

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Agronomia, Alimenti, Risorse naturali, Animali e
Ambiente

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Viticole ed
Enologiche

TESI DI LAUREA

Misura dello sviluppo fogliare in vigneto - confronto fra metodi diretti ed indiretti

Relatore: Prof. Franco Meggio

Correlatore: Dott.ssa Denise Vicino

Laureando: Maverik De Lorenzi

Matricola n. 2032794

Anno accademico: 2023/2024

Tutti i dati e le informazioni contenuti nella presente tesi vengono pubblicati con il consenso di
CET Electronics.

Indice

RIASSUNTO

ABSTRACT

1. INTRODUZIONE	9
1.1 Proximal sensing e possibili applicazioni	9
1.2 Applicazioni	10
1.2.1 <i>Analisi d'immagine in ambito viticolo</i>	10
1.2.3 <i>Difesa fitosanitaria</i>	11
1.2.4 <i>Stima biomassa above ground</i>	12
3.1 Sensoristica applicata	14
3.2 Sito di studio	20
3.2.1 <i>Vigneto</i>	20
3.2.2 <i>Piano sperimentale</i>	22
3.3 Misure biometriche e metodologie di stima	24
3.3.1 <i>METODO 1</i>	26
3.3.2 <i>METODO 2</i>	27
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	29
4.1 Valutazione dei metodi di rilievo	29
4.1.1 <i>METODO 1</i>	29
4.1.2 <i>METODO 2</i>	30
4.2 Costruzione del dataset di superficie fogliare	31
4.2.1 <i>METODO 1</i>	31
4.2.1.1 <i>Costruzione del dataset di base</i>	31
4.2.1.2 <i>Calcolo del numero totale di foglie per pianta</i>	32
4.2.1.2 <i>Calcolo della superficie fogliare totale per pianta</i>	32
4.2.2 <i>METODO 2</i>	33
4.2.2.1 <i>Costruzione del dataset</i>	33
4.2.2.2 <i>Calcolo del numero totale di foglie per pianta</i>	35
4.2.2.3 <i>Calcolo della superficie fogliare totale per pianta</i>	35
4.3 Confronto tra area fogliare misurata e stimata dalla WCAM	35
4.3.1 <i>Fase iniziale (da inizio stagione fino a metà crescita)</i>	36
4.3.2 <i>Fase di massima crescita (prima della palizzata/cimatura)</i>	36

4.3.3 Cimatura (ultima decade di giugno - inizio luglio)	38
4.3.4 Ripresa post-cimatura e stabilizzazione (luglio)	39
4.4 Analisi di regressione	40
4.4.2 Obiettivo della regressione	42
5. CONCLUSIONI	43
6. BIBLIOGRAFIA	45

RIASSUNTO

Questa tesi analizza e confronta diverse metodologie di misurazione della vegetazione della pianta di vite, utilizzando sia approcci manuali che strumenti automatizzati come la stereocamera WCAM2 sviluppata da CET Electronics. WCAM 2 è una tecnologia avanzata che acquisisce immagini 3D dalla chioma della vite, permettendo di monitorare l'accrescimento giornaliero e di stimare l'area fogliare. L'obiettivo è valutare in campo il sistema, valutando la correlazione tra i dati raccolti manualmente e quelli ottenuti automaticamente, identificando eventuali discrepanze e le loro cause. Viene esaminato l'andamento stagionale della vegetazione e vengono discusse le difficoltà legate alla gestione e alla raccolta dati, come la crescita delle piante e la potatura verde.

Nel vigneto sperimentale si sono identificate diverse parcelle in ognuna delle quali è stata installata una WCAM e sono stati eseguiti periodici rilievi manuali utilizzando due metodi diversi di stima del numero di foglie e dell'area fogliare, adottati per l'applicazione pratica in diversi momenti della stagione.

I dati manuali sono stati confrontati con quelli forniti dalla WCAM2, evidenziando un'ottima attendibilità della stima fintanto che non sono stati eseguiti interventi di gestione in verde, quali il palizzamento dei germogli che ha alterato il posizionamento di questi nello spazio.

ABSTRACT

This thesis analyzes and compares different methodologies for measuring grapevegetation, using both manual approaches and automated tools such as the WCAM2 stereo camera developed by CET Electronics. WCAM 2 is an advanced technology that acquires 3D images from the vine canopy, allowing to monitor daily growth increments and estimate leaf area. The objective is to evaluate the system in the field, by comparing the data collected manually and those obtained automatically, identifying any discrepancies and their possible causes. The seasonal pattern of vegetation is examined, and the difficulties related to canopy management and data collection, such as plant growth and green pruning, are discussed.

In the experimental vineyard, several plots were identified in each of which a WCAM was installed and periodic manual surveys were carried out using two different methods of estimating the number of leaves and leaf area, adopted for practical application at different dates of the season.

The manual data were compared with those provided by WCAM2, highlighting an excellent reliability of the estimate as long as green pruning practices were carried out, such as staking the shoots which altered their positioning in space.

1. INTRODUZIONE

1.1 Proximal sensing e possibili applicazioni

Con l'avvento dell'agricoltura di precisione, è diventato fondamentale migliorare i sistemi di raccolta dati per monitorare lo sviluppo delle colture, le condizioni ambientali e le lavorazioni. Questo monitoraggio permette di ottimizzare la gestione delle colture, migliorando efficienza e sostenibilità e, non ultimo, consente di acquisire informazioni ad elevata frequenza in modo non distruttivo, ossia senza perturbare l'oggetto che si intende misurare. Esistono due principali metodi per il rilevamento dei dati: il telerilevamento (*remote sensing*) e il rilevamento prossimale (*proximal sensing*). La principale differenza tra i due è la distanza tra il sensore e l'oggetto monitorato. Il telerilevamento utilizza sensori su droni, aerei o satelliti, mentre il *proximal sensing* impiega sensori posti vicino all'oggetto, spesso direttamente sulle macchine agricole oppure installati in campo su supporti fissi o mobili in prossimità, per l'appunto, dell'oggetto. Entrambi i sistemi usano sensori passivi, che misurano la radiazione elettromagnetica emessa e/o riflessa dall'oggetto. Il loro impiego principale in agricoltura riguarda il monitoraggio delle chiome vegetali e del suolo. Nel telerilevamento, si utilizzano sensori multispettrali e iperspettrali per analizzare come la radiazione solare interagisce con le piante, (Rossi, V et al., 2014).

Negli ultimi anni il rapido sviluppo della tecnologia ha portato l'utilizzo di APR, aeromobili a pilotaggio remoto (altresì chiamati droni), disponibili anche nella grande distribuzione con l'ausilio di fotocamere ad alta risoluzione e termocamere per il monitoraggio dello stato fisiologico e nutrizionale delle colture (Ferro M. V e Catania. P 2023). Strumenti attivi, invece, come il LIDAR e il RADAR sono tipicamente usati a bordo di un mezzo e, attraverso l'analisi dell'interazione tra un segnale 'noto' emesso dallo strumento stesso e l'oggetto, permettono di creare ricostruzioni tridimensionali anche molto dettagliate delle chiome.

Nel rilievo prossimale i sensori sono utilizzati tipicamente ad una distanza inferiore ai 2-3 metri dall'oggetto e possono essere multi- o iper-spettrali, fluorimetri o semplici sensori visivi RGB e stereo camere.

Sia nel caso del telerilevamento che del rilevamento prossimale, risulta fondamentale raccogliere delle “misurazioni a terra” (*ground truth*), come area fogliare, biomassa sopra-suolo, parametri fisiologici e nutrizionali della pianta ecc..., per sviluppare delle relazioni con i parametri telerilevati (riflettanza, indici spettrali, volume della chioma, etc). Una volta sviluppate queste relazioni (modelli predittivi) sarà possibile utilizzarle per spazializzare i parametri di campo e costruire mappe di prescrizione utili alla gestione del vigneto (Drissi, R et al., 2009).

1.2 Applicazioni

1.2.1 Analisi d'immagine in ambito viticolo

L'analisi di immagine è un processo tecnologico che utilizza immagini acquisite da sensori di varia natura, per estrarre informazioni utili alla valutazione dello stato delle viti e del vigneto. Queste immagini possono provenire da sensori quali fotocamere RGB (Red Green Blue), telecamere o sensori multispettrali, iperspettrali, termici (Hamlyn et al., 2010), poi elaborate tramite algoritmi più o meno automatici per fornire un dato quantitativo come il vigore, il LAI, indici di stress ecc.

Nel caso dei sensori di immagine sulla pianta, i dati raccolti da questi strumenti vengono elaborati con modelli matematici e algoritmi di *machine learning*, ad esempio per calcolare la superficie fogliare e prevedere la crescita delle piante. Software specifici permettono la segmentazione e la classificazione delle foglie e dei grappoli, fornendo una visione dettagliata della chioma, (Castagnoli, A e Dosso, P. 2001).

1.2.2 Sistemi di Supporto Decisionale (DSS)

Un DSS è un sistema che integra dati raccolti da sensori in campo, stazioni meteorologiche e attraverso dei modelli matematici (ad es. modelli previsionali di malattie, come la peronospora della vite) aiuta il produttore suggerendo soglie di intervento, finestre di trattamento o fornendo le condizioni della coltura permettendo di adottare decisioni più accuratamente.

Alcuni DSS più innovativi possono includere anche sensori in grado di ricostruire automaticamente e regolarmente (scala giornaliera) lo sviluppo fogliare (ad es. stereocamere) o sensori multispettrali, che rilevano piccole variazioni dello spettro di riflettanza della chioma, in diverse bande spettrali invisibili all'occhio umano, in grado di determinare con buona attendibilità lo stato fisiologico delle piante identificando condizioni di stress idrico, carenze nutrizionali. Le indicazioni sullo sviluppo vegetativo nei DSS sono utili per modellare determinate malattie (es. rischio di infezione per peronospora maggiore dei tessuti giovani).

Un DSS che integra l'analisi delle immagini su ampia scala consente inoltre ai viticoltori di mappare la vigoria del vigneto, identificando le aree con piante più deboli o più vigorose, ottimizzando così la gestione complessiva dell'apezzamento. (Skelton, 2007).

1.2.3 Difesa fitosanitaria

L'uso di tecnologie avanzate come i DSS e dispositivi automatizzati di ricostruzione della chioma può offrire grandi opportunità per ottimizzare la difesa fitosanitaria. Questi strumenti consentono una gestione più precisa del vigneto, riducendo l'impiego di risorse e pesticidi e limitando il rischio di danni alle colture. In particolare, il DSS, integrato con l'analisi dello sviluppo vegetativo, sfrutta le immagini multispettrali e RGB per monitorare in modo continuo e accurato la chioma, la densità fogliare e il vigore delle viti. Ciò permette di individuare in anticipo stress idrici, carenze nutrizionali o malattie, e di adattare i dosaggi dei fitosanitari in funzione della chioma e della vegetazione da trattare.

Con l'analisi dei dati raccolti, possono essere forniti modelli di diluizione dei fitosanitari basati sull'accrescimento della chioma, permettendo trattamenti più efficaci e mirati (es. modello PVsensing).

1.2.4 Stima biomassa above ground

La stima della biomassa (above-ground) delle viti riguarda la valutazione del materiale vegetale che cresce sopra il suolo, incluse foglie, rami, tronchi e grappoli. Questo parametro è cruciale per diverse ragioni, fornendo informazioni essenziali per gestire meglio il vigneto, monitorare la salute delle viti, pianificare la vendemmia e gestire le malattie, contribuendo alla sostenibilità e all'efficienza delle pratiche vitivinicole (Meggio e Pitacco 2019).

2. SCOPO DEL LAVORO

L'obiettivo di questa tesi è analizzare e confrontare diverse metodologie di misurazione delle piante di vite, utilizzando sia approcci manuali che strumenti automatizzati, come la stereo camera WCAM2. In particolare, il lavoro si concentra sull'analisi della correlazione tra i dati raccolti manualmente e quelli ottenuti automaticamente, valutando se vi siano corrispondenze significative o se i risultati divergono. In caso di discrepanze, verranno individuati i momenti in cui queste si manifestano e le relative cause.

Il documento esaminerà in dettaglio le tecniche di conta e misurazione delle dimensioni fogliari delle piante, con particolare attenzione all'andamento stagionale e alle problematiche sorte durante la stagione vegetativa. Saranno analizzate le difficoltà legate alla gestione delle piante e alla raccolta dei dati manuali, come l'espansione della chioma e gli interventi di cimatura del verde.

Verrà descritta la metodica di analisi dei dati raccolti manualmente e il confronto con quelli ottenuti tramite la WCAM2, per determinare l'efficacia del sistema di misurazione tridimensionale e le sue capacità adattive, stabilendo in che misura i risultati automatizzati possano essere utilizzati per migliorare o integrare le pratiche tradizionali di monitoraggio.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Sensoristica applicata

Per ottenere una comparazione con i dati di superficie fogliare raccolti manualmente, sono stati utilizzati principalmente due sensori: la stereocamera WCAM2 e il Greenseeker. La presente tesi si focalizza sui soli risultati ottenuti tramite il solo dispositivo WCAM2, mentre il Greenseeker, utilizzato come strumento complementare, sarà oggetto di valutazioni future.

Stereo Camera WCAM2

Il sistema WCAM2 rappresenta un'avanzata tecnologia basata sulla visione artificiale per il monitoraggio della chioma delle piante, sviluppata dall'azienda CET Electronics. Attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di immagini tridimensionali, WCAM2 consente di ottenere una rappresentazione dettagliata della chioma della vite, facilitando la valutazione dell'accrescimento giornaliero, tramite misurazione automatica del volume della chioma e la stima dell'area vegetativa totale. Questa tecnologia aiuta a monitorare la crescita delle piante, ottimizzando le pratiche di potatura verde e adattando le strategie di gestione fitosanitaria. Il dato di accrescimento giornaliero della chioma fornito da WCAM2, infatti, è usato anche come input in modelli previsionali delle malattie sviluppati dall'azienda (come PVsensing, per la peronospora della vite), nonché per modellare il residuo di prodotti fitosanitari sulle piante.



Figura 1. Stereo camera WCAM2 installata lungo un palo del vigneto

Il sistema WCAM2 è una stereo camera composta da 2 sensori RGB distanziati fra loro. La visione stereo si basa sull'acquisizione di immagini da due punti di vista leggermente differenti della scena, permettendo di percepire la profondità e quindi la ricostruzione tridimensionale della stessa. Questo strumento è progettato per acquisire immagini da una posizione permanente di fronte alle piante inquadrare e può essere usato da solo o in abbinamento a sensori climatici collegati al dispositivo, arrivando a costituire una vera e propria stazione meteo. Il sistema è dotato di un meccanismo hardware brevettato per la protezione delle ottiche, che evita l'inquinamento delle stesse da sporcizia e trattamenti fitosanitari a cui il dispositivo è inevitabilmente esposto, garantendo una costante qualità delle immagini acquisite.

L'acquisizione delle immagini può essere programmata da remoto. Normalmente vengono scattate due volte al giorno, una di giorno attorno alle 15.00 e una di notte attorno alle 23:00.

Il processo di acquisizione ed elaborazione delle immagini è dettagliato come segue:

1. Acquisizione delle Immagini: Le immagini catturate dalla stereo camera vengono trasferite via internet (tramite SIM dati integrata nel dispositivo) in uno spazio cloud e da qui trasferite ai server dell'azienda, dove vengono processate automaticamente da un software di analisi delle immagini, consentendo di ottenere dati di misura della chioma, come di seguito dettagliato.

Le immagini nel cloud sono visualizzate dall'utente accedendo al portale web "Aurora" di CET Electronics.



Figura 2. Particolare di una parcella fotografata da WCAM2 in notturna

2. Ricostruzione 3D: Utilizzando una combinazione dell'immagine di destra e di sinistra della stereo camera, il software crea una rappresentazione tridimensionale della scena generando una "mappa di profondità" in cui a ciascun pixel viene associata una distanza dalla telecamera o da un altro riferimento spaziale: nell'applicazione specifica, la distanza è espressa rispetto al centro del filare, individuato dalla posizione del palo normalmente inquadrato da WCAM. La mappa di profondità (figura 3) viene rappresentata come un'immagine con scala di colori rappresentativi della distanza di ciascun pixel dal centro filare, scartando lo sfondo inquadrato a partire da un metro oltre al palo. L'approccio di stereo visione permette di calcolare una misura dell'area rappresentata da ciascun pixel in funzione della distanza a cui è associato.

Grazie a questo meccanismo, il sistema è in grado di ricostruire una stessa superficie fogliare osservata a distanze diverse, con una certa approssimazione.

La visualizzazione tridimensionale consente inoltre di quantificare il volume occupato dalla chioma.

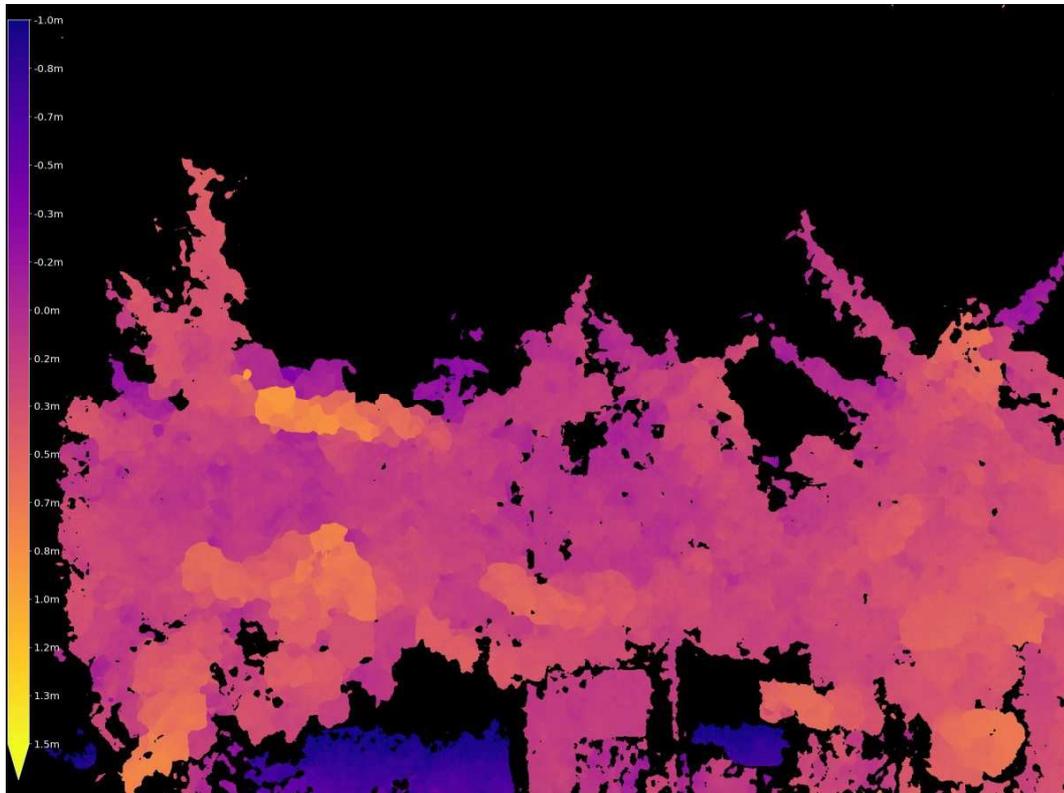


Figura 3. Mappa di profondità delle piante inquadrata ricostruita dalla stereo camera. La scala di colori indica la distanza in metri dal centro del filare osservato verso la WCAM

3. Segmentazione della chioma: il sistema di analisi delle immagini sfrutta tecniche di IA (Intelligenza Artificiale) per il riconoscimento automatico della chioma delle piante e di altri dettagli, come si può osservare in figura 4, sfruttando un precedente addestramento di una rete neurale su altre immagini. Nella scena inquadrata vengono riconosciute automaticamente le zone di interesse attraverso delle maschere di segmentazione, ossia l'individuazione delle aree dettagliate, pixel per pixel, che rappresentano un determinato elemento, associandovi un colore.

Vengono distinti in questo modo i seguenti elementi:

- vegetazione delle piante (maschera verde);
- i fiori/frutti quando visibili (maschera viola);
- eventuali foglie rinsecchite (maschera arancione);
- i pali di sostegno della vegetazione (maschera grigia), utilizzati come riferimento per stimare la distanza dal centro filare;
- lo sfondo costituito da tutti gli altri possibili elementi - cielo, erba, terreno, case, alberi, etc.



Figura 4. Segmentazione della chioma da parte di WCAM

Questa segmentazione viene pubblicata sotto forma di immagine contenente le maschere di diversi colori sovrapposte in trasparenza alla foto originale (figura 4). Anche questa immagine viene caricata nel cloud e pubblicata su Aurora web.

La segmentazione della chioma sulle immagini scattate in notturna (con sistema di flash visibile in figura 2) è considerata più affidabile rispetto a quella sulle immagini diurne, grazie alla standardizzazione della luce data dal sistema di flash, che ha permesso un addestramento del sistema più robusto. Per questo motivo per lo studio oggetto di questa tesi verranno considerate le elaborazioni delle sole foto notturne.

4. Calcolo della superficie fogliare proiettata: l'insieme di pixel della maschera di segmentazione verde, che individua la vegetazione, viene utilizzato per il calcolo della superficie fogliare proiettata sul piano di centro filare, che viene poi normalizzata dividendo per la lunghezza della porzione di filare inquadrata (ricavata sempre da stereo visione), fornendo una misura di superficie fogliare (proiettata) espressa in metri quadri per metro (di filare). Tale misura, elaborata per ogni immagine, viene pubblicata come dato fruibile fra le variabili che compongono i grafici visualizzabili in Aurora web.

5. Volume Chioma: La misura di volume viene calcolata dalla mappa di profondità selezionando i soli pixel inclusi nella maschera di vegetazione, integrando la distanza dal centro filare moltiplicata per l'area associata a ciascun pixel. Ogni germoglio che emerge dalla palizzata e si avvicina alla stereo camera contribuisce alla generazione del volume uscente della chioma. Questo volume viene misurato e ipotizzato anche sul lato opposto, fornendo una stima complessiva del volume della chioma.

Questo calcolo di volume tiene quindi conto della forma dettagliata della chioma, delle sue sporgenze pixel per pixel, in una rappresentazione molto più realistica rispetto all'indice TRV, in cui la chioma viene solitamente approssimata alla forma di parallelepipedo. Naturalmente questa misura dipende dalla conformazione geometrica della chioma, variabile col tipo di allevamento e con operazioni di gestione del verde come la palizzata. Anche la misura viene normalizzata per la porzione di filare inquadrato ed espressa in metri cubi per metro (di filare), pubblicata come dato fruibile fra le variabili che compongono i grafici visualizzabili in Aurora web.

6. Stima dell'Area Vegetativa Totale: L'area vegetativa totale è la superficie fogliare effettiva delle piante, a cui contribuiscono tutte le foglie che la compongono distribuite all'interno del volume. Questo dato non è misurabile in maniera diretta dalla stereo camera, in quanto non tutte le foglie sono visibili, essendo in parte occluse da una disposizione a strati. Tale dato viene quindi stimato attraverso una combinazione dei dati di **volume e superficie proiettata** estratti precedentemente, tentando in sostanza di ricostruire la stratificazione fogliare all'interno del volume osservato. L'algoritmo che effettua questa operazione è proprietario dell'azienda CET ed è stato realizzato da taratura su precedenti misurazioni manuali della superficie fogliare, effettuate dall'azienda su alcune piante nel primo mese di sviluppo vegetativo. È noto che questo algoritmo, avendo una dipendenza esplicita dal volume, che varia con la geometria della chioma, può non essere performante in condizioni molto diverse da quelle su cui è stato tarato, in particolare nella fase di maggiore accrescimento fogliare e quella post-palizzata, che è un intervento che cambia significativamente il volume occupato dalla chioma (ma non l'area vegetativa totale).

3.2 Sito di studio

3.2.1 Vigneto

Il sito di analisi, oggetto dei rilevamenti dell'accrescimento vegetativo della vite, è situato su un'area di 0,5141 ettari a Zenson di Piave, presso l'azienda agricola Terre Grosse, in conduzione biologica, sita in via E. Fermi 4. L'azienda è una realtà vitivinicola di circa otto ha a conduzione familiare che, oltre alla produzione di uva e vino, è dedicata ad attività di sperimentazione e raccolta dati in campo in collaborazione con l'azienda CET Electronics s.n.c., specializzata in sensoristica e modelli per il vigneto.

Il vigneto oggetto di studio è esteso su un terreno limoso-argilloso, con varietà Glera, impianto del 2018 con sesto 3 x 1.33 m.

Forma di allevamento:

Il vigneto preso in esame è stato impiantato seguendo il sistema di allevamento a Sylvoz, una tecnica che prevede una potatura lunga e una forma di allevamento con un cordone permanente orizzontale, posto a una altezza di 1,4-1,6 metri da terra. Questo sistema consente una buona esposizione alla luce solare e facilita la gestione dei tralci e dei grappoli. I tralci fruttiferi sono disposti in direzione discendente, mentre ogni tralcio è accompagnato da uno sperone. Il sistema Sylvoz favorisce una vegetazione equilibrata, con una parte libera e una parte obbligata, ottimizzando così la qualità e la quantità della produzione. Le barbatelle sono state piantate con un sesto d'impianto di 1,33 metri x 3 metri. Questo sesto d'impianto risulta in una densità di circa 2506 piante per ettaro, il che permette una gestione meccanizzabile delle viti e garantisce una buona ventilazione ed esposizione al sole, fattori cruciali per la salute delle piante e la qualità delle uve.

Varietà Glera:

Il vitigno Glera è una varietà a bacca bianca, con una lunga storia di coltivazione in Italia. Originario del Veneto e del Friuli-Venezia Giulia, il Glera è famoso principalmente per la produzione del celebre vino Prosecco. Il Glera è un vitigno particolarmente vigoroso e, nonostante le sue eccellenti qualità, è sensibile alle gelate primaverili, un rischio significativo in alcune regioni viticole. La sua epoca di produzione è tardiva, ma la produttività è elevata e costante grazie alla fertilità delle gemme e alla capacità di adattamento della pianta.

I grappoli sono mediamente grandi, da spargoli a semi-compatti, e la forma di allevamento e la gestione della potatura mirano a mantenere una buona qualità del frutto e una resa ottimale. Il terreno ideale per la sua coltivazione è collinare, ben drenato e non siccitoso, ma è molto diffuso anche in pianura. La gestione della potatura è cruciale e predilige una forma di allevamento che garantisca una chioma ben strutturata e ben esposta alla luce.

Produce uva di colore bianco e di forma sferoidale, i grappoli sono lunghi e grandi, con acini di colore giallo-dorato. Questa varietà è classificata come semi-aromatica, il che significa che il vino ottenuto ha profumi e sentori che riflettono il frutto d'origine. La foglia della vite è di dimensioni medio-grandi, di forma pentagonale e pentalobata. I vini prodotti con uve Glera sono generalmente aromatici, gradevoli e fruttati. Nell'ambito della sperimentazione, è stato scelto il vitigno Glera per il suo predominante utilizzo nella zona di studio. Questo vitigno è ampiamente coltivato grazie alla sua eccellente produttività di uva. La scelta di questo vitigno per lo studio in oggetto è legata alla sua grande vigoria che, rispetto ad altre varietà meno vigorose, rende maggiormente interessante l'applicazione di sistemi di misurazione della chioma come strumenti che possono aiutare nella gestione della stessa.



Figura 5. Grappolo di varietà Glera.

3.2.2 Piano sperimentale

Nel vigneto si sono individuati quattro filari, numerati da 1 a 4, dedicati al monitoraggio e alla raccolta dei dati sullo sviluppo vegetativo. Su ciascun filare sono state identificate tre parcelle, contrassegnate da sigle che riportano come primo numero il filare di riferimento, come secondo numero la ripetizione della parcella: 1.1, 1.2, 1.3; 2.1, 2.2, 2.3; 3.1, 3.2, 3.3; 4.1, 4.2, 4.3, per un totale di 12

parcelle. La figura seguente identifica il campo e la distribuzione delle parcelle individuate sui quattro filari:



Figura 6. Raffigura i 4 filari e la collocazione delle parcelle oggetto delle misurazioni nell'appezzamento

In ogni parcella è stato installato un dispositivo WCAM2 nel filare di fronte (come indicato nell'immagine n. 7) per inquadrare una porzione di 3-4 piante nella parcella: fra queste, le sole due piante centrali, inquadrare in maniera completa dal dispositivo, sono state oggetto di rilievi manuali di sviluppo vegetativo.



Figura 7. Suddivisione in parcelle all'interno dell'appezzamento

Di seguito, un'immagine di esempio delle acquisizioni di WCAM2 in una parcella.



Figura 8. Esempio di immagine di una parcella acquisita da WCAM

3.3 Misure biometriche e metodologie di stima

Le tecniche di raccolta manuale dei dati di vegetazione non sono state uniformi, ma sono state adattate alle diverse condizioni di sviluppo vegetativo e di interventi di gestione del verde durante la stagione, nonché alle capacità operative in campo, che hanno visto l'impiego di due studenti tesisti (io ed un collega) e di altri due operatori tecnici messi a disposizione da CET Electronics ad ogni rilievo come supporto al lavoro.

La cimatura, in particolare, ha comportato un cambiamento radicale nell'approccio di rilevamento, poiché ha alterato la struttura geometrica della pianta e lo sviluppo dei tralci monitorati.

Inizialmente si è cercato di distribuire i rilievi su tutte le 12 parcelle. Tuttavia, l'ammontare del lavoro per i rilievi manuali si è presto rivelato troppo elevato per garantire di seguire tutte le parcelle con una buona periodicità, specie con

l'avanzare della stagione e l'incremento del volume della chioma e si è resa quindi necessaria una riorganizzazione del lavoro, che nella seconda parte della stagione, all'incirca in corrispondenza della cimatura, ha previsto una semplificazione dei metodi di rilievo e una riduzione del numero di parcelle monitorate, passando da tre a due per filare.

In linea di principio l'area fogliare dovrebbe essere calcolata sempre attraverso le due fasi:

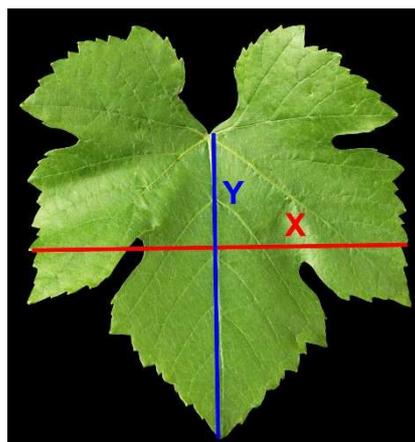
- conteggio delle foglie totali di una pianta;
- misura dell'area media di una singola foglia, da utilizzare come fattore di moltiplicazione per il numero totale di foglie;

Non essendo il conteggio esatto e la misurazione diretta dell'area di pratica esecuzione con metodi non distruttivi, si considerano degli approcci di stima.

Si sono identificati, a tal proposito, due metodi di rilievo, descritti nei paragrafi seguenti. Per ogni metodo sono stati predisposti degli specifici modelli Excel per facilitare la raccolta dei dati in campo, e per archiviare poi i dati digitalmente in funzione della loro successiva elaborazione.

I metodi si distinguono in particolare per la conta delle foglie. Per quanto riguarda l'area della singola foglia essa viene stimata in modo non distruttivo misurando, con un righello, gli assi "X" e "Y" che hanno una correlazione nota con l'area fogliare, tipica di ogni varietà di vite:

- "Y" corrisponde alla distanza verticale dal seno del picciolo all'apice della foglia, lungo la venatura centrale della foglia;
- "X" corrisponde alla massima larghezza orizzontale della foglia tra gli apici di due lobi speculari, perpendicolari a 'Y' (non c'è una corrispondenza esatta con punti specifici delle nervature fogliari).



È possibile scegliere altre “misure” caratteristiche della foglia, tuttavia non esistono standard specifici in letteratura e si è scelto pertanto di lavorare secondo le metodologie indicate dall’azienda, CET Electronics. Studi precedenti su queste misure rivelano che “Y” da sola non è un buon indicatore dell'area fogliare, mentre lo sono “X” o le combinazioni “X-Y”.

3.3.1 METODO 1

Applicato dal 15/05 al 15/06 con cadenza all’incirca settimanale e distribuzione dei rilievi sulle 12 parcelle. Nell’arco di un mese per ogni parcella si sono potuti collezionare 2 o 3 rilievi.

Il primo metodo di rilievo si è basato sulla suddivisione dei germogli delle piante in tre categorie in base alla vigoria: short, medium, vigorous.

I rilievi hanno previsto i seguenti conteggi/misure su ogni pianta:

- misura del TRV (*Tree Row Volume* - ovvero la quantità di volume approssimata al parallelepipedo occupato dalla chioma), rilevato in termini di: altezza massima della parete fogliare, dal punto più alto a quello più basso; spessore massimo della chioma, dal centro del filare fino al punto della chioma più esposto verso la stereo-camera;
- conta di tutti i germogli delle due piante e loro classificazione in base alla categoria di vigoria.

Per ogni categoria di vigoria all’inizio sono stati cartellinati tre germogli rappresentativi su ogni pianta (per un totale di 9 tralci per pianta, 18 per parcella), su cui eseguire periodicamente le seguenti ulteriori misure biometriche:

- la lunghezza dalla base all’apice;
- il numero di foglie principali e il numero delle foglie secondarie (ovvero le femminelle);

- per ciascuna foglia principale, misura della larghezza (X) e della lunghezza (Y). Quando possibile, queste misure di singola foglia sono state prese su tutti i germogli campione, ma ben presto si è ridotta la misura ad un solo germoglio per categoria per ogni pianta (quindi 6 germogli in totale per parcella).

3.3.2 *METODO 2*

Applicato dal 17/06 al 28/07 con cadenza settimanale su una selezione di parcelle (P1.1, P1.3, P2.1, P2.3, P3.1, P3.3, P4.1, P4.3), collezionando dai 5 ai 9 rilievi per parcella nell'arco di questo periodo.

In questo metodo si è abbandonata la classificazione dei germogli per vigoria, resa nel tempo sempre più difficile dalla crescita della vegetazione e consapevoli che sarebbe stata ben presto compromessa dalla cimatura, (realizzata di lì a pochi giorni, il 23/06 e poi il 26/06).

Il metodo 2 si è basato su una iniziale conta totale delle foglie (senza suddivisione per germogli), per poi procedere con la conta delle sole foglie nuove, da un rilievo al successivo. Ci si è però focalizzati su una distinzione delle foglie fra principali e secondarie (femminelle), dal momento che in fase avanzata della stagione e in seguito alla cimatura ci sia aspettava differenze considerevoli nella numerosità e nelle dinamiche di accrescimento per queste due categorie.

La cimatura rimuove infatti l'apice vegetativo, stimolando la produzione e lo sviluppo di foglie secondarie rispetto a quelle principali.

A livello pratico per la conta di tutte le foglie è stata contrassegnata (marker con pennarello indelebile) ogni foglia della pianta al primo rilievo, consentendoci così di tenere traccia delle foglie già contate, evitando il possibile errore di contarle più volte. Lo scopo di questa tecnica era anche quello di semplificare i rilievi successivi, contando (e contrassegnando) le sole foglie nuove emerse al rilievo successivo.

I rilievi hanno previsto quindi i seguenti conteggi/misure su ogni pianta:

- misura di TRV (come in METODO 1);
- conta totale delle foglie (in un primo rilievo per parcella), distinte fra principali e secondarie;
- conta delle sole foglie NUOVE (nei rilievi successivi), distinte fra principali e secondarie.

Inoltre, è stato scelto uno dei tre germogli precedentemente cartellinati (di categoria vigoroso, in quanto riportava la maggiore varietà di foglie, fra principali e secondarie), su cui eseguire le ulteriori misure biometriche su tutte le foglie presenti:

- misura della larghezza (X), distinguendo fra foglie vecchie e foglie nuove e, rispettivamente, fra principali e secondarie.

La gestione della cimatura, avvenuta il 26/06 (con un evento di pre-cimatura manuale il 23/06 in corrispondenza della palizzata) ha necessitato di una gestione particolare al fine di non perdere traccia dell'evoluzione della chioma.

Sono state contate tutte le foglie cimate sulle due piante di parcella, distinguendo sempre tra foglie VECCHIE, riconoscibili dal segno effettuato al rilievo precedente, e foglie NUOVE.

Sul cimato è stata misurata anche la larghezza (X) su un campione rappresentativo di foglie, sempre distinte fra vecchie/nuove, principali/secondarie. La misura del cimato e quella della pianta post-cimatura hanno permesso di ricostruire l'evoluzione della chioma, contata in toto al rilievo precedente, tenendo traccia della contestuale emersione di nuove foglie e del calo dovuto alla vegetazione cimata nel suo complesso.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati raccolti durante la stagione mediante i due metodi di rilievo presentati nella sezione precedente.

4.1 Valutazione dei metodi di rilievo

4.1.1 METODO 1

Il primo metodo di rilievo, nonostante sia risultato molto impegnativo dal punto di vista pratico, offre il principale vantaggio di semplificare la conta di tutte le foglie, stimandola attraverso una conta dei tralci. Il metodo è tuttavia affetto da alcuni limiti e incertezze, di seguito riassunte:

- scelta delle tre categorie di vigoria: si tratta di una rappresentazione approssimativa della reale variabilità dei germogli, nel tentativo di ponderare correttamente l'area fogliare, mentre nella pratica la struttura della pianta è molto più complessa;
- possibili errori di valutazione: le situazioni intermedie (quando un germoglio non rientra chiaramente in una categoria o nell'altra), possono essere giudicate in modo diverso a seconda della “sensibilità” dell'operatore coinvolto;
- i tralci produttivi con grappolo d'uva (tipicamente lungo i rami piegati ad arco nel sistema di allevamento Sylvoz) ricadono normalmente nella categoria “short”, tuttavia, a causa dello sviluppo del grappolo, smettono presto di crescere e ad un certo punto si differenziano significativamente dagli altri tralci della stessa categoria iniziale. Andrebbe fatta una categoria a parte per valutare questi germogli;
- il metodo ignora il contributo delle foglie secondarie (femminelle), che è effettivamente trascurabile in una prima fase della stagione, ma assume un peso man mano maggiore.

L'adozione di questo metodo è stata possibile solo nelle prime fasi di sviluppo per l'elevata probabilità di commettere errori nel rilievo una volta che la parete vegetativa ha raggiunto un pieno sviluppo.

Il metodo considera una valutazione più accurata, rispetto al secondo, della superficie di singola foglia, combinando la misura di X e Y su tutte le foglie di più tralci campione. Questa parte è risultata però particolarmente onerosa a livello pratico e per tale motivo è stata semplificata nel metodo successivo.

4.1.2 *METODO 2*

Il secondo metodo ha visto una complicazione nel primo rilievo in cui sono state contate tutte le foglie di ogni pianta per parcella e successivamente sono state di volta in volta contrassegnate le sole nuove foglie emesse (principali e secondarie), consentendo di accelerare progressivamente i tempi di rilevamento. La stima del numero di foglie può considerarsi migliore del metodo precedente, e il contributo delle femminelle, man mano sempre più significativo, viene trattato in maniera accurata. Tuttavia, anche questo metodo presenta dei limiti e delle approssimazioni, di seguito elencate:

- difficoltà del rilievo iniziale: comporta il rischio di non contare tutte le foglie o di contarle più volte. L'uso di un marker con pennarello indelebile ha semplificato quest'operazione iniziale e soprattutto ha agevolato i rilievi successivi delle foglie nuove;
- errori per caduta delle foglie: poiché le foglie vecchie non vengono più contate, le eventuali foglie cadute fra queste non vengono monitorate. Nella parte avanzata della stagione e in caso di grave diffusione di malattie o di stress idrico/nutrizionale, parte delle foglie potrebbe cadere e questo effetto non verrebbe conteggiato. Più grave è il problema quando, tra un rilevamento e l'altro, cadono foglie nuove formatesi fra un rilievo e l'altro, che non possono essere rilevate al rilevamento successivo: questo può accadere alle nuove foglie secondarie che si formano nella parte finale della stagione che vengono velocemente compromesse e cadono in presenza di elevati pressioni di malattia come la peronospora della vite;
- errori per sbiadimento del pennarello: in alcuni casi è accaduto che i segni del pennarello fossero sbiaditi sulle foglie, comportando che alcune foglie vecchie venissero contate come foglie nuove al rilevamento successive.

Il rilevamento della sola larghezza fogliare (X) di un unico tralcio vigoroso per ciascuna delle due piante della parcella ha semplificato notevolmente il processo anche se inevitabilmente l'accuratezza di stima si è ridotta, soprattutto per la riduzione del campione a un solo germoglio, che poteva non essere molto rappresentativo della chioma nel suo complesso. InLa scelta di un 'germoglio vigoroso' ha rappresentato un compromesso dettato dalla necessità di riuscire a completare il rilievo. Ad ogni rilievo la scelta del tralcio è stata effettuata in modo casuale.

4.2 Costruzione del dataset di superficie fogliare

Nella seguente sezione presenteremo l'elaborazione dei dati raccolti in campo per ottenere ad ogni rilievo una stima della superficie fogliare totale caratteristica di ogni parcella. Useremo a questo scopo solo alcuni dei dati raccolti nei rilievi, lasciando gli altri (come il TRV e la lunghezza dei germogli) per approfondimenti futuri sulle correlazioni con WCAM.

Per la stima del numero totale di foglie e della superficie fogliare totale mediante i due metodi di indagine si sono mediati i dati ottenuti tra le due piante selezionate in ciascuna parcella. Questo approccio è stato adottato per poter confrontare i dati di area fogliare ottenuti con cadenza giornaliera dalla WCAM, la cui inquadratura copre entrambe le piante monitorate con i rilievi (oltre ad una porzione delle piante a lato), restituendo un valore medio normalizzato per metro di filare.

4.2.1 METODO 1

4.2.1.1 Costruzione del dataset di base

I dati raccolti (fino al 15/06) hanno subito una prima elaborazione mediando le misure sulle due piante per parcella per ogni categoria di germoglio (debole, medio, vigoroso) estraendo le seguenti grandezze caratterizzanti la parcella:

- **numero medio di germogli**: questo parametro viene considerato come caratterizzante della parcella, derivando dalla conta e classificazione per

vigoria di tutti i singoli germogli esistenti. Per la P3.1, P3.2 e P3.3 nel rilievo del 24/05 il dato non è stato rilevato per difficoltà operative (mancanza di personale a supporto o poco tempo a disposizione): in questi casi, si è ipotizzato che il numero di germogli per ogni categoria fosse identico a quello rilevato nella stessa parcella alla data di rilievo più vicina (7 giugno);

- **numero medio di foglie principali per germoglio**: il parametro è stato ricavato da soli tre germogli campione per pianta e verrà poi utilizzato mediando su più parcelle rilevate alla stessa data;
- **area media (A) delle foglie principali per germoglio**: secondo la formula:

$$A = a * X * Y \quad (\text{eq. 1})$$

dove a è un coefficiente fornito dall'azienda e ottenuto in precedenza attraverso una analisi di regressione tra distanze X-Y delle foglie e l'area, misurate digitalmente mediante il software "Image-J" con metodo distruttivo. Questa formula permette di calcolare una superficie espressa in cm² a partire dalle due misure lineari, espresse in cm. Il dato così ricavato dalle foglie di un solo germoglio campione per categoria (inizialmente da tre per categoria) verrà poi utilizzato mediando su più parcelle rilevate alla stessa data.

4.2.1.2 Calcolo del numero totale di foglie per pianta:

Il numero totale di foglie è ottenuto moltiplicando il numero medio di germogli di una data categoria (per parcella), per il corrispondente numero medio di foglie principali per germoglio della data categoria (mediato su più parcelle alla stessa data). Questo calcolo viene replicato per le tre categorie di germogli, sommando i risultati ottenuti. Viene trascurato in questa fase il numero di foglie secondarie (femminelle).

4.2.1.2 Calcolo della superficie fogliare totale per pianta:

La superficie fogliare totale è ottenuta sommando i contributi delle tre categorie di germoglio (debole, medio, vigoroso) considerando per ogni categoria il prodotto dei tre fattori seguenti:

- numero medio di germogli;

- numero medio di foglie principali;
- area media (A) delle foglie principali.

La superficie così ottenuta, rappresentando la media per pianta in cm², viene poi trasformata in m² (moltiplicando per il fattore di conversione: 10^{-4}) e normalizzata dividendo per la distanza di interceppo (1,33 m), risultando così in una misura confrontabile con quella di WCAM, espressa in m²/m.

4.2.2 METODO 2

4.2.2.1 Costruzione del dataset

I dati raccolti per singola pianta hanno subito una prima elaborazione mediando le misure sulle due piante per parcella ed estraendo le seguenti grandezze caratterizzanti la parcella:

a. **numero medio totale di foglie per pianta suddiviso fra:**

- numero medio tot. di foglie principali
- numero medio tot. di foglie secondarie (femminelle)

Questo parametro è stato rilevato il 17/06 (per P3.3 e P4.1), 22/06 (per P1.1, P1.3, P2.1, P2.3) e il 26/06 (per P3.1 e P4.3). Nel caso delle parcelle P3.1 e P4.3 la distinzione fra principali e secondarie non è stata possibile (per motivi di tempo durante i rilievi), pertanto in questa data è stata imputata la stima della dimensione fogliare rilevata nelle altre parcelle;

b. **area media (A) delle foglie**, distinta fra:

- foglie principali
- foglie secondarie

Questo parametro è stato ottenuto dalla misura della sola larghezza (X) di ciascuna foglia che compone un germoglio campione, secondo la formula:

$$A = b * X^2 \quad (\text{eq. 2})$$

dove b è un coefficiente fornito dall'azienda e ottenuto in precedenza per la stessa varietà attraverso un'analisi di regressione. Il dato così ricavato dalle foglie di un solo germoglio campione (vigoroso) per pianta, verrà poi utilizzato mediando su più parcelle rilevate alla stessa data (per fare riferimento ad un campione più rappresentativo).

Nei rilievi successivi:

- a) **Numero delle sole foglie NUOVE rispetto al rilievo precedente**, distinte fra principali/secondarie;
- b) **Area media (A) delle foglie**, distinta fra:
 - foglie vecchie (old), ossia quelle già presenti al rilievo precedente, distinte fra principali/secondarie;
 - foglie nuove (new) rispetto al rilievo precedente, distinte fra principali/secondarie;

Questo parametro viene ottenuto dalla misura della sola larghezza (X) della foglia con l'eq. 2 sulle foglie di un germoglio campione (vigoroso) per pianta, dato che verrà poi sempre utilizzato mediando su più parcelle rilevate alla stessa data.

In occasione della cimatura (avvenuta parzialmente il 23/06 in corrispondenza della palizzata e poi il 26/06 in quantità più considerevole), si è riportato:

- ***n. medio tot. di foglie cimate per pianta***, distinguendo (solo nel caso del 26/06 e solo su 6 parcelle) sempre tra vecchie/nuove e rispettivamente principali/secondarie;
- ***area media (A) delle foglie cimate*** (solo nel caso del 26/06 e solo su 4 parcelle), distinguendo sempre tra vecchie/nuove e rispettivamente principali/secondarie. Questo dato è stato ottenuto dalla misura della sola larghezza (X) (eq. 2) su un campione rappresentativo di foglie. Una media pesata delle foglie cimate misurate nelle 4 parcelle (140 foglie "vecchie" e 38 foglie "nuove" in totale), è stata usata per colmare il dato nelle parcelle P2.3 e P3.3, dove questa misura non era stata presa per motivi di tempo, così come il dato della cimatura parziale del 22/06 per ogni parcella.

4.2.2.2 Calcolo del numero totale di foglie per pianta

Per il calcolo del numero totale di foglie, al rilievo iniziale, in cui si sono contate tutte, si è aggiunto ad ogni rilievo il numero di sole foglie NUOVE. Per le giornate di cimatura della vegetazione, il dato delle foglie relativo al cimato viene sottratto al valore precedente.

4.2.2.3 Calcolo della superficie fogliare totale per pianta

Al primo rilievo della parcella, in cui vi è la conta totale delle foglie, si sommano i contributi delle foglie principali e secondarie, dati dalla moltiplicazione, per ciascuna categoria, dei due fattori:

- numero medio di foglie principali/secondarie;
- area media (A) delle foglie principali/secondarie.

Ai rilievi successivi al primo, la superficie fogliare totale è stata calcolata come somma fra la superficie fogliare totale da rilievo precedente e il **contributo delle sole foglie nuove**, calcolato sempre sommando i contributi delle foglie principali/secondarie dal prodotto dei fattori:

- numero medio di foglie NUOVE principali/secondarie;
- area media (A) delle foglie NUOVE principali/secondarie.

Anche in questo caso, a superficie così ottenuta, rappresentando la media per pianta in cm², viene poi trasformata e normalizzata in m²/m, come descritto nel Metodo 1.

4.3 Confronto tra area fogliare misurata e stimata dalla WCAM

Per ogni parcella è stata raccolta la serie di rilievi automatici di superficie fogliare forniti dalla WCAM e in corrispondenza con le date di rilievo manuale è stato confrontato il valore tra stima (WCAM) e misura di campo (Figura 9). In Figura 9 vengono riportati in grafico gli andamenti dello sviluppo di area fogliare (in m²/m) delle 12 parcelle monitorate.

4.3.1. Fase iniziale (da inizio stagione fino a metà crescita)

All'inizio del periodo, la superficie fogliare è molto ridotta (quasi prossima allo zero), come ci si aspetta all'inizio della stagione vegetativa. Con l'avanzare del tempo, si osserva una graduale e costante crescita della superficie fogliare, che segue una curva crescente.

Durante i primi mesi, la linea verde mostra una crescita esponenziale della superficie fogliare, in linea con lo sviluppo naturale delle piante in primavera e all'inizio dell'estate. Questo andamento è regolare e riflette una fase di crescita accelerata delle piante, dove l'accumulo di biomassa è particolarmente rapido.

4.3.2 Fase di massima crescita (prima della palizzata/cimatura)

Prima dell'intervento di cimatura, la superficie fogliare raggiunge il suo massimo picco, superando circa per la maggior parte delle parcelle i 4 m²/m, indice di una crescita comunque rigogliosa. Durante questa fase, si raggiunge il massimo sviluppo delle foglie prima che le piante siano palizzate e cimate.

La linea verde, che rappresenta la stima automatica dell'area vegetativa totale stimata dalla stereo camera (WCAM2), mostra in tutte le parcelle un picco di crescita particolarmente accentuato seguito poi da una brusca flessione dovuta alla cimatura.

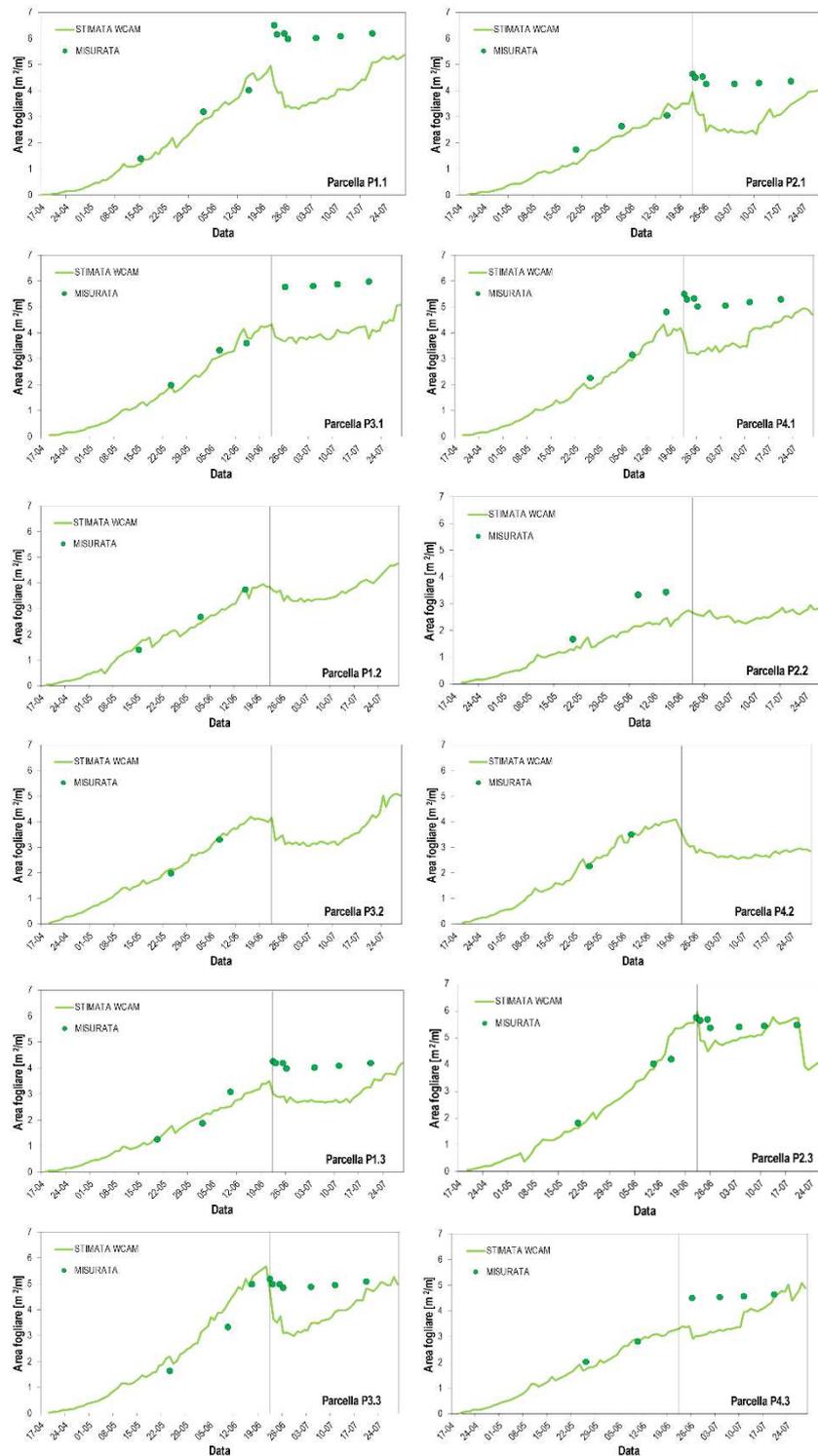


Figura 9. Andamenti della superficie fogliare (m²/m) misurati (simboli verdi) e rilevati automaticamente dalla WCAM (linee verdi) nelle 12 parcelle di indagine. La linea nera rappresenta la data dell'intervento di palizzata e cimatura dei germogli.

4.3.3 Cimatura (ultima decade di giugno - inizio luglio)

Subito dopo la palizzazione e la seguente cimatura, si osserva un calo improvviso dell'area vegetativa totale stimata da WCAM, evidente nella linea verde che scende bruscamente. Questo riflette da una parte l'impatto della rimozione delle foglie durante la cimatura, ma dall'altra anche il significativo calo di volume occupato dalla chioma, dovuto alla palizzazione che, posizionando i germogli verticalmente, crea una parete fogliare più densa e compatta. Quest'ultimo aspetto è responsabile della drastica riduzione stimata da WCAM, a cui tuttavia non corrisponde altrettanta diminuzione della biomassa fogliare nella realtà, come evidente dal confronto con i dati ricavati dalle misure manuali campo. Se la palizzazione non fosse stata effettuata, la superficie fogliare stimata da WCAM avrebbe avuto una riduzione meno significativa per la cimatura e poi avrebbe continuato a crescere anche se via via con incrementi meno significativi per la sovrapposizione con il sottociclo riproduttivo e la comparsa delle femminelle. La differenza tra la linea verde ed i punti tratteggiati in questa fase post-palizzazione/cimatura rappresenta una prossima sfida per lo sviluppo di un nuovo algoritmo, in quanto quello presente nel software della WCAM attualmente non è in grado di gestire un intervento come la palizzazione dei germogli, come evidenziato dallo sfasamento tra la linea verde (WCAM) e i punti di misura tra prima e dopo la palizzazione.

In post-cimatura, la conta esatta delle foglie cimate permette di comprendere l'entità del calo. Sappiamo esattamente quante foglie sono state rimosse, e questa informazione è utile per correlare il calo di superficie fogliare misurato da WCAM con il dato reale delle foglie rimosse.

4.3.4 Ripresa post-cimatura e stabilizzazione (luglio)

Dopo il calo dovuto alla cimatura, la linea verde riprende gradualmente a salire, indicando una ripresa della crescita delle piante data anche dallo sviluppo delle femmine stimolato dall'intervento di cimatura.

Tuttavia, la pendenza della curva non è così ripida come nella fase di crescita iniziale, suggerendo che il recupero delle foglie è più lento rispetto alla fase pre-cimatura, ma che cerca comunque di eguagliare la velocità del periodo iniziale.

Verso la fine del periodo di misurazione, la crescita fogliare sembra stabilizzarsi per quasi tutte le parcelle su un plateau intorno ai 6 m²/m.

Il recupero post-cimatura è quindi evidente, ma non completo, con le piante che riescono a ripristinare completamente la superficie fogliare rimossa durante il periodo considerato, solamente al termine del periodo vegetativo.

4.4 Analisi di regressione

La regressione è una tecnica statistica utilizzata per modellare la relazione tra una o più variabili indipendenti e una variabile dipendente.

L'obiettivo è trovare un modello matematico che descriva come cambia la variabile dipendente in base ai valori delle variabili indipendenti.

Esistono diversi tipi di regressione, ma uno dei più comuni è la regressione lineare, che si basa su una relazione di tipo lineare tra le variabili.

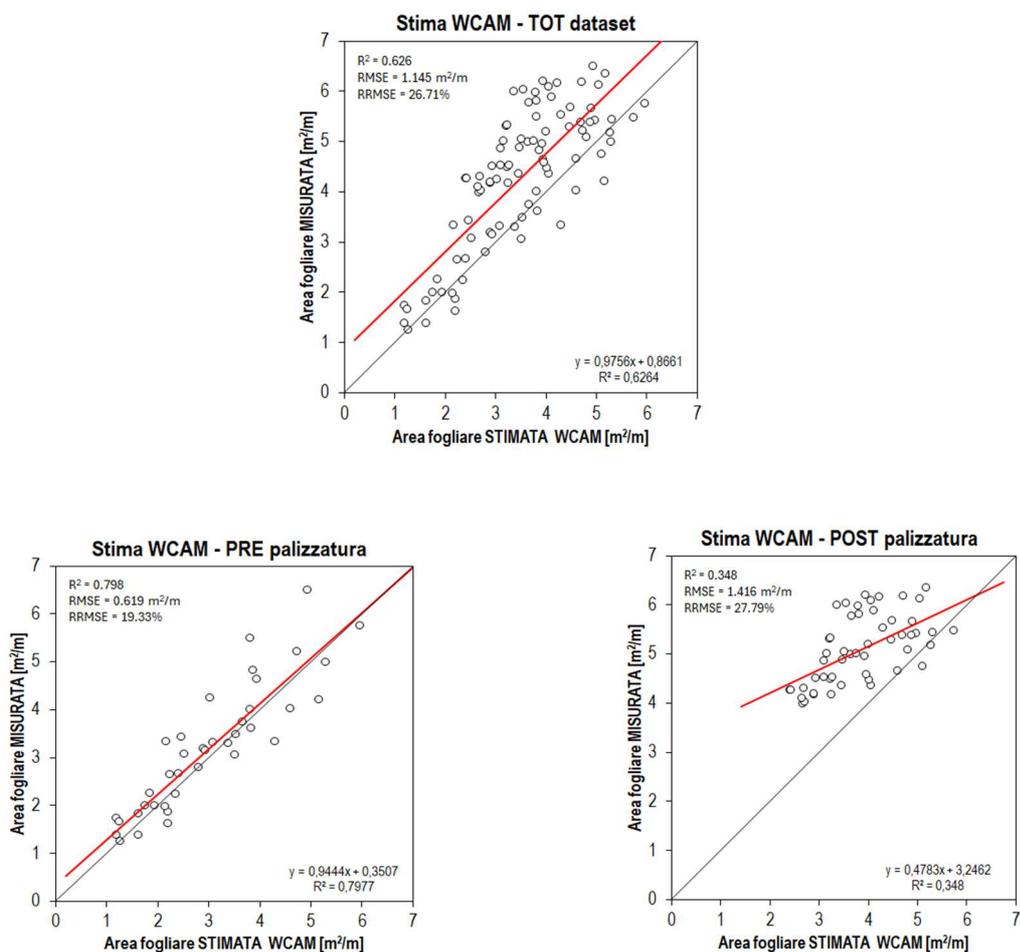


Figura 10. Analisi di regressione tra valori di superficie fogliare misurata e stimata (WCAM) sull'intero dataset (in alto), fino alla data di palizzazione dei germogli (in basso a sx) e successivamente alla data di palizzazione (in basso a destra)

In Figura 10 si può osservare come la relazione tra valori stimati e reali cambi sensibilmente considerando il dataset completo oppure limitando l'analisi alla fase pre-palizzamento e post-palizzamento. Sono state utilizzate le seguenti metriche per accertare la bontà di stima:

- **R^2 o Coefficiente di determinazione:** In statistica, il coefficiente di determinazione, (più comunemente R^2), è una proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato. Esso misura la frazione della varianza della variabile dipendente espressa dalla regressione. Nelle regressioni lineari semplici esso è semplicemente il quadrato del coefficiente di correlazione.
- **RMSE (Root Mean Squared Error)** esprime quanto i miei dati stimati (\hat{Y}) differiscono da quelli osservati (Y) e si calcola come la radice quadrata dell'errore quadratico medio (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (\text{eq.4})$$

- **RRMSE (Relative Root Mean Squared Error)** o coefficiente di variabilità:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{MSE}}{\bar{Y}} \times 100 = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (\text{eq.5})$$

dove \bar{Y} è la media dei dati. Si tratta di un indicatore analogo al coefficiente di variabilità, nel quale la bontà del modello viene espressa relativamente alla media delle previsioni, quindi in percentuale (%)

4.4.1 Variabili

Variabile indipendente (X): Stima WCAM, cioè i dati elaborati automaticamente dalla stereocamera per l'area vegetativa totale.

Variabile dipendente (Y): Superficie fogliare misurata manualmente, che rappresenta i dati reali raccolti con un metodo diretto, associati alla crescita reale delle foglie.

4.4.2 Obiettivo della regressione

L'obiettivo della regressione è stabilire una relazione tra queste due variabili. Se il modello della WCAM è accurato, ci aspettiamo che ci sia una forte correlazione tra le misurazioni automatiche (WCAM) e quelle manuali (valori lungo la linea 1:1) evidenziando elevati valori di R^2 e rispettivamente bassi valori di RMSE e RRMSE.

La regressione ci permette di valutare la relazione tra le stime di WCAM (stereocamera) e i dati manuali di superficie fogliare, consentendoci di verificare l'accuratezza del sistema automatico. I risultati del modello ci daranno indicazioni sul grado di corrispondenza tra i due metodi e su eventuali differenze durante il periodo di crescita delle piante.

Osservando la Figura 10 possiamo vedere come se si considera l'intero dataset, appare evidente un bias (shift) verso l'alto che indica una generale sottostima da parte della WCAM con $R^2 = 0.626$, $RMSE = 1.145 \text{ m}^2/\text{m}$ e $RRMSE = 26.71\%$.

Limitando invece la regressione ai soli dati pre-palizzamento (quando WCAM in Figura 9 aveva evidenziato un'ottima stima della superficie fogliare) il risultato migliora notevolmente con un $R^2 = 0.798$ ed un RMSE che si riduce a $0.619 \text{ m}^2/\text{m}$ ($RRMSE = 19.33\%$).

Di conseguenza se si limita invece l'analisi ai soli dati post-palizzamento si osserva una scarsa capacità di stima con un basso $R^2 = 0.348$ ed elevati $RMSE = 1.416 \text{ m}^2/\text{m}$ e $RRMSE = 27.79\%$.

5. CONCLUSIONI

Il monitoraggio dell'accrescimento vegetativo della vite si rivela importante nell'ambito dell'agricoltura di precisione, particolarmente nel contesto vitivinicolo dove le dinamiche di crescita delle piante sono fortemente influenzate dalle condizioni ambientali e dalle pratiche agronomiche adottate. L'adozione di tecnologie avanzate come sensori e stereocamere può trasformare il modo in cui monitoriamo e gestiamo la crescita vegetativa delle viti, offrendo strumenti di precisione che migliorano significativamente la qualità e l'efficacia della gestione agronomica.

CET Electronics ha sviluppato il sistema WCAM2, uno strumento avanzato di visione artificiale ad uso permanente in campo, che attraverso il presente lavoro di tesi è stato testato e validato in campo. L'uso futuro del sistema, in un'ottica di utilizzo in vigna, potrebbe facilitare l'ottimizzazione della gestione del vigneto. L'implementazione del sistema WCAM2 ha dimostrato di essere particolarmente efficace nella ricostruzione tridimensionale della chioma delle viti e nella stima dello sviluppo fogliare del vigneto.

La capacità di ottenere una rappresentazione dettagliata e realistica della crescita vegetativa ha fornito informazioni preziose sul volume della chioma, sull'area di segmentazione, fornendo una stima dell'area vegetativa totale, che si è rivelata molto buona, come atteso, fino alla gestione della chioma (intervento di palizzatura dei germogli). Successivamente, l'algoritmo di calibrazione presente nel sistema WCAM non si è dimostrato affidabile e avrà bisogno di una ulteriore calibrazione nelle condizioni di post palizzatura e cimatura, in cui il sistema non era mai stato validato fino a questo momento.

Questi dati hanno permesso di monitorare quotidianamente l'accrescimento delle piante e di valutare l'impatto delle pratiche di gestione, come la potatura verde, sull'evoluzione della vegetazione.

La possibilità di ottenere una stima accurata del volume della chioma e della superficie fogliare è essenziale per prendere decisioni informate riguardo le pratiche agronomiche e per ottimizzare la produzione vitivinicola.

La capacità di adattare le tecniche di rilevamento e di gestione delle parcelle monitorate ha dimostrato l'importanza di un approccio flessibile nella raccolta e analisi dei dati. La riorganizzazione delle parcelle e l'ottimizzazione delle operazioni di rilevamento hanno garantito la rappresentatività delle misurazioni, migliorando l'efficienza del processo di monitoraggio e permettendo di affrontare le sfide legate alla variabilità delle condizioni.

In sintesi, l'integrazione delle tecnologie avanzate come la WCAM2, ha offerto una visione più precisa e dettagliata della crescita delle viti. Questi strumenti non solo migliorano la capacità di monitoraggio e gestione del vigneto, ma supportano anche la pianificazione di interventi agronomici più mirati anche in un'ottica di un miglioramento della sostenibilità ambientale.

6. BIBLIOGRAFIA

Castagnoli, A., & Dosso, P. (2001). Viticoltura assistita da satellite. *Informatore Agrario*, 57(18), 77-82.

Drissi, R., Goutouly, JP, Forget, D., & Gaudillère, JP (2009). Misurazione non distruttiva dell'area fogliare della vite mediante Ground Normalized Difference Vegetation Index. *Agronomy Journal*, 101 (1), 226–231.

Ferro M. V. & Catania P. (2023). Tecnologie e metodi innovativi per la viticoltura di precisione: una revisione completa. *Horticulturae*, 9(3), 399

Jones Hamlyn G. e Vaughan Robin A. (2012). Telerilevamento della vegetazione: principi, tecniche e applicazioni. *La rivista trimestrale di biologia* 87(2): 165-166

Meggio, F., & Pitacco, A. (2019). Partitioning of seasonal above-ground biomass of four vineyard-grown varieties: Development of a modelling framework to infer temperature-rate response functions. *Scientia Horticulturae*, 258.

Skelton S. (2007). *Viticulture: An Introduction to Commercial Grape Growing for Wine Production*. 1-180.

Rossi, V et al., (2014). Applicazione su larga scala del sistema di supporto alle decisioni vite.net per la viticoltura sostenibile, in *Atti Giornate Fitopatologiche*, (Chianciano Terme, 18-21 March 2014), Clueb, Bologna 2014: 525-532