerti	Gradual selection - image count = 2 o 3 - Reconstruction & Uncertainty < 0,5 - Reprojection < 1
Creazione della nuvola densa definitiva	Quality = high - Depth filtering = moderate
Elaborazione del DEM definitivo	Geographic - WGS 84 / utm zone 32N (epsg 32632) - Source = Point cloud
Elaborazione ortofoto definitiva	Surface = DEM - Blending mode = Mosaic



a)



b)

Figura 14. Confronto tra le restituzioni dell'ortomosaico di foto tra a) Mavic 2 Enterprise Advanced e b) Mavic 3 Enterprise.

L'ultimo passaggio prima dell'esportazione dell'ortofoto è stato quello della correzione colore, che ha visto l'aumento del contrasto chiaro/scuro per facilitare le successive elaborazioni. Un esempio di questo passaggio e del risultato è riportato in Figura 15. In particolare, in situazioni di luce diffusa ed uniforme che non presentano ombre lunghe la banda che restituisce la differenza maggiore tra chiaro/scuro è quella del Blu. Mentre nelle foto in cui troviamo una luce diretta che crea ombre e riflessi la banda che restituisce il risultato migliore è quella del Rosso. Questo è dovuto ai limiti della macchina fotografica e dalla sua gamma dinamica: il range di toni che il sensore è in grado di registrare, dall'ombra più scura, a cui corrisponde il sottobosco, alla luce alta più brillante, in cui troviamo le chiome verdi con i riflessi. Questi ultimi pixel raggiungono il limite alto della gamma dinamica apparendo in alcuni casi bianchi, i valori molto alti per ogni banda portano il valore medio dei pixel presenti nell'area di buffer ad alzarsi moltissimo raggiungendo ed a volte superando quello degli alberi malati.

1	0	0
0	1	0
0	0	1

a)

0	0	1
0	1	0
1	0	0

b)



c)

Figura 15. Matrice colore a) normale e b) invertita, assieme a c) un esempio di foto ricalibrata utilizzando la matrice colore invertita.

Elaborazioni spaziali

Le ortofoto dopo l'ottimizzazione sono state importate in QGis per le successive analisi.

Una foto RGB è composta da 3 bande corrispondenti ai 3 colori primari: Red, Green, Blu, dove i valori per ogni banda sono compresi tra 0 e 255 (dove 0 = nero e 255 = bianco). Modulando i tre valori si possono ottenere tutti i colori dello spettro del visibile: per questo principio sicuramente ci sono delle differenze tra un pixel marrone rispetto ad un pixel verde. Per trovare queste differenze si è proceduto a campionare gli alberi nella foto per la definizione di queste soglie, ed infine riclassificare i pixel di ciascuna foto.

Per fare ciò si è cominciato creando un layer vettoriale di punti, 50 per microarea e 150 per l'area totale, posizionati in maniera casuale e corrispondenti al centro delle chiome degli alberi, dividendoli per 1/3 malati e 2/3 sani, considerando che l'albero verde, presumibilmente sano, può avere più sfumature e tonalità rispetto a quello presumibilmente morto e quindi grigio marrone. Dai punti è stata creata un'area circolare di raggio 2m per poter calcolare il valore medio dei pixel della banda d'interesse sull'area occupata dalla chioma (Figura 16). Ad ogni punto è stato assegnato un valore corrispondente allo stato di salute (M = albero marrone, presumibilmente malato; S = albero verde, presumibilmente sano).



Figura 16. Esempio di aree circolari sulle chiome interpretate dalle foto.

Dalle aree buffer delle chiome sono state calcolate le statistiche zonali relative alla singola banda colore (media, massimo, minimo e deviazione standard).

Inizialmente, si è provveduto a calcolare le statistiche per tutte le bande colore, per poter capire quale fosse quella che presentasse maggiore differenza tra pianta sana e pianta malata. Le statistiche relative alle singole bande sono state raggruppate in un'unica tabella utilizzando Microsoft Excel.

Qui i dati sono stati ordinati per stato di salute (sani e malati) e visualizzati tramite un grafico a dispersione e uno a box. Tramite questi sono state definite le soglie per andare a riclassificare le ortofoto. In Figura 17 sono riportati come esempio i grafici per la banda Blu dell'ortofoto della Microarea 1 (12/07/2023).

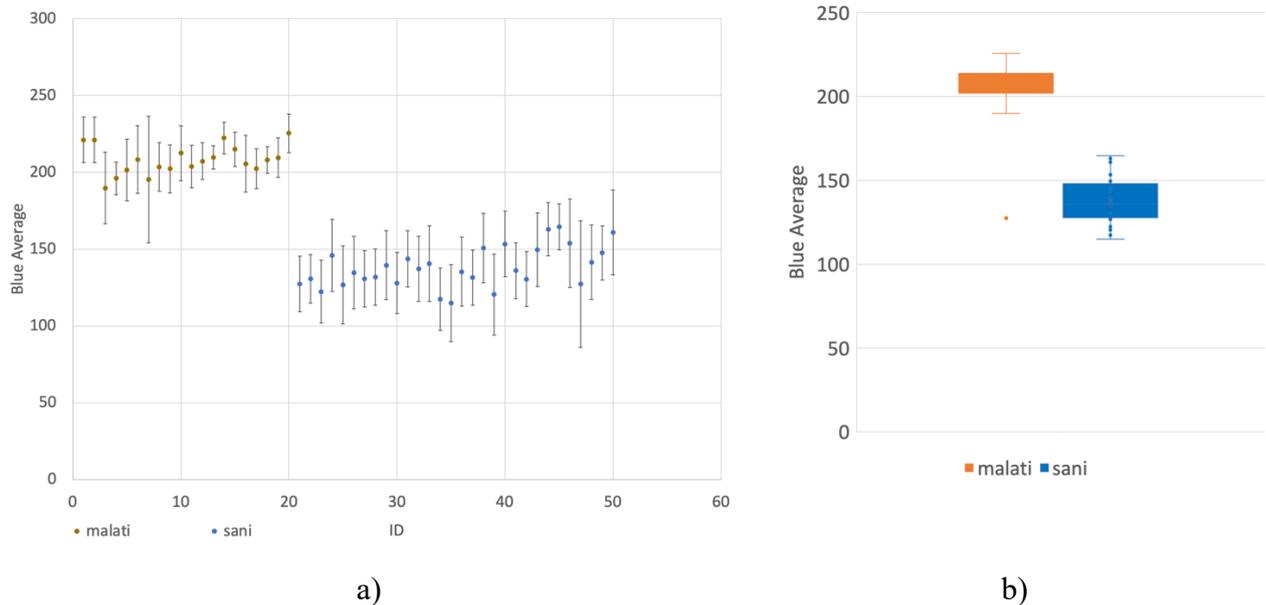


Figura 17. Divisione degli alberi tra sanie malati e visualizzazione tramite grafico a dispersione (a) e box-plot (b).

Riclassificazione delle ortofoto e differenza raster

Si è proceduto, quindi, su QGIS a riclassificare le ortofoto usando lo strumento di processing “riclassifica layer in base a tabella”, assegnando i valori soglia precedentemente individuati (Tabella 6) alla banda Blu o del Rosso, a seconda del livello generale di luminosità della foto. In Figura 18 viene mostrato un esempio di riclassificazione secondo quanto descritto su la microarea 1.

Tabella 6. Valori soglia per la distinzione in albero sano e malato

	Minimo	Massimo
Albero sano (S)	110	170
Albero malato (M)	185	230

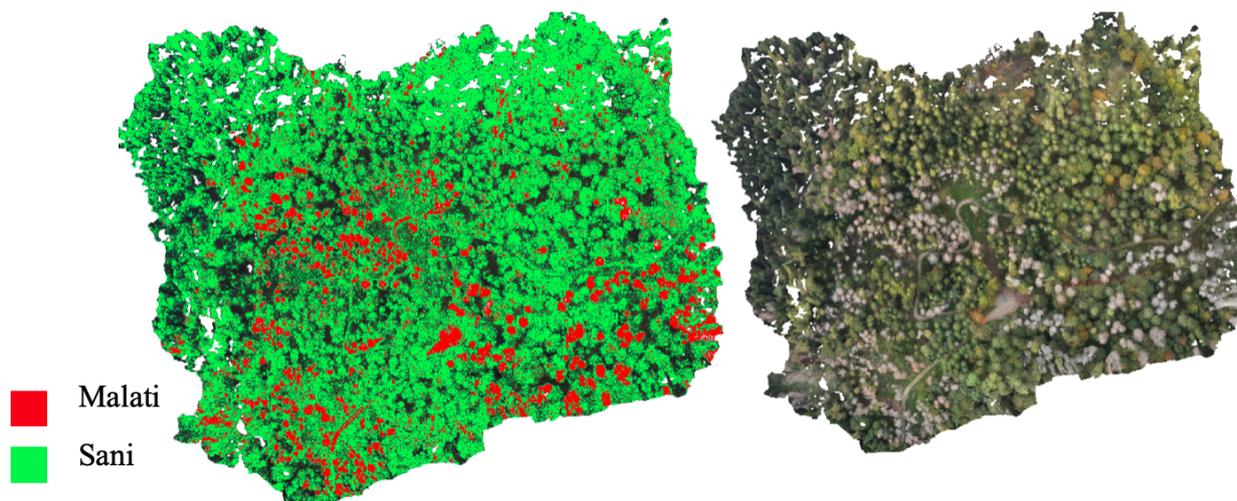


Figura 18. Riclassificazione della microarea 1.

Ultimo passaggio dell'analisi spaziale è quello del confronto multi-temporale all'interno della stessa area ma in mesi diversi, per valutare e stimare l'eventuale differenza. Per questo confronto è stato utilizzato il Calcolatore Raster di QGIS andando a sommare i due layer. Per visualizzare meglio le differenze, è stata creata una matrice che rende univoche tutte le variazioni di colore, identificandole in quattro casi (Tabella 7). Di cui:

- MM: Malato - Malato = pixel che da marrone rimane marrone (albero morto - strada)
- MS: Malato - Sano = pixel che da marrone diventa verde (erba - latifoglie - larici)
- SM: Sano - Malato = pixel che da verde diventa marrone (espansione bostrico)
- SS: Sano - Sano = pixel che da verde rimane verde (abeti)

Tabella 7. Tabella colore per identificare le differenze tra le diverse foto.

	M	S
M	MM	MS
S	SM	SS

Risultati e Discussioni

Area totale

I risultati principali relativi al cambio di stato degli alberi dell'area totale sono riportati in Figura 19. La Tabella 8, invece, presenta in forma assoluta e percentuale, il cambio di stato tra le due ortofoto. Questo metodo utilizzato nell'area totale ha prodotto i seguenti risultati.

Per quanto riguarda i valori MM sia nell'ortomosaico totale sia nelle microaree è compresa anche l'area occupata dalla strada silvopastorale, quando priva di copertura, per una superficie di circa 0.25 ha. Un ultimo appunto va fatto per i valori delle superfici e delle percentuali del layer riclassificato, queste se sommate, non raggiungono la totalità dell'area in quanto a tutti i pixel che non rientrano in una delle 2 soglie definite in precedenza viene assegnato "No value".

I valori fuori soglie tendenzialmente corrispondono ai punti più scuri dell'ortofoto, come le parti più profonde delle chiome ed il sottobosco che si intravede tra una pianta e l'altra. Circa il 50% dell'area è classificato così.

Per quanto riguarda gli ortomosaici completi (AT-04 ed AT-10), come visto in precedenza, sono composti da 3 voli svolti in momenti diversi della giornata, quindi con condizioni di luce differenti.

In entrambe le date i voli 1 e 2 sono stati svolti la mattina con le ombre più corte, mentre il volo 3 è stato svolto dopo pranzo con la presenza di ombre più lunghe, che come è stato precedentemente analizzato, complicano le elaborazioni. Infatti si può notare come nell'area corrispondente al volo 3 troviamo un'area priva di colori, questo ci dice che i valori di quell'area in entrambi gli ortomosaici non rientravano nelle soglie identificate in precedenza (No value).

Oltre a questo il dato forse più interessante da analizzare è sicuramente la disposizione delle aree SM: infatti le troviamo quasi tutte ai bordi delle aree MM questo sta a dire che negli 8 mesi di rilievi le nuove aree colpite dal bostrico sono i margini delle aree già interessate, che quindi indicano una loro espansione. Unico caso in cui troviamo un'area completamente nuova è quella evidenziata nella Figura 19, un'area di circa 0.8 ha che non ha aree precedentemente infette nelle immediate vicinanze.

Tabella 8. Risultati Area totale

	Superficie (ha)	%
MM	6.02	3,13
MS	18.77	9,75
SM	8.53	4,43
SS	62.22	32,31
Tot	192.60	100,00

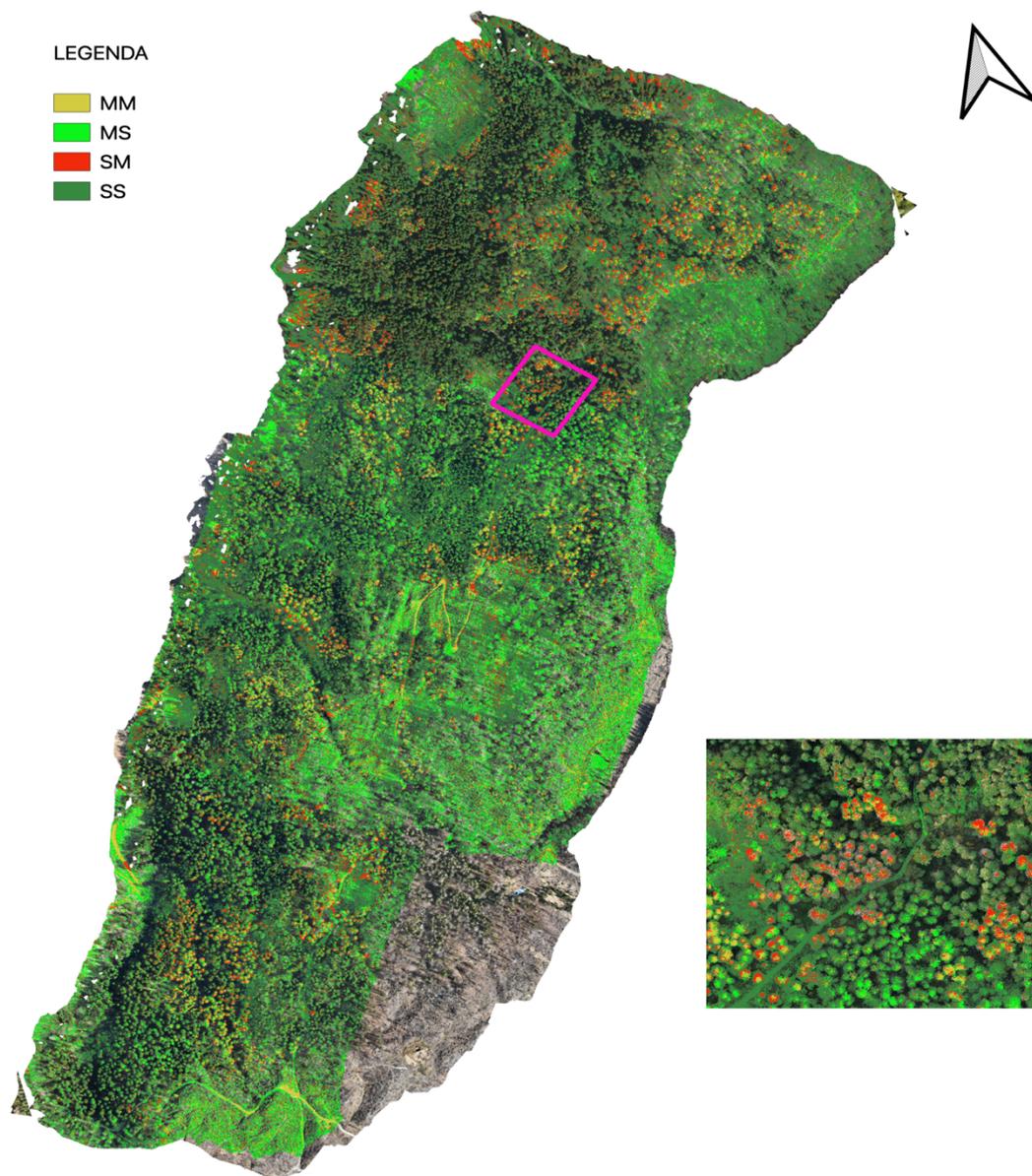


Figura 19. Mappa riclassificata dell'area totale

Microarea 1

Per la microarea 1 (Figura 20) invece i risultati ottenuti sono diversi, interessante osservare la completa assenza di pixel che da marroni passano a verdi (MS) ed in generale una presenza più elevata di bostrico (Tabella 9).

Tabella 9. Risultati microarea 1

	Superficie (ha)	%
MM	0.51	6,98
MS	0.00	0,00
SM	0.88	11,95
SS	1.60	21,77
Tot	7.34	100,00

Importante ricordare che nel quasi 7% di MM è compreso anche il tornante, che in un'area così piccola non è trascurabile come per l'area totale.

Inoltre si può notare un incremento quasi doppio in questa microarea rispetto alla totale, questo è dovuto dai criteri di scelta delle microaree: la presenza accertata di bostrico, se si parte da un nucleo d'infestazione ci si può aspettare che l'espansione si allarghi da questo, come abbiamo visto questo succede per la maggior parte dei nuclei affetti, contenuti nell'area totale.

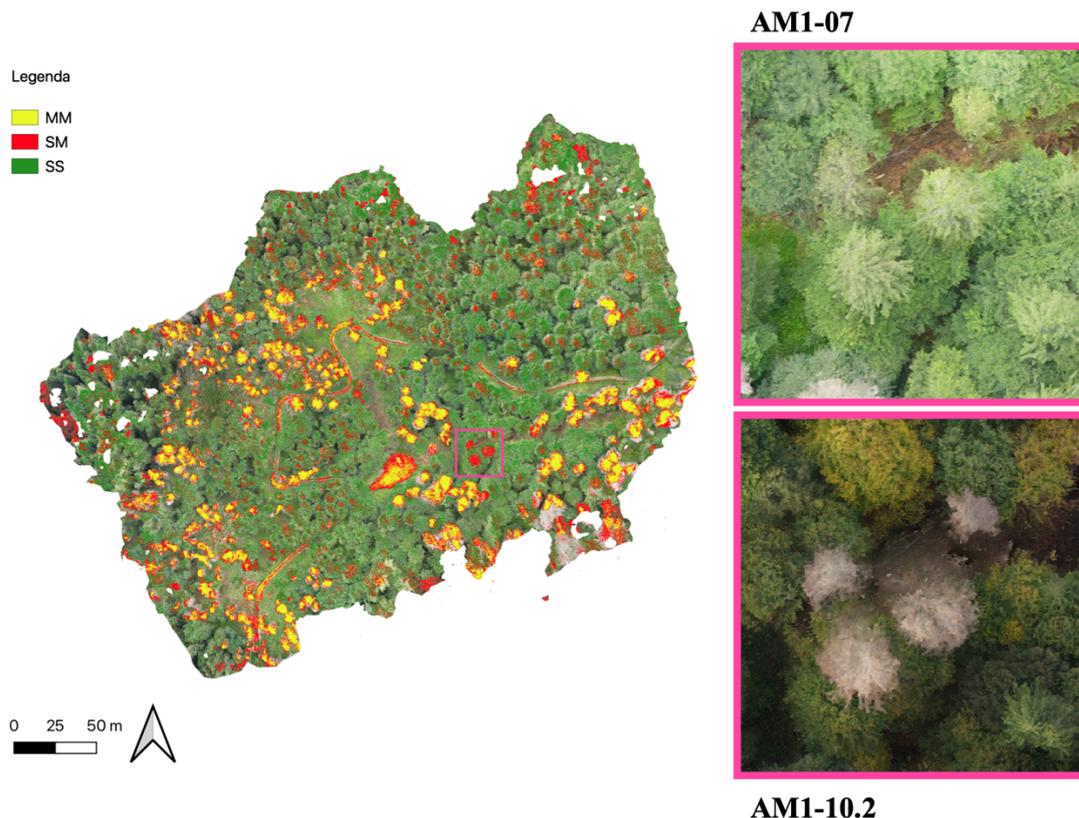


Figura 20. Mappa riclassificata Microarea 1

Microarea 2

Per la i risultati sono ancora diversi, da un lato più vicini a quelli dell'area totale, ma oltre all'assenza di valori MS, ci sono altri problemi (Tabella 10).

Tabella 10. Risultati Microarea 2.

	Superficie (ha)	%
MM	0.12	1,35
MS	0.00	0,00
SM	0.52	6,01
SS	2.80	32,16
Tot	8.69	100,00

L'allineamento di queste ortofoto non è perfetto, e lavorando questo sistema solo sulla variazione di colore del singolo pixel uno scostamento di un albero marrone viene letto come una variazione di colore e quindi classificato come SM. Questo aumenta la superficie che viene interpretata bostricata quando realmente non ci sono variazioni significative.

Si è provato a risolvere l'errato allineamento delle foto rifacendo interamente il processo fotogrammetrico più volte, ma il risultato non è cambiato, il problema probabilmente è la luce dell'ortofoto 2 – 1 (Figura 21).

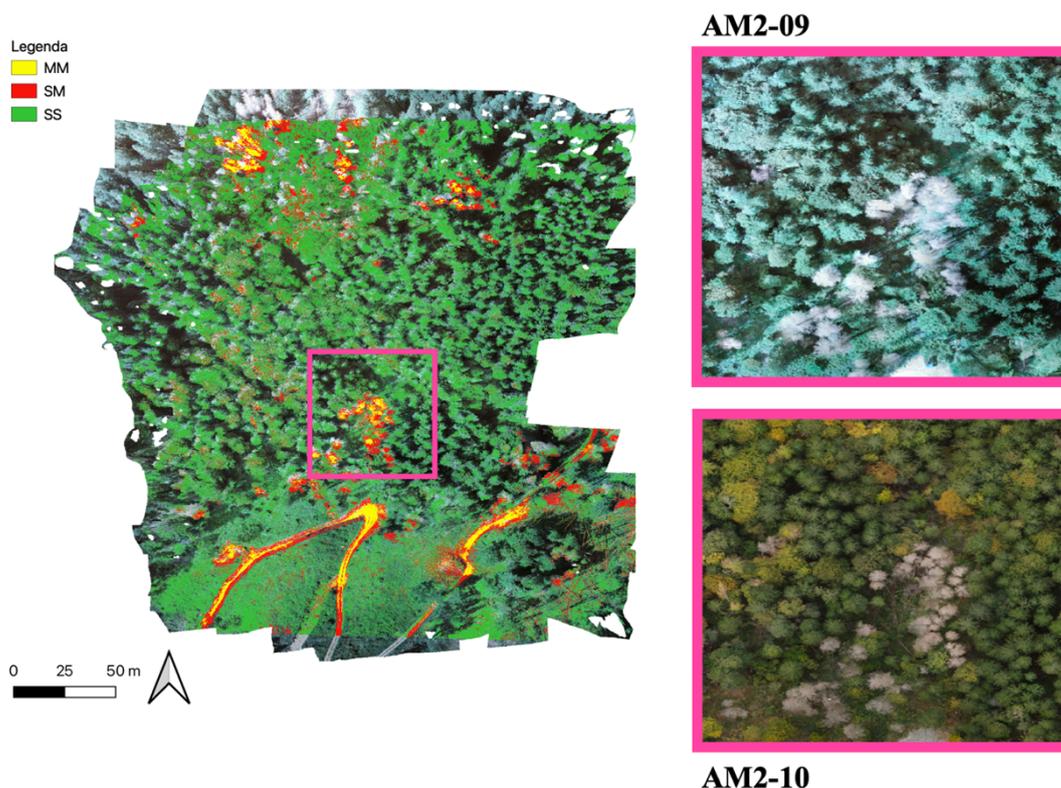


Figura 21. Mappa riclassificata Microarea 2

Conclusioni

Negli ultimi anni il mondo dei droni ha subito un'espansione esponenziale, trovando impieghi professionali in moltissimi campi. Questo insieme a computer sempre più potenti ha permesso una democratizzazione di tecniche fino a qualche anno fa ritenute elitarie, come la fotogrammetria aerea. Anche nell'ambito forestale i droni stanno prendendo sempre più piede in quanto permettono di semplificare e velocizzare moltissimo la raccolta di informazioni su piccola - media scala, fornendo in tempi molto brevi informazioni con una precisione elevata, ciò permette di avere dati aggiornati ed affidabili ad un costo relativamente basso.

Le elaborazioni che si possono fare utilizzando questi dati sono innumerevoli, considerando che gli output possono andare da semplici foto aeree fino ad arrivare a modelli tridimensionali e multispettrali.

Lo scopo di questo studio è provare ad identificare e monitorare l'espansione del bostrico in un popolamento forestale nel comune di Voltago Agordino utilizzando 2 modelli di drone e foto RGB. I droni utilizzati sono un Mavic 2 Enterprise Advanced, in dotazione al gruppo comunale di protezione civile di Voltago e due Mavic 3 Enterprise di Unipd e ecosinergia (uno studio professionale che ha collaborato per questo studio).

L'approccio scelto per l'individuazione del bostrico è la valutazione del colore dei pixel da ortofoto georeferenziate. Un approccio relativamente semplice, ma soggetto a numerose limitazioni, prima tra tutte la luce. Infatti si è notato come i pixel che compongono le chiome illuminate da una luce forte e diretta creano dei riflessi che falsano i dati raccolti.

Le elaborazioni, svolte su QGIS, si sono basate sull'analisi dei valori di una singola banda colore, i risultati migliori si sono ottenuti con la banda del blu nel caso di luce diffusa e con la banda del rosso nel caso di luce forte e diretta.

Si è notato come le piante presumibilmente malate (marroni) hanno valori delle bande colore tendenzialmente più alti rispetto alle piante sane (verdi).

Una volta definita la media dei valori per i due stati, tramite excel sono state definite delle soglie, tramite le quali sono state riclassificate le ortofoto identificando con "M" i pixel di alberi marroni e "S" i pixel di alberi verdi.

Il monitoraggio è stato eseguito mettendo in relazione ortofoto della stessa area scattate in momenti successivi. Il risultato finale vede, in 8 mesi, un aumento di circa il 8.6 ha del bostrico che sull'area totale di 192,6 ha corrisponde a circa il 5 %. Questo sistema punta ad essere più veloce che preciso, per questo presenta numerosi limiti.

Il principale è che vengono presi in considerazione tutti i pixel della foto, sia quelli degli alberi che quelli del terreno, il secondo è che l'unico discriminante è il colore di un pixel, che come abbiamo

visto può essere influenzato da moltissimi fattori. In oltre se le ortofoto non sono perfettamente allineate si crea una distorsione che porta a falsare in modo rilevante i dati

Per migliorarne la precisione si potrebbe, analizzando anche il modello generato dalla nuvola di punti, estrarre i massimi locali, corrispondenti alla cima degli alberi e automaticamente segmentarne la chioma, in questo modo si riuscirebbero ad eliminare i punti del terreno.

Queste rimangono comunque elaborazioni abbastanza semplici rispetto a quello che si può fare grazie ai dati che queste macchine sono in grado di raccogliere.

Spingere questo progresso tecnologico anche in campi abbastanza tradizionalisti come è stato e forse è tuttora quello forestale potrebbe veramente cambiare il modo di lavorare per molti professionisti, semplificando, velocizzando e aumentando la precisione di molti progetti.

Ringraziamenti

Vorrei dedicare le ultime pagine di questo elaborato per ringraziare tutte le persone che ne hanno reso possibile la realizzazione.

Partendo dal Comune di Voltago per la piena fiducia che ha riposto in me oltre alla motivazione allo studio verso una caso locale

Ecosinergia srl per lo spunto dato e per il supporto al lavoro. Il Dott. Cazan e Dott. Brancher hanno dato la motivazione di approfondire gli aspetti tecnici e applicativi di rilievo drone. Il prossimo passaggio (nel prossimo futuro) potrebbe essere quello di approfondire e applicare lo studio delle dinamiche forestali e sviluppo di strategie.

Il mio relatore Dott. Stefano Grigolato per l'opportunità e disponibilità che mi ha dato di lavorare a questo progetto.

I correlatori Dott. Alberto Udali e Dott. Luca Marchi per la pazienza e la mano essenziale che mi hanno dato.

Oltre all'aiuto tecnico pratico che mi è stato offerto dai professionisti, ringrazio la mia famiglia, che mi ha spronato e sostenuto nel percorso che ha permesso di arrivare a questo risultato. Un grazie anche a tutti gli amici che mi hanno accompagnato in questi anni.

A tutte queste persone va il mio più sincero e profondo GRAZIE

Bibliografia

- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2019). Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems - Revision from April 2024. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 and Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945. Da EASA website
- Bozzini, A., Brugnaro, S., Morgante, G., Santoiemma, G., Deganutti, L., Finozzi, V., Battisti, A., e Faccoli, M. (2024). Drone-based early detection of bark beetle infested spruce trees differs in endemic and epidemic populations. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1385687.
- Bozzini, A., Francini, S., Chirici, G., Battisti, A., e Faccoli, M. (2023). Spruce Bark Beetle Outbreak Prediction through Automatic Classification of Sentinel-2 Imagery. *Forests*, 14(6), 1116. doi.org/10.3390/f14061116.

- Bright, B. C., Hudak, A. T., Kennedy, R. E., & Berner, L. T. (2017). Prediction of Forest Canopy and Surface Fuels from Lidar and Satellite Time Series Data in a Bark Beetle-Affected Forest. *Forests*, 8(9), 322. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi.org/10.3390/F8090322.
- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S.F., e Matese, A. (2021). (2021). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests*, 12(4), 397. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Bellingeri, D., Fasolini, D., Menin, A., & Zini, E. (2018). Il monitoraggio integrato dei disturbi del bosco da satellite e da drone. Workshop Tavolo Copernicus Agricoltura, Roma, 28/02/2018. ARPA Lombardia and ERSAF.
- Turkulainen, E., Honkavaara, E., Näsi, R., Oliveira, R.A., Hakala, T., Junttila, S., Karila, K., Koivumäki, N., Koivumäki, N., Tuviala, J., Östersund, M., Pölönen, I., Lyytikäinen-Saarenmaa, P. (2023). Comparison of Deep Neural Networks in the Classification of Bark Beetle-Induced Spruce Damage Using UAS Images. *Remote Sensing*, 15(20), 4928. doi.org/10.3390/rs15204928
- Saarinen, N., Vastaranta, M., Näsi, R., Rosnell, T., Hakala, T., Honkavaara, E., Wulder, M. A., Luoma, V., Tommaselli, A. M. G., Imai, N. N., et al. (2018). Assessing Biodiversity in Boreal Forests with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging. *Remote Sensing*, 10(2), 338. doi.org/10.3390/rs10020338
- Junttil S., Näsi R., Koivumäki N., Imangholiloo M., Saarinen N., Raisio J., Holopainen M., Holopainen M., Hyyppä J., Lyytikäinen-Saarenmaa P., Vastaranta M., Honkavaara E. (2022) Multispectral Imagery Provides Benefits for Mapping Spruce Tree Decline Due to Bark Beetle Infestation When Acquired Late in the Season. *Remote Sensing*, 14(4), 909. doi.org/10.3390/rs14040909
- Tang, L. e Shao, G. (2015) ‘Drone remote sensing for forestry research and practices’, *Journal of Forestry Research*. Northeast Forestry University, pp. 791–797. doi: 10.1007/s11676-015-0088-y.
Udali, A., Talbot, B., & Grigolato, S. (2024). Enhancing precision in quantification and spatial distribution of logging residues in plantation stands. *European Journal of Forest Research*. Springer Berlin Heidelberg. doi.org/10.1007/s10342-024-01699-5