



**Università
degli Studi
di Palermo**

AREA RICERCA E TRASFERIMENTO TECNOLOGICO
SETTORE DOTTORATI E CONTRATTI PER LA RICERCA
U. O. DOTTORATI DI RICERCA

Corso di Dottorato in Biodiversity in Agriculture and Forestry
Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali
Settore Scientifico Disciplinare AGR/03

CAMPIONAMENTO DELLE UVE E MONITORAGGIO DELLA VARIABILITÀ SPAZIALE DEL VIGNETO PER LA GESTIONE DELLA QUALITÀ

**IL DOTTORE
DOTT. DANIELE MICCICHÈ**

**COORDINATORE
CH.MO PROF. RICCARDO LO BIANCO**

**TUTOR
CH.MO PROF. ANTONINO PISCIOTTA**

**CO TUTOR
CH.MO PROF. ROSARIO DI LORENZO**

**CICLO XXXVII
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2025**

Sommario

1	Introduzione.....	1
2	Variabilità intra-parcellare.....	4
2.1	Introduzione	4
2.2	Materiali e Metodi.....	12
2.2.1	<i>Sito Sperimentale e Caratterizzazione Climatica.....</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Acquisizione dei dati NDVI.....</i>	<i>12</i>
2.2.3	<i>Studio Preliminare e Individuazione dei Punti di Monitoraggio.....</i>	<i>17</i>
2.2.4	<i>Parametri Vegetativi e Peso del Legno di Potatura.....</i>	<i>18</i>
2.2.5	<i>Stato Nutrizionale della Chioma.....</i>	<i>18</i>
2.2.6	<i>Stato Idrico</i>	<i>19</i>
2.2.7	<i>Parametri Produttivi.....</i>	<i>19</i>
2.2.8	<i>Qualità delle Uve.....</i>	<i>20</i>
2.2.9	<i>Indici di Equilibrio</i>	<i>20</i>
2.2.10	<i>Analisi del Suolo</i>	<i>21</i>
2.2.11	<i>Analisi statistica.....</i>	<i>22</i>
2.3	Risultati.....	24
2.3.1	<i>Andamento Climatico.....</i>	<i>24</i>
2.3.2	<i>Vigore Agronomico dei Punti di Monitoraggio</i>	<i>27</i>
2.3.3	<i>Distribuzione e Stabilità Spazio-Temporale dei Valori NDVI.....</i>	<i>29</i>
2.3.4	<i>Caratteristiche del Suolo</i>	<i>31</i>
2.3.5	<i>Componente vegetativa</i>	<i>32</i>
2.3.6	<i>Stato Nutrizionale delle Foglie</i>	<i>39</i>
2.3.7	<i>Stato idrico.....</i>	<i>44</i>
2.3.8	<i>Qualità delle uve.....</i>	<i>46</i>
2.3.9	<i>Parametri Produttivi.....</i>	<i>49</i>
2.3.10	<i>Indici di Equilibrio</i>	<i>52</i>
2.3.11	<i>Analisi della variabilità tra le piante: impatto di NDVI per pianta e delle classi di vigore</i>	<i>52</i>

2.3.12	<i>Analisi delle Correlazioni</i>	53
2.4	Discussione	61
2.4.1	<i>Analisi delle Correlazioni e Stabilità Spazio-Temporale del Vigore</i>	61
2.4.2	<i>Andamento Climatico, Proprietà del Suolo e Componente Vegetativa</i>	62
2.4.3	<i>Parametri Fisiologici: Pigmenti Fogliari e Stato Idrico</i>	65
2.4.4	<i>Resa e Qualità delle Uve</i>	66
2.5	Conclusioni	68
2.6	Riferimenti Bibliografici	71
3	<i>Variabilità Intra-Pianta</i>	78
3.1	Introduzione	78
3.2	Materiali e Metodi	81
3.2.1	<i>Studio della Variabilità Intra-pianta e Protocollo di Codifica dei Campioni</i>	81
3.2.2	<i>Determinazione del Numero di Fiori, Acini e Percentuale di Allegagione</i>	82
3.2.3	<i>Analisi Statistica</i>	83
3.3	Risultati	85
3.3.1	<i>Analisi Preliminare</i>	85
3.3.2	<i>Numero di Fiori, Acini e Percentuale di Allegagione</i>	85
3.3.3	<i>Peso del Grappolo</i>	87
3.3.4	<i>Solidi Solubili Totali (°Brix)</i>	88
3.3.5	<i>pH e Acidità Titolabile (g/L)</i>	93
3.4	Discussione	98
3.5	Conclusioni	101
3.6	Riferimenti Bibliografici	103
4	<i>Variabilità Intra-Grappolo</i>	105
4.1	Introduzione	105
4.2	Materiali e Metodi	108
4.2.1	<i>Caratterizzazione Climatica</i>	108
4.2.2	<i>Strategia di Campionamento e Analisi della Variabilità Produttiva</i>	108
4.2.3	<i>Analisi Statistica</i>	108

4.3	Risultati.....	110
4.3.1	<i>Caratterizzazione Climatica</i>	<i>110</i>
4.3.2	<i>Analisi della Normalità e della Distribuzione</i>	<i>113</i>
4.3.3	<i>Confronto tra le porzioni del grappolo: evidenze da test non parametrici.....</i>	<i>130</i>
4.4	Discussioni	134
4.5	Conclusioni	139
4.6	Riferimenti Bibliografici	141
5	<i>Modalità di campionamento</i>	<i>145</i>
5.1	Introduzione	145
5.2	Materiali e Metodi.....	152
5.2.1	<i>Campionamento alla Vendemmia e Analisi di Laboratorio</i>	<i>152</i>
5.2.2	<i>Obiettivo delle Simulazioni</i>	<i>153</i>
5.3	Risultati.....	156
5.3.1	<i>Confronto tra i Metodi di Campionamento</i>	<i>156</i>
5.4	Discussione	176
5.5	Conclusioni	179
5.6	Riferimenti Bibliografici.....	181
6	<i>Conclusioni generali</i>	<i>183</i>

1 Introduzione

I vigneti, nonostante siano gestiti in modo uniforme, presentano una complessità strutturale che si traduce in una marcata eterogeneità, riconducibile a fattori pedoclimatici e fisiologici.

È infatti possibile distinguere diversi livelli di variabilità, ciascuno dei quali corrisponde a una diversa unità di osservazione: tra le piante (intra-parcellare), tra i grappoli della stessa pianta (intra-pianta) e tra gli acini dello stesso grappolo (intra-grappolo). A ciascuno di questi livelli corrisponde una specifica fonte di differenziazione: le caratteristiche del suolo influenzano prevalentemente la variabilità tra piante, mentre i fattori fisiologici e microambientali agisce sulla distribuzione dei grappoli e sulla composizione degli acini. La presenza simultanea di queste forme di variabilità costituisce la base di quella che può essere definita una struttura stratificata dell'eterogeneità.

Comprendere la variabilità significa, innanzitutto, riconoscere questa struttura a più livelli e coglierne le implicazioni agronomiche. Le differenze tra piante sono principalmente riconducibili a variazioni nel vigore vegetativo, che a sua volta si riflette sulla superficie fogliare, sulla produttività e sulla composizione dell'uva; le variazioni tra grappoli sono associate alla loro posizione all'interno della pianta, con implicazioni sia sulla struttura (ad esempio, dimensione e compattezza) sia sulle caratteristiche qualitative del grappolo stesso; le disomogeneità tra acini possono incidere direttamente sulla composizione del mosto in termini di zuccheri, acidità e metaboliti secondari. Ogni livello di osservazione fornisce quindi informazioni distinte, che contribuiscono in modo specifico alla definizione della qualità delle uve. Solo attraverso uno studio integrato di tali livelli è possibile ottenere una rappresentazione più completa e realistica della complessità produttiva del vigneto.

Sebbene la letteratura scientifica abbia da tempo evidenziato l'importanza di conoscere a fondo la variabilità intra-parcellare per sviluppare strategie di gestione differenziata, questa consapevolezza fatica ancora a tradursi in protocolli operativi realmente efficaci. Nella pratica, i modelli decisionali adottati tendono spesso a semplificare l'eterogeneità, uniformando interventi che, al contrario, richiederebbero un approccio mirato e adattivo. La difficoltà non risiede tanto nella disponibilità di tecnologie e metodologie per rilevare la variabilità, quanto nella loro effettiva integrazione nei processi decisionali per la gestione del vigneto.

Uno degli ambiti in cui questa disconnessione tra evidenze scientifiche e applicazioni operative appare evidente è quello del campionamento. La raccolta dei dati durante la fase di maturazione delle uve, finalizzata a stabilire il momento ottimale della vendemmia, rappresenta una fase cruciale del processo decisionale. Le modalità con cui viene condotto il campionamento influenzano direttamente l'attendibilità delle informazioni acquisite e, di conseguenza, la capacità di interpretare correttamente lo stato qualitativo delle uve. I metodi di campionamento più comunemente adottati continuano a fondarsi su schemi convenzionali, spesso casuali o parzialmente strutturati, che non tengono conto della distribuzione spaziale della variabilità, e che pertanto possono fornire una rappresentazione distorta o incompleta della realtà.

La sfida, dunque, non consiste unicamente nel misurare la variabilità, ma nel tradurla in criteri utili per orientare in modo consapevole le strategie di campionamento. Dunque, diventa necessario costruire un sistema di campionamento basato su un'interazione coerente tra la conoscenza della variabilità e la pianificazione operativa delle misurazioni.

La necessità di ripensare il campionamento in relazione alla variabilità si inserisce in un contesto metodologico più ampio, in cui assume rilievo la qualità dei dati raccolti e la loro capacità di restituire una rappresentazione attendibile del vigneto, funzionale a supportare decisioni agronomiche mirate ed efficaci. A fronte della complessità del sistema viticolo, risulta fondamentale comprendere quale sia il modo più efficace per rappresentare tale complessità e quali criteri debbano guidare la scelta della strategia di campionamento più idonea.

All'interno di questo quadro, il presente lavoro si propone di affrontare il tema della rappresentatività del campionamento attraverso un percorso articolato in due fasi strettamente connesse. In una prima fase, è stata condotta un'analisi approfondita della variabilità presente nel vigneto, distinguendo e caratterizzando tre livelli principali: la variabilità tra piante (intra-parcellare), la variabilità tra grappoli della stessa pianta (intra-pianta) e la variabilità tra acini all'interno dello stesso grappolo (intra-grappolo). Lo studio di tali livelli ha permesso di comprendere la distribuzione dell'eterogeneità all'interno del vigneto, evidenziandone le implicazioni agronomiche e qualitative.

Sulla base delle informazioni acquisite in questa fase preliminare, sono state successivamente applicate e confrontate tre modalità di campionamento comunemente proposte in letteratura: il campionamento per pianta, per grappolo e per acino.

L'applicazione di ciascun metodo non è avvenuta in modo standardizzato o indipendente dal contesto, ma è stata calibrata in funzione dei risultati ottenuti dallo studio della variabilità. In questo modo, lo studio tenta di fornire un contributo metodologico alla definizione di protocolli di campionamento più coerenti con la complessità del sistema vigneto e più facilmente trasferibili.

2 Variabilità intra-parcellare

2.1 Introduzione

Le proprietà del suolo influenzano significativamente lo sviluppo vegetativo della chioma e, di conseguenza, la qualità delle uve e del vino. L'analisi della variabilità intra-parcellare ha seguito approcci diversi nel tempo, evolvendosi con le conoscenze scientifiche e il progresso tecnologico. In questo contesto, l'introduzione di tecnologie di osservazione indiretta ha rappresentato un punto di svolta; tra queste, il telerilevamento ha offerto nuovi strumenti per mappare e monitorare la variabilità a scala spaziale.

Le prime applicazioni del telerilevamento in agricoltura risalgono agli anni '70, quando furono impiegate fotografie aeree a colori e nel vicino infrarosso (NIR) per la mappatura delle colture (Harris e Haney, 1973; Barrett e Leggett, 1979). Tuttavia, queste tecniche presentavano limiti significativi in termini di dati quantitativi, in quanto non fornivano misurazioni numeriche sulla risposta spettrale della vegetazione. L'interpretazione era basata su un'analisi visiva soggettiva, rendendo difficile la classificazione automatizzata della vegetazione e la ripetibilità dei risultati.

Parallelamente, tra la fine degli anni '60 e gli anni '80, la ricerca sulla variabilità in vigneto si concentrava sull'analisi delle differenze pedologiche su scala macroareale. Studi come quelli di Pucheu-Planté e Seguin (1981) nel Médoc e Barbeau et al. (1998) nella Valle della Loira hanno evidenziato che il *terroir* gioca un ruolo cruciale nella disponibilità idrica della vite e, di conseguenza, nella qualità delle uve. Altri studi (Seguin, 1971; Rankine et al., 1971; Pucheu-Planté e Seguin, 1981; Morlat e Salette, 1982; Van Leeuwen et al., 2020) hanno confermato che le caratteristiche pedologiche influenzano direttamente la crescita vegetativa e la maturazione dell'uva. Tuttavia, queste analisi si basavano ancora su macroaree, senza poter esplorare la variabilità intra-vigneto a causa delle limitazioni tecnologiche del periodo.

A partire dagli anni '90, l'introduzione del telerilevamento multispettrale ha permesso di superare il precedente approccio macroareale, consentendo di analizzare la variabilità spaziale all'interno dei vigneti (García-Consuegra et al., 1999). Sebbene inizialmente impiegato per la classificazione generale delle colture, il remote sensing è stato progressivamente applicato alla viticoltura, contribuendo allo sviluppo di strumenti per la zonazione intra-parcellare.

L'adozione di tecnologie di viticoltura di precisione ha favorito un'analisi più dettagliata della variabilità pedoclimatica e della risposta fisiologica della vite, consentendo di caratterizzare il *terroir* non solo su scala regionale, ma anche a livello di singolo vigneto (van Leeuwen et al., 2020). Questo ha permesso di quantificare l'influenza di parametri ambientali chiave, come temperatura, disponibilità idrica e caratteristiche del suolo, sulla qualità delle uve e del vino, trasformando il concetto di *terroir* in un insieme di fattori misurabili e gestibili.

Studi successivi hanno esplorato la relazione tra $NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)}$ (*Normalized Difference Vegetation Index*) e vigoria della chioma. Lamb et al. (2001), tra i primi a utilizzare immagini multispettrali aeree in viticoltura, hanno dimostrato che l'NDVI consente di suddividere il vigneto in zone di gestione differenziata, migliorando l'efficienza agronomica.

Negli anni successivi, il remote sensing è stato applicato non solo per la caratterizzazione spaziale, ma anche come strumento predittivo. Dobrowski et al. (2003), analizzando dati raccolti tra il 1998 e il 1999 in vigneti di Cabernet Sauvignon in California, hanno sviluppato un metodo per prevedere il peso del legno di potatura utilizzando dati da sensori multispettrali aviotrasportati. In particolare, è stato impiegato il RVI (Ratio Vegetation Index) per correlare la vigoria della chioma con la biomassa della vite, mostrando una forte correlazione tra RVI e peso della potatura ($R^2 = 0.68-0.88$). Questo studio ha dimostrato che il remote sensing può essere impiegato per la previsione dello sviluppo vegetativo, migliorando l'ottimizzazione delle pratiche agronomiche. Tesic et al. (2002) hanno esaminato gli effetti ambientali sulla crescita della vite e sulla maturazione delle uve in sei vigneti di *Cabernet Sauvignon* nella regione di Hawke's Bay, Nuova Zelanda. Lo studio ha evidenziato una relazione tra il vigore della vite e la maturazione dell'uva, mostrando che le viti più vigorose presentavano una maturazione ritardata e un accumulo più lento degli zuccheri. Fino ai primi anni 2000, il telerilevamento aviotrasportato è rimasto il metodo più efficace per l'analisi intra-vigneto, grazie alla maggiore risoluzione spaziale rispetto ai satelliti disponibili all'epoca (Hall et al., 2002). Solo con l'introduzione di satelliti ad alta risoluzione, come IKONOS (1999, 4 m) e QuickBird (2001, 2.4 m), il telerilevamento satellitare ha iniziato a essere considerato un'opzione praticabile per la gestione intra-vigneto. Tuttavia, Hall et al. (2002) evidenziano come, fino a quel periodo, l'impiego operativo dei satelliti fosse ancora inferiore rispetto ai sensori aerei, a causa dei costi e della minore frequenza di acquisizione.

Con il progresso delle tecnologie, il proximal sensing ha rappresentato un'ulteriore evoluzione nel monitoraggio della variabilità intra-vigneto usando indici di vegetazione. Diversi studi ne hanno fatto uso per indagare il ruolo della variabilità in diverse zone viticole del mondo e su differenti varietà. Una caratteristica comune a molti di questi studi è che, indipendentemente dalle dimensioni del vigneto e dalla risoluzione spaziale delle immagini, si è evidenziata una significativa variabilità spaziale negli indici di vegetazione, correlata alle prestazioni della vite (Bramley et al., 2011; Matese and Di Gennaro, 2015; Rey-Caramés et al., 2015). King et al. (2014) hanno condotto uno studio su un vigneto di Cabernet Sauvignon nella Gimblett Gravels area, Hawke's Bay, Nuova Zelanda, evidenziando che la variabilità spaziale della vigoria è strettamente correlata alle differenze pedologiche.

Le analisi hanno mostrato che le zone a basso vigore erano caratterizzate da un suolo con sabbie grossolane, mentre le zone ad alto vigore presentavano strati con maggiore presenza di particelle fini, determinando un differente sviluppo dell'apparato radicale e, conseguentemente, una diversa capacità di assorbimento idrico. Questo ha influito sullo sviluppo vegetativo, con le piante ad alto vigore che presentavano una superficie fogliare maggiore e un peso del legno di potatura superiore.

Tuttavia, nonostante una relazione tra NDVI e peso del legno di potatura, la correlazione è risultata modesta ($R^2 = 0.4752$, $P < 0.01$), e ancora minore con la circonferenza del tronco

($R^2 = 0.2258$, $P < 0.01$). Inoltre, nonostante la differente vigoria, non sono state riscontrate differenze significative nello stato idrico delle piante, sebbene la traspirazione totale giornaliera fosse maggiore nelle piante ad alto vigore.

Ulteriori considerazioni eseguite nel corso dei vari studi compiuti negli anni riguardano, ad esempio, quanto studiato da Hall et al. (2011), i quali, impiegando immagini multispettrali aeree ad alta risoluzione (0.25 m) acquisite durante due anni consecutivi, hanno analizzato la variazione temporale della correlazione tra la chioma della vite e la qualità dell'uva e indici di vegetazione quali NDVI. I risultati ottenuti dimostrano che la relazione tra la vigoria della chioma e i parametri qualitativi e produttivi dell'uva non è costante nel tempo, ma cambia a seconda della fase fenologica. Di conseguenza, il momento in cui vengono acquisite le immagini da remote sensing incide significativamente sull'attendibilità delle informazioni ottenute: acquisizioni eseguite in fasi fenologiche diverse possono restituire correlazioni differenti con le caratteristiche dell'uva, influenzando la capacità di previsione delle analisi. In particolare, è emerso che la relazione temporale tra NDVI e peso del legno

di potatura varia nel corso della stagione. mentre l'NDVI misurato nelle fasi vegetative iniziali (pre- fioritura) presenta una correlazione debole o assente con il peso del legno di potatura, tale relazione diventa più evidente verso la fine della stagione o post-raccolta. Questo suggerisce che la stima della vigoria della pianta è più affidabile quando l'NDVI viene acquisito in fase avanzata, poiché il peso del legno di potatura rappresenta un'integrazione dell'accrescimento stagionale della vite.

Lo studio ha valutato la correlazione tra l'NDVI misurato in momenti diversi della stagione e le caratteristiche finali dell'uva, confrontando le immagini acquisite in diverse fasi fenologiche per identificare il periodo più indicato per la previsione della qualità e della resa. I risultati hanno evidenziato che, nelle prime fasi di sviluppo della vite, la correlazione tra NDVI e i parametri qualitativi dell'uva è debole o inesistente, mentre diventa più marcata a partire dalla fioritura. In particolare, l'NDVI post-fioritura ha mostrato una correlazione negativa con il contenuto di antociani e composti fenolici, suggerendo che una chioma eccessivamente vigorosa in questa fase possa limitare l'esposizione alla luce degli acini e ridurre la sintesi di metaboliti secondari responsabili della qualità del vino.

Analogamente, la relazione tra NDVI e resa produttiva ha mostrato un'inversione della correlazione nel corso della stagione. Prima della fioritura, le viti con maggiore vigore, inteso come tasso di crescita dei germogli (Keller, 2020), hanno evidenziato una resa inferiore, probabilmente a causa di una minore allegagione. Dopo la fioritura, invece, le viti più vigorose hanno recuperato in termini produttivi, mostrando rese più elevate alla raccolta. Questo risultato suggerisce che la vigoria iniziale non è sempre un buon indicatore della produzione finale, e che l'NDVI raccolto in un solo momento della stagione potrebbe fornire stime poco rappresentative. Alla luce di questi risultati, Hall et al. (2011) confermano la necessità di un approccio multi-temporale nell'uso del remote sensing per la viticoltura di precisione. La scelta del periodo di acquisizione delle immagini deve essere fatta in funzione dell'obiettivo dell'analisi: se si vuole prevedere la qualità dell'uva, l'NDVI deve essere acquisito dopo la fioritura, quando le correlazioni con i parametri qualitativi diventano più evidenti; se l'obiettivo è la resa produttiva, è necessario monitorare la chioma in più fasi della stagione, poiché la correlazione NDVI-produzione cambia nel tempo.

L'analisi della risposta temporale della variabilità del vigore in vigneto non è stata indagata esclusivamente all'interno della stessa stagione, ma anche su scala inter-annuale. Lo studio

di Ferrer et al. (2020) si è posto l'obiettivo di analizzare la variabilità spaziale e temporale in un vigneto della cv. Tannat situato nel sud dell'Uruguay nel corso di tre annate consecutive (2015-2017). Le immagini multispettrali, acquisite all'invasatura tramite voli aerei, hanno permesso di individuare una struttura di variabilità spaziale ricorrente all'interno del vigneto, che è stata classificata in tre livelli di vigore (alto, medio e basso).

Uno dei risultati più rilevanti dello studio è che la distribuzione spaziale delle zone di vigore è rimasta stabile nel tempo, suggerendo che i fattori pedologici e le caratteristiche intrinseche del suolo svolgono un ruolo determinante nella definizione della variabilità del vigneto. Tuttavia, i valori assoluti di NDVI hanno mostrato variazioni significative tra le annate, evidenziando come le condizioni climatiche influenzino l'intensità della risposta vegetativa delle viti. Nonostante questa variabilità nei valori di NDVI, è stato confermato che esiste una chiara relazione tra il vigore della vite e le caratteristiche vegetative, con le aree a vigore elevato caratterizzate da una chioma più sviluppata e da una maggiore superficie fogliare. Allo stesso modo, il rapporto tra vigore e qualità dell'uva ha mostrato tendenze coerenti con altri studi: le zone a NDVI elevato presentavano rese più elevate, ma con concentrazioni zuccherine inferiori e acidità più alte, mentre le aree a basso vigore, caratterizzate da una chioma meno espansa, mostravano una maturazione anticipata con zuccheri e pH più elevati e acidità inferiore rispetto alle zone più vigorose.

Questi risultati confermano che, sebbene la struttura spaziale della variabilità del vigore si mantenga relativamente costante nel tempo e nello spazio, le condizioni climatiche dell'annata influenzano significativamente l'intensità del vigore, la resa e la qualità delle uve.

Ulteriori considerazioni importanti riguardano la relazione tra NDVI e disponibilità idrica del suolo. In tal senso, Brillante et al. (2016) hanno studiato in un vigneto della Borgogna della cultivar Chardonnay e nel corso di due anni (2012-2013) la variabilità spaziale del vigore della vite attraverso l'NDVI e valutato in che modo le diverse zone di vigore, identificate tramite remote sensing, differissero in termini di caratteristiche fisico-chimiche del suolo e risposta fisiologica della vite. In particolare, è stato studiato l'assorbimento dell'acqua da parte della pianta in funzione delle proprietà del suolo e dello stato idrico della vite, con un'analisi dettagliata della distribuzione spaziale e temporale dell'uso dell'acqua nel vigneto. Le zone a vigore elevato erano generalmente associate a suoli con una maggiore capacità di ritenzione idrica, caratterizzati da una più elevata frazione di argilla e una minore presenza di ghiaia, che favorivano una maggiore disponibilità di acqua

per le piante.

Di conseguenza, le viti in queste aree hanno mostrato un potenziale idrico fogliare meno negativo sia al pre-alba che a mezzogiorno, indicando una minore esposizione allo stress idrico. Al contrario, le zone a basso vigore erano localizzate in aree con suoli più drenanti, con un'elevata percentuale di ghiaia e minore capacità di ritenzione dell'acqua. In queste zone, le viti hanno manifestato un potenziale idrico più negativo, segnalando una maggiore esposizione allo stress idrico. Durante le fasi più critiche della stagione, la ridotta capacità del suolo di trattenere l'acqua ha determinato un calo significativo della disponibilità idrica, con una conseguente riduzione della crescita vegetativa.

Gatti et al. (2022), in uno studio condotto in un vigneto della cultivar Barbera, situato nei Colli piacentini, tra il 2016 e il 2019, hanno dimostrato il ruolo dei fattori pedologici nella determinazione della variabilità intra-parcellare. Per mezzo di immagini satellitari, il vigneto è stato suddiviso in 3 diverse aree con differente vigore (alto, medio e basso) e per ogni zona sono state analizzate le caratteristiche pedologiche del suolo, in termini di profondità, tessitura, e composizione minerale, mentre le considerazioni fatte sulla pianta hanno riguardato sia la componente vegetativa che quella relativa alla resa e alla qualità delle uve.

Lo studio ha dimostrato che in relazione al vigore esiste un'evidente differenza nelle caratteristiche del suolo, nel dettaglio le zone ad alto vigore hanno dimostrato di avere una maggiore profondità, una frazione più elevata di argilla, maggiori livelli di potassio (K) e fosforo (P), e una maggiore disponibilità idrica totale. Al contrario, le zone a basso vigore presentavano suoli più superficiali, maggiore presenza di sabbia e una minore capacità di trattenere l'acqua. Di conseguenza, le viti nelle zone ad alto vigore hanno mostrato una maggiore crescita vegetativa, con un peso del legno di potatura superiore del 62% rispetto alle viti a basso vigore.

Anche la produzione è risultata significativamente più alta per l'alto vigore, con una resa che ha raggiunto 22 t/ha, contro le 10,9 t/ha delle zone a basso vigore. Tuttavia, le uve delle viti ad alto vigore erano meno mature al momento della raccolta, con minore accumulo glucidico e acidità più elevate, mentre le viti a basso vigore mostravano un'accelerazione della maturazione con un maggiore accumulo glucidico e acidità inferiori.

Un altro dato interessante, utile a confermare quanto riscontrato da altre ricerche, è che i dati raccolti in più anni consecutivi hanno dimostrato che la distribuzione spaziale delle

zone di vigore rimane relativamente stabile nel tempo. Ciò suggerisce che i fattori pedologici giocano un ruolo predominante nel determinare la variabilità intra-parcellare e che questa può essere sfruttata per un'ottimizzazione della gestione agronomica.

Quanto descritto sin ora, dimostra che la letteratura scientifica esistente sulla variabilità intra-parcellare ha ormai delineato in modo chiaro e approfondito come tale fenomeno sia un elemento strutturale del vigneto, influenzato da fattori pedologici che ne determinano la distribuzione e la persistenza nel tempo. Gli studi sopracitati hanno confermato che, all'interno di un singolo appezzamento gestito in modo uniforme, è possibile identificare zone con livelli di vigore differenti, i cui effetti si ripercuotono non solo sulla crescita vegetativa e sulla resa, ma anche sulla qualità dell'uva e del vino. Questa variabilità, sebbene sia stata tradizionalmente considerata un limite per la gestione ottimale del vigneto, rappresenta in realtà un fattore chiave per la valorizzazione del *terroir*, permettendo di esaltare le caratteristiche distintive di ciascuna zona e di adattare gli interventi agronomici alle specifiche esigenze del vigneto.

Sebbene la variabilità intra-parcellare sia stata ampiamente studiata in regioni viticole di rilievo come Francia, Australia e Nuova Zelanda, ricerche condotte in contesti mediterranei, e in particolare in Sicilia, risultano meno frequenti. Considerando le peculiarità pedoclimatiche di questa regione, approfondire lo studio della variabilità spaziale nei vigneti siciliani potrebbe fornire un ulteriore contributo alla comprensione dei fattori che influenzano lo sviluppo vegetativo e la qualità delle uve. Inoltre, una maggiore attenzione a questi aspetti potrebbe offrire strumenti utili per una gestione viticola più mirata, contribuendo al miglioramento delle pratiche agronomiche e alla valorizzazione del territorio.

Un aspetto cruciale che merita ulteriore approfondimento riguarda il modo in cui questa variabilità spaziale influisce sulle strategie di campionamento in vigneto. In un contesto in cui il monitoraggio della maturazione delle uve è determinante per stabilire il momento ottimale della raccolta, l'approccio tradizionale basato su campionamenti casuali potrebbe risultare non adeguato nei vigneti caratterizzati da un'elevata eterogeneità spaziale. In questi casi, un campionamento che non tenga conto delle strutture spaziali note rischia di generare stime non rappresentative dello stato reale di maturazione, compromettendo la precisione delle decisioni sulla vendemmia e, di conseguenza, sulla qualità e sulle caratteristiche enologiche del vino.

Alla luce di queste considerazioni, il presente studio propone di analizzare la variabilità

intra-parcellare non solo come fenomeno agronomico già consolidato, ma in un'ottica applicativa, valutandone il ruolo nella definizione di strategie di campionamento più efficaci. L'obiettivo principale è quantificare l'entità delle differenze tra le zone di vigore per comprendere se questa variabilità sia così marcata da rendere imprescindibile un approccio di campionamento mirato. In questo contesto, lo studio mira a verificare se la suddivisione del vigneto in zone omogenee di vigore possa migliorare la rappresentatività dei campioni rispetto a un approccio casuale, fornendo così basi più solide per l'ottimizzazione delle decisioni agronomiche e della gestione della vendemmia.

2.2 Materiali e Metodi

2.2.1 Sito Sperimentale e Caratterizzazione Climatica

Lo studio è stato condotto nel corso di due stagioni vegetative consecutive, 2022 e 2023 presso un vigneto della cultivar Catarratto/1103P (*Vitis vinifera* L.) ubicato a Camporeale (37°55'12,82"N, 13°04'28,33"E; 320 m s.l.m.; Palermo, Italia), nell'areale della D.O.C. Alcamo. Le viti erano allevate a contropalliera con sistema di potatura a cordone speronato bilaterale, irrigate attraverso un sistema d'irrigazione a goccia (portata gocciolatore di 2 L/h; distanza tra i gocciolatori 80 cm) su un terreno franco-argilloso. Le distanze d'impianto erano di 0,9 m sulla fila e 2,2 m tra le file e l'orientamento dei filari nord/est-sud/ovest. Il vigneto era condotto secondo il metodo di coltivazione biologico e le pratiche colturali sono state quelle ordinarie per tale metodo di coltivazione nell'areale dello studio. Il clima del sito è classificato come semi-arido secondo il sistema di classificazione di Köppen-Geiger (Falquina et al., 2022). La caratterizzazione macroclimatica è stata condotta utilizzando i dati di una stazione meteorologica automatizzata appartenente al Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS). In particolare, sono state analizzate le precipitazioni mensili registrate nel periodo 2001-2021, al fine di valutare in che misura le piogge registrate nei due anni di sperimentazione (2022-2023) si discostassero dalla media di lungo periodo. I dati meteorologici specifici per ciascun anno sperimentale sono stati invece ottenuti da una stazione meteorologica di proprietà della cantina ospitante, situata a circa due chilometri dal vigneto. Da quest'ultima fonte sono stati estratti non solo i dati relativi alle precipitazioni, ma anche quelli sulle temperature medie, massime e minime giornaliere.

2.2.2 Acquisizione dei dati NDVI

2.2.2.1 UAV e Sensori

Le immagini sono state acquisite utilizzando come UAV un quadricottero Da-Jiang Innovations (DJI, Shenzhen, Guangdong, Cina) modello Phantom 4 Multispectral, classificato come ala rotante e multirottore, descritto in dettaglio in (Ferro e Catania, 2023). L'UAV è dotato di una fotocamera multispettrale con sei sensori CMOS da 1/2.9", tra cui un sensore RGB per l'imaging nella luce visibile e un sistema multi-imager composto da cinque sensori monocromatici stretti per l'imaging multispettrale, con una risoluzione finale di 2.08 MP.

Il sensore utilizzato può compensare la posizione dell'immagine, poiché le posizioni relative dei nuclei dei sensori CMOS sono memorizzate nelle informazioni EXIF di ciascuna immagine. L'obiettivo ha un angolo di campo (FOV) di $62,7^\circ$, una lunghezza focale di 5,74 mm e un'apertura di f/2.2. La dimensione massima dell'immagine finale è generalmente di 1600×1300 (4; 3.25). Questi sensori operano nelle bande del blu (B): 450 nm, verde (G): 560 nm, rosso (R): 650 nm, red-edge (RE): 730 nm e vicino infrarosso (NIR): 840 nm. Ogni sensore multispettrale ha una risoluzione spettrale che può variare in un intervallo di ± 16 nm, eccetto il sensore NIR che ha una risoluzione spettrale di ± 26 nm. I sensori acquisiscono l'immagine con un otturatore globale; il tempo di esposizione era di 1/526 s, catturando 1 immagine al secondo, e salvano i dati in formato JPEG e TIFF RAW in virgola mobile a 32 bit (FP32).

2.2.2.2 Raccolta di dati multispettrali

Prima della raccolta dei dati multispettrali, i voli sono stati pianificati utilizzando il software ufficiale specifico DJI per impostare i seguenti parametri: altitudine di volo, distanza dal suolo (GSD), superficie di studio, velocità, percorso, configurazione della fotocamera, orientamento del gimbal, orario del volo, sovrapposizione laterale e sovrapposizione frontale. Prima dei voli, alcuni Ground Control Points (GCPs) e un pannello di calibrazione della riflettanza sono stati posizionati per effettuare la calibrazione geometrica e radiometrica durante il processo fotogrammetrico. I GCPs sono stati collocati uniformemente ai bordi e al centro della parcella su una piattaforma solida. I GCPs sono stati georeferenziati utilizzando uno strumento, il GNSS (GPS STONEX S70 RTK con antenna esterna e correzione RTK). Nel periodo 2022-2023, sono stati effettuati due voli per anno, in corrispondenza di diverse fasi fenologiche della vite (Tab. 1). In entrambe le annate, il primo volo è stato condotto alla fase fenologica *pea-size* (BBCH 75), mediamente corrispondente al mese di giugno mentre il secondo, è stato eseguito in prossimità della data di raccolta. Per ciascuna data, il volo si è svolto tra le 11:30 e le 13:00 (ora solare) in configurazione di volo automatica seguendo rotte e waypoint prestabiliti. Durante l'esecuzione dei rilievi, le condizioni meteorologiche erano ottimali, caratterizzate da un'elevata intensità luminosa e una bassa velocità del vento. I voli sono stati eseguiti a un'altezza di 70 m sopra il livello del suolo (AGL), ottenendo una dimensione del pixel dell'immagine (GSD) pari a 0,037 m/px per ogni immagine. Il campo visivo (FOV) era di $51,50 \times 41,25$ m e la velocità orizzontale del UAV era di 6 m/s. La fotocamera scattava automaticamente immagini a intervalli di un secondo, salvandole in formato TIFF. I rapporti di sovrapposizione frontale e laterale delle immagini erano impostati al 60%,

mentre l'inclinazione del gimbal era impostata a 90° (verso il basso).

Tab. 1. Date di acquisizione delle immagini da drone nei due anni di sperimentazione.

Anno	BBCH	Mese	Day Of the Year (DOY)
2022	75	Giugno	152
	89	Agosto	238
2023	75	Giugno	148
	89	Agosto	249

La tabella riporta le epoche fenologiche di riferimento secondo la scala BBCH, il mese e il giorno dell'anno (DOY) in cui sono stati effettuati i voli. Le acquisizioni sono state programmate in due momenti chiave del ciclo fenologico della vite: pea-size (BBCH 75) e in prossimità della maturazione tecnologica (BBCH 89).

2.2.2.3 Pre-elaborazione delle immagini

Una volta acquisite le immagini multispettrali e RGB, queste sono state pre-elaborate per ottenere una Mappa Ortofoto Digitale (DOM) e un Modello Digitale di Elevazione (DEM). Inoltre, è stata effettuata una classificazione automatica dei punti a terra e una ricostruzione della mesh basata esclusivamente su punti a terra, generando il Modello Digitale del Terreno (DTM). L'elaborazione dei dati è stata eseguita utilizzando il software Agisoft Metashape Professional (versione 1.7.3, San Pietroburgo, Russia) applicando algoritmi fotogrammetrici.

Il processo fotogrammetrico comprende l'allineamento delle immagini utilizzando i GCP per ottimizzare il procedimento. Successivamente, è stata applicata la costruzione della nuvola di punti densa. La calibrazione delle immagini è stata effettuata posizionando un pannello bianco Spectralon sul terreno e misurando la riflettanza immediatamente prima e dopo il volo utilizzando uno spettrometro. Questa procedura consente di eliminare potenziali problemi come vignettatura, offset dei pixel scuri e, soprattutto, di convertire le immagini grezze in radianza e successivamente in riflettanza.

Infine, il DEM e il DOM multibanda sono stati ottenuti attraverso un processo di ortorettifica e mosaico.

2.2.2.4 Estrazione delle variabili basate su UAV

A partire dai prodotti finali, ortomosaico e DEM, i dati sono stati elaborati e analizzati utilizzando il software open-source QGIS versione 3.36.6 (QGIS.org, 2024). Inoltre, sono stati impiegati gli strumenti SAGA e GRASS già interconnessi e implementati in QGIS. Il processo di segmentazione e rilevamento della chioma della vite è stato effettuato tramite algoritmi di rilevamento oggetti basati su deep learning. Utilizzando lo strumento di slicing dei dati raster del DOM, sono state ottenute immagini quadrate di dimensione standard pari a 240 x 240 pixel. In questo studio, le immagini ottenute dalla pre-elaborazione sono state suddivise casualmente in set di addestramento e validazione con un rapporto di 8:2. È stato impiegato il modello di segmentazione semantica U-Net, che classifica gli oggetti nell'immagine tramite riconoscimento pixel per pixel, etichettando ogni pixel con una classe specifica, come descritto in Ferro et al. (2024). Il processo di analisi delle immagini consiste in una parte Encoder e una parte Decoder, tramite le quali sono state analizzate tutte le immagini DOM multibanda per identificare i pixel della vegetazione viticola, escludendo quelli relativi al suolo, alla vegetazione spontanea o alle ombre. Questo esperimento ha utilizzato il framework di deep learning Keras sulla piattaforma TensorFlow, e l'ambiente di programmazione era Python 3.7.10. Una volta ottenuti i pixel di vegetazione pura attraverso le tecniche di segmentazione e classificazione descritte, è stato calcolato l'indice di vegetazione normalizzato (NDVI) (Rouse Jr et al., 1974), uno degli indici più utilizzati per valutare la crescita delle colture. L'indice è calcolato considerando le bande dello spettro nel vicino infrarosso (NIR) e nel rosso (RED) secondo l'equazione [1].

$$\text{NDVI} = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{Rouse et al. (1974)} \quad [1]$$

A partire dalla mappa del vigneto e dai dati georeferenziati, sono state individuate alcune viti rappresentative (viti campione) da utilizzare per l'analisi di dettaglio. La selezione è stata effettuata in modo da coprire l'intera variabilità spaziale del vigneto. La delimitazione di ciascuna vite campione è stata effettuata utilizzando un poligono rettangolare orientato nello spazio dalle coordinate GPS rilevate in campo con un GPS STONEX S70 RTK con precisione sub-centimetrica. Ulteriori misurazioni sono state condotte in campo su singole viti per definire con precisione lo spazio occupato da ogni pianta, adottando un approccio simile a quello descritto in Ferro et al. (2023). I poligoni rettangolari sono stati generati per ciascuna vite utilizzando il software QGIS.

La combinazione della maschera di pixel della vegetazione del vigneto con il layer di poligoni relativi alle viti campione (in formato shapefile) ha permesso di isolare e analizzare esclusivamente i pixel della chioma situati all'interno dei rettangoli di interesse.

2.2.2.5 *Delimitazione delle zone di gestione dalle mappe NDVI*

Con l'obiettivo di produrre sottozone omogenee, le zone di gestione (ZG) sono state delineate applicando il clustering fuzzy k-means non supervisionato basato sulle mappe NDVI della chioma del vigneto derivate dalle immagini multispettrali acquisite con UAV. L'algoritmo k-means minimizza la somma dei quadrati delle distanze euclidee di tutti i pixel rispetto al centro del cluster attraverso iterazioni multiple, suddividendo il campo in diverse classi di cluster.

Maggiori dettagli sul processo di clustering fuzzy k-means possono essere trovati in Fridgen et al. (2004). È stata eseguita un'analisi ZG utilizzando un esponente di fuzziness con il valore convenzionale di 1,35 (Odeh et al., 1992) e 300 iterazioni. Il criterio di convergenza è stato impostato a 0,0001, e il numero di zone possibili variava da due a sei.

L'applicazione di questo metodo determina il numero ottimale di ZG minimizzando due indici: l'indice di Entropia di Classificazione Normalizzata (NCE) e l'Indice di Performance della Fuzziness (FPI). Entrambi gli indici assumono valori compresi tra 0 e 1. L'NCE misura il grado di disorganizzazione tra le ZG: un valore più alto di NCE indica un maggiore livello di disorganizzazione.

Al contrario, l'FPI valuta il grado di separazione tra le ZG: un valore più alto di FPI indica una maggiore sovrapposizione delle affiliazioni tra le zone di vigore.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia descritta, le zone di gestione sono state definite identificando 3 cluster specifici, corrispondenti a livelli di vigore basso, medio e alto. I risultati della zonazione effettuata attraverso l'algoritmo non supervisionato sono stati quindi validati mediante confronto con variabili agronomiche misurate in campo.

2.2.3 Studio Preliminare e Individuazione dei Punti di Monitoraggio

Nel 2021, durante la stagione vegeto-produttiva precedente all'avvio dello studio biennale (2022-2023), sono stati condotti voli preliminari sull'intero vigneto per individuare una distribuzione rappresentativa della variabilità di vigore. L'analisi iniziale, basata sui valori NDVI, ha permesso di identificare 70 punti chiave in grado di descrivere l'eterogeneità della vegetazione all'interno del vigneto.

Da questi 70 punti, ne sono stati selezionati 6 per il monitoraggio, scelti per garantire una copertura rappresentativa delle diverse condizioni di vigore presenti nel vigneto. La selezione è stata effettuata sulla base della distribuzione dei valori NDVI, includendo punti con valori relativamente bassi, intermedi e alti, senza tuttavia attribuire a questa fase una classificazione definitiva delle zone di vigore.

Per ciascun punto di monitoraggio sono state individuate 6 piante, etichettate e georeferenziate per consentire un rapido riconoscimento in campo. Queste piante sono state monitorate nei due anni successivi (2022-2023) per valutare eventuali variazioni nel loro comportamento vegeto-produttivo e per correlare i dati NDVI con parametri agronomici misurati in campo.

Nel dicembre 2021, le 6 piante di ciascun punto di monitoraggio sono state sottoposte alla misurazione del peso del legno di potatura, al fine di verificare se i punti selezionati sulla base dei valori NDVI riflettessero effettivamente differenze strutturali nella vigoria delle piante. L'associazione dei valori NDVI ai dati di peso del legno ha permesso di confermare la validità del criterio di selezione adottato, fornendo una solida base per il successivo studio.

I dati raccolti sono stati successivamente sottoposti a un'analisi statistica preliminare, considerando come fattori la zona di appartenenza (corrispondente ai sei punti di monitoraggio) e l'anno (2022 e 2023), al fine di individuare eventuali differenze significative in termini di peso del legno. In base all'andamento dei dati, le sei zone di monitoraggio sono state raggruppate in tre categorie di sviluppo vegetativo: alto (AV), medio (MV) e basso (BV). In particolare, le dodici piante appartenenti ai due punti con i valori più elevati di peso del legno sono state aggregate nella categoria Alta Vegetatività (AV), quelle dei due punti con valori intermedi sono state incluse nella categoria Media Vegetatività (MV), mentre le dodici piante con i valori più bassi di peso del legno sono state raggruppate nella categoria Bassa Vegetatività (BV).

Sulla base di questa nuova classificazione, è stata eseguita un'ulteriore analisi statistica considerando come fattori il livello di vegetatività (alta, media e bassa), l'anno (2022 e 2023) e la loro interazione, con l'obiettivo di valutare l'effetto della riclassificazione sui parametri agronomici e sulla loro relazione con i dati NDVI.

2.2.4 Parametri Vegetativi e Peso del Legno di Potatura

Per ciascuna delle 12 piante rappresentative dei tre livelli di vigore, è stata effettuata un'analisi dello sviluppo vegetativo. Tale analisi è stata condotta in due fasi fenologiche specifiche: *pea-size* (BBCH 75) e maturazione tecnologica idonea per la raccolta (BBCH 89). Seguendo la metodologia descritta da Lopes e Pinto, (2005), sono state analizzate separatamente la superficie fogliare dell'asse principale e quella delle femminelle. La somma di queste due componenti ha permesso di definire le caratteristiche complessive del germoglio in termini di superficie fogliare.

Il numero di germogli per pianta è stato poi moltiplicato per la superficie fogliare media per germoglio (cm^2), consentendo di stimare la superficie fogliare totale per ciascuna pianta (m^2). Questa quantificazione ha fornito informazioni dettagliate sulle variazioni dello sviluppo vegetativo tra le due fasi fenologiche considerate.

Oltre alla superficie fogliare, l'analisi delle caratteristiche dei germogli ha incluso la misurazione della loro lunghezza e il conteggio del numero di foglie presenti sull'asse principale e sulle femminelle, in entrambe le fasi fenologiche. Il confronto del numero di foglie tra le due fasi ha permesso di definire il grado di filloptosi per ciascun livello di vigore. Durante la fase di riposo vegetativo, per ciascuna pianta è stato misurato il peso del legno di potatura e contati il numero di tralci per vite; il rapporto tra i due ha consentito di calcolare il peso medio del tralcio.

2.2.5 Stato Nutrizionale della Chioma

Lo stato nutrizionale fogliare è stato valutato in modo non distruttivo durante ogni annata, con cadenza decadale, dalla fase fenologica di *pea-size* (BBCH 75) fino alla raccolta. Le misurazioni sono state effettuate su un germoglio per pianta, selezionando tre foglie per germoglio posizionate rispettivamente nelle porzioni basale, mediana e apicale, al fine di garantire una rappresentatività adeguata dei risultati.

Le analisi sono state condotte utilizzando il dispositivo scientifico Dualex 4 (Dx4, FORCE-A, Orsay, Francia), un apparecchio portatile progettato per misurare in modo non

distruttivo il contenuto di clorofilla, flavonoidi e antociani nell'epidermide delle foglie. Prima delle misurazioni, le foglie sono state preparate mediante una semplice pulitura della lamina fogliare nel punto di applicazione del sensore, assicurandosi di evitare aree con alterazioni cromatiche, danni visibili o condizioni di deterioramento. Per garantire l'accuratezza delle misurazioni, sono state escluse le foglie non in perfetto stato e si è prestata particolare attenzione a evitare che il sensore entrasse in contatto con le nervature principali. Il dispositivo utilizza una combinazione di lunghezze d'onda per eseguire le misurazioni: una nella gamma UV-A (315-400 nm) per determinare l'assorbanza dei flavonoidi e una nella gamma del rosso (650 nm) per eccitare la fluorescenza della clorofilla.

I parametri analizzati includevano il contenuto di clorofilla (CHL, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), indicativo della quantità di clorofilla presente nelle foglie; l'indice di equilibrio azotato (NBI), calcolato come rapporto tra clorofilla e flavonoidi e il contenuto di antociani (ANT, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), utilizzato per valutare la risposta della pianta agli stress ambientali.

2.2.6 Stato Idrico

Il *midday stem water potential* (Ψ_{SWP}), su foglie provenienti da germogli di piante dei diversi livelli di vigore, è stato misurato utilizzando una camera a pressione (PMS Instrument Co., Albany, USA). Le misurazioni di Ψ_{SWP} sono state eseguite tra le 12:00 e le 14:30 su due foglie mature e ben esposte per pianta, campionate dalla parte centrale dell'asse del germoglio. Le foglie destinate alla valutazione del potenziale sono state coperte con un foglio di alluminio e successivamente chiuse in un sacchetto di plastica, tale procedura è stata svolta per ciascuna foglia, circa 1 ora prima della misurazione. Il tempo tra l'escissione della foglia e la pressurizzazione della camera è generalmente stato inferiore a 10-15 secondi.

2.2.7 Parametri Produttivi

Durante ciascuna annata, la risposta produttiva delle piante appartenenti ai tre livelli di vigore è stata quantificata attraverso la valutazione di diversi parametri. La fertilità potenziale è stata determinata allo stadio BBCH 71, conteggiando per ciascuna pianta il numero di germogli e il numero di grappoli. Per garantire la correttezza del calcolo, non sono stati conteggiati i grappoli eventualmente presenti sulle femminelle, né quelli sviluppati da germogli inseriti su legno vecchio o comunque originati da gemme diverse

da quelle lasciate intenzionalmente in potatura.

Nel caso specifico, la varietà in esame presenta una fertilità delle femminelle prossima allo zero; tuttavia, per garantire coerenza metodologica, tutti i grappoli non derivanti da gemme franche sono stati esclusi dalla valutazione, indipendentemente dalla loro effettiva presenza. Il rapporto tra il numero di grappoli e il numero di germogli ha permesso di determinare il numero medio di grappoli per germoglio per ciascun livello di vigore.

Al momento della raccolta, la produzione di ciascuna pianta campione è stata pesata singolarmente, e il numero totale di grappoli per pianta è stato conteggiato. Sulla base di questi dati, il rapporto tra la produzione totale e il numero di grappoli ha consentito di calcolare il peso medio del grappolo e la resa complessiva per vite per ciascun livello di vigore.

2.2.8 Qualità delle Uve

Alla raccolta, la produzione di ciascuna pianta è stata trasferita in laboratorio per le analisi qualitative del mosto. I grappoli sono stati pressati singolarmente e da ciascuno sono stati ricavati due campioni di mosto: il primo è stato impiegato per la determinazione dei parametri qualitativi a livello di singolo grappolo; il secondo è stato unito ai campioni derivanti dagli altri grappoli della stessa pianta, al fine di ottenere un campione composito rappresentativo a livello di pianta. Dal momento che tale campione era rappresentativo dell'intera produzione di ciascuna vite, la pianta è stata considerata come unità sperimentale, con 12 repliche biologiche per ciascun livello di vigore. Entrambi i tipi di campione sono stati analizzati per la determinazione dei principali parametri qualitativi: solidi solubili totali (SST, °Brix), pH e acidità titolabile. In dettaglio, 1 ml di mosto è stato analizzato utilizzando un rifrattometro digitale (modello HI96811, Hanna Instruments, Padova, Italia) per la misurazione dei SST, mentre 10 ml di mosto sono stati impiegati per la determinazione del pH e dell'acidità titolabile mediante un titolatore automatico (modello Titromatic 8652, Crison Instruments, Barcellona, Spagna).

2.2.9 Indici di Equilibrio

La valutazione dell'equilibrio vegeto-produttivo delle viti nei tre livelli di vigore è stata effettuata mediante due indici: l'Indice di Ravaz (Ravaz, 1908) e il rapporto superficie fogliare/produzione. Il primo, calcolato come il rapporto tra il peso dell'uva prodotta per pianta e il peso del legno di potatura, è ampiamente riconosciuto come un indicatore chiave

per valutare l'equilibrio tra vigore vegetativo e capacità produttiva (Jackson e Lombard, 1993; Kliewer e Dokoozlian, 2005). Il secondo indice è ampiamente utilizzato in viticoltura per stimare l'efficienza fotosintetica della vite in funzione della sua capacità di sostenere la maturazione dei grappoli (Kliewer e Dokoozlian, 2005).

La sua determinazione si è basata sul rapporto tra la superficie fogliare del germoglio e la produzione media dello stesso. In dettaglio per ciascuna delle 36 piante campione (12 per livello di vigore) è stato selezionato un germoglio rappresentativo sviluppatosi da una gemma ibernante, scelto in base a condizioni di sviluppo nella media, tali da escludere situazioni di vigore estremamente basso o elevato rispetto alla condizione generale della pianta. Su ciascun germoglio, i rilievi precedentemente citati e dunque eseguiti in due distinte fasi fenologiche, hanno consentito di stimare con precisione la superficie fogliare per germoglio. La produzione media per germoglio è stata invece determinata moltiplicando la fertilità potenziale media di ciascuna pianta per il peso medio del grappolo della stessa. I due parametri sono stati quindi integrati per calcolare l'indice sopracitato, determinando nel complesso 12 valori per livello di vigore, da cui è stato derivato l'indice medio per ciascuna classe. Entrambi gli indici sono stati scelti in quanto rappresentano strumenti consolidati per descrivere l'equilibrio vegeto-produttivo e sono frequentemente adottati in studi viticoli per caratterizzare il comportamento agronomico della vite in relazione ai livelli di vigore.

2.2.10 Analisi del Suolo

La valutazione delle caratteristiche pedologiche concernenti ciascun livello di vigore sono state studiate prelevando dei campioni di suolo da ciascun punto. Nel dettaglio, sono stati eseguiti campioni in 2 siti per ciascun livello di vigore; il prelievo è stato effettuato a due profondità, 30 e 60 cm, mescolando successivamente i due campioni prelevati alla stessa profondità di ciascun livello di vigore prelevati per ottenere un campione unico destinato alle analisi di laboratorio.

Per stimare la percentuale di sostanza organica presente nei campioni, è stato inizialmente determinato il contenuto di carbonio organico tramite il metodo Walkley-Black (Walkley e Black, 1999). Il valore ottenuto è stato moltiplicato per il fattore di conversione 1,724 per ottenere la percentuale finale di SO (Pribyl, 2010).

La distribuzione granulometrica delle particelle del suolo è stata determinata applicando la tecnica di setacciatura con l'ausilio di un apparecchio a pipetta, secondo le specifiche

metodologiche descritte nella letteratura di riferimento (Smith et al., 1991). Questa procedura ha consentito di caratterizzare in modo preciso la composizione tessiturale dei campioni, fornendo un quadro esaustivo della struttura fisica dei suoli analizzati. Oltre ai parametri descritti, per ciascun campione è stato determinato l'azoto totale (g/kg s.s.), il fosforo assimilabile (mg/kg s.s.), il potassio di scambio (meq/100 g s.s.) e la capacità di scambio cationico (CSC, meq/100 g s.s.). L'adozione di metodologie analitiche consolidate ha garantito un elevato grado di affidabilità dei dati raccolti, consentendo una valutazione rigorosa delle variazioni pedologiche in funzione del livello di vigore.

2.2.11 Analisi statistica

Per ciascun parametro analizzato, è stato preliminarmente eseguito il test di normalità di Anderson-Darling per verificare la conformità dei dati a una distribuzione normale, condizione necessaria per l'applicazione di test parametrici. Quando i dati non rispettavano l'assunzione di normalità, è stata applicata una trasformazione logaritmica per migliorarne la distribuzione e consentire l'applicazione di test parametrici, come l'ANOVA. La presenza di eventuali valori anomali (outlier) è stata valutata mediante il test di Grubbs. I dati ritenuti coerenti sono stati successivamente sottoposti a un'ANOVA a due vie per analizzare l'effetto dei fattori "vigore" (alto, medio, basso) e "anno" (2022, 2023), nonché la loro interazione; in aggiunta, solo per i dati relativi alla componente vegetativa, è stato considerato un ulteriore fattore che è l'epoca di rilievo (giugno o settembre). Le differenze tra le medie sono state valutate con il test di Tukey, adottando un livello di significatività di $p < 0,05$. Nei risultati sono riportati solo gli effetti statisticamente significativi emersi dall'analisi. Quando un fattore non risulta significativo, i dati vengono presentati nella loro forma aggregata. Infine, è stata condotta un'analisi delle correlazioni per studiare la relazione tra NDVI e le principali variabili agronomiche, quale ad esempio il peso del legno di potatura. Per valutare l'affidabilità dei modelli di regressione ottenuti, è stata considerata una combinazione di parametri statistici, superando l'uso esclusivo dell' R^2 . Sebbene quest'ultimo rappresenti un indicatore fondamentale per determinare la proporzione della variabilità spiegata dal modello, presenta alcune limitazioni. Ad esempio, l' R^2 aumenta sempre con l'aggiunta di nuovi predittori, anche quando questi non migliorano realmente la capacità predittiva del modello. Inoltre, l' R^2 non fornisce informazioni dirette sull'errore medio in unità della variabile di risposta e non garantisce che il modello soddisfi le assunzioni della regressione lineare, come l'omoschedasticità dei residui o la loro normalità.

Pertanto, per completare la valutazione della bontà del modello, è stato utilizzato anche il valore di S , ovvero l'errore standard della regressione, equivalente dell'errore quadratico medio (RMSE). Questo parametro è espresso nelle unità di misura della variabile di risposta e indica l'errore medio assoluto commesso dal modello; dunque, rappresenta la distanza media dei valori osservati dai valori stimati:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

In cui y_i sono i valori osservati dal modello, $\hat{y}_i$ sono i valori stimati dal modello, n il numero di osservazioni ed infine p il numero di parametri stimati nel modello. Per normalizzare il valore di S e renderlo comparabile tra variabili con scale differenti, è stato calcolato il SN (Errore standard della regressione normalizzato) rispetto al range dei dati osservati ($Y_{max} - Y_{min}$), secondo la formula:

$$SN(\%) = \left(\frac{s}{y_{max} - y_{min}} \right) \cdot 100$$

Queste analisi hanno permesso di approfondire le dinamiche tra vigore vegetativo e parametri quali-quantitativi, fornendo indicazioni utili per la comprensione dell'equilibrio vegeto-produttivo del vigneto. Tutte le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il software Minitab 19 (State College, PA: Minitab, Inc.).

2.3 Risultati

2.3.1 Andamento Climatico

L'analisi delle condizioni climatiche nell'area viticola in esame evidenzia una temperatura media annua simile tra il 2022 (17.80 °C) e il 2023 (17.53 °C). Tuttavia, questa apparente stabilità maschera differenze significative nei singoli periodi dell'anno, con variazioni più marcate tra le stagioni (Fig. 1). Nei primi mesi del 2023, le temperature sono risultate generalmente inferiori rispetto al 2022, con le discrepanze più evidenti nel mese di marzo. In questo periodo, la temperatura media del 2023 è stata superiore di circa 1.8 °C rispetto all'anno precedente, con massime e minime che hanno mostrato un andamento simile. Complessivamente, il 2023 ha registrato un inverno più mite, ma un inizio di primavera più fresco rispetto al 2022. Rispetto alla media climatica del ventennio 2001-2021, entrambi gli anni analizzati si sono mantenuti su valori termici più elevati, con scostamenti più evidenti riferiti alla stagione 2023.

Con l'arrivo della stagione primaverile, le temperature del 2023 si sono mantenute inferiori rispetto all'anno precedente, in particolare tra maggio e giugno, quando le anomalie termiche hanno evidenziato valori medi inferiori di circa 4 °C rispetto al 2022. Anche le temperature massime non hanno raggiunto i livelli elevati osservati nel 2022.

Con l'avanzare dell'estate, tuttavia, si è registrato un incremento termico più marcato, culminato in un'ondata di calore tra il 15 e il 25 luglio, con massime che hanno raggiunto i 41 °C e minime attestatesi intorno ai 26 °C. Complessivamente, luglio 2023 è risultato il mese più caldo dell'anno, con valori medi superiori di circa 1.7 °C rispetto al 2022, determinando condizioni di stress termico più accentuate rispetto all'anno precedente. Il confronto con la media termica del ventennio evidenzia che, nei mesi estivi, sia il 2022 che il 2023 hanno mostrato temperature sensibilmente superiori ai valori medi storici, con anomalie particolarmente evidenti nel mese di luglio, a conferma di un quadro termico complessivamente più caldo rispetto alla norma. Nel periodo autunnale, settembre ha mostrato temperature pressoché identiche nei due anni, senza variazioni rilevanti. Con l'avanzamento della stagione, invece, il 2023 ha registrato temperature mediamente più elevate rispetto al 2022, con una differenza più evidente nel mese di ottobre, quando il valore medio è risultato superiore di circa 2 °C rispetto all'anno precedente. Questa tendenza si è invertita con l'avvicinarsi dell'inverno, evidenziando a dicembre 2023 temperature più basse rispetto al 2022, con una differenza di circa 1.7 °C nelle medie e di 1 °C nei valori minimi. Queste variazioni evidenziano un andamento climatico non uniforme

tra le due annate, con un 2023 caratterizzato da un'alternanza di fasi più fresche rispetto al 2022, seguite da periodi di forte riscaldamento, in particolare nei mesi estivi, e da un raffreddamento più marcato alla fine dell'anno. Lo scostamento rispetto alla media climatica ventennale risulta evidente anche nel periodo autunnale, già a partire da settembre, con temperature medie che si mantengono superiori ai valori storici in entrambi gli anni, seppur con modalità differenti. L'analisi delle precipitazioni nei primi mesi del 2023 evidenzia accumuli particolarmente contenuti, con un totale di circa 10 mm: nello specifico, gennaio ha registrato valori pari a 0, mentre a febbraio e marzo si sono misurati rispettivamente 7 mm e 3 mm di pioggia (Fig. 2). In netto contrasto, nello stesso periodo del 2022 si sono accumulati circa 123 mm, concentrati prevalentemente nei mesi di gennaio (49.8 mm) e marzo (54.6 mm). Questo andamento, tuttavia, si discosta dalla media registrata nel periodo 2001-2021, che mostra una progressiva riduzione delle precipitazioni da gennaio a giugno, con valori mensili che oscillano tra 100 mm a gennaio febbraio e marzo, sino ad arrivare a valori inferiori a 10 mm a luglio. Entrambi gli anni, dunque, presentano anomalie rispetto alla media pluriennale, sebbene il 2022 mostri un andamento più vicino al comportamento storico, con maggiori precipitazioni in inverno e una progressiva diminuzione nei mesi primaverili ed estivi.

Il 2023, al contrario, si discosta significativamente dalla tendenza climatica media. Dopo un periodo invernale con precipitazioni quasi nulle, ha mostrato un'inversione di tendenza con un progressivo aumento dei valori in primavera, culminato in un picco anomalo a maggio (95 mm) e precipitazioni ancora elevate a giugno (52 mm), che superano di molto la media storica di questo mese. Questo comportamento rappresenta un chiaro segnale di irregolarità rispetto al trend osservato nei 20 anni precedenti. Complessivamente, tra aprile e giugno 2023 si sono registrati circa 210 mm di pioggia, un valore nettamente superiore ai 110 mm dello stesso periodo del 2022. Questo incremento significativo nel secondo trimestre dell'anno ha compensato, almeno in parte, la siccità osservata nei mesi invernali, delineando un andamento pluviometrico particolarmente irregolare nel 2023 rispetto all'anno precedente.

Luglio e agosto, in entrambi gli anni hanno mostrato un regime pluviometrico conforme alle caratteristiche climatiche della zona, con precipitazioni pressoché assenti a luglio e comprese tra 10 e 20 mm nel mese di agosto.

A partire da settembre, emergono ulteriori differenze tra gli anni analizzati e la media pluriennale. Quest'ultima evidenzia valori medi mensili di ~ 100 mm per ottobre,

novembre e dicembre, riflettendo una tendenza stagionale di progressivo incremento delle precipitazioni verso la fine dell'anno. Il 2022 segue parzialmente questa tendenza, con un incremento delle precipitazioni autunnali, sebbene presenti anomalie nei mesi di ottobre e dicembre, caratterizzati da valori inferiori alla media. Il 2023, invece, mostra un andamento opposto: dopo i picchi primaverili, si registra una progressiva riduzione delle precipitazioni, con valori significativamente al di sotto della media nei mesi finali dell'anno. Tra settembre e dicembre 2023, infatti, il totale delle precipitazioni è stato di ~130 mm, quasi dimezzato rispetto alla media pluriennale e inferiore ai 250 mm registrati nel 2022.

Questi dati evidenziano come entrambi gli anni si discostino in modo diverso dalla condizione media pluriennale. Il 2022, pur mostrando alcune anomalie locali, riflette un andamento complessivo più vicino alla media storica, con maggiori precipitazioni in inverno, un calo in estate e un incremento verso la fine dell'anno. Il 2023, invece, rappresenta un'eccezione più marcata, con una distribuzione delle precipitazioni fortemente irregolare: valori quasi nulli nei primi mesi dell'anno, un picco primaverile anomalo e una riduzione drastica nelle fasi finali dell'anno, significativamente al di sotto delle medie storiche.

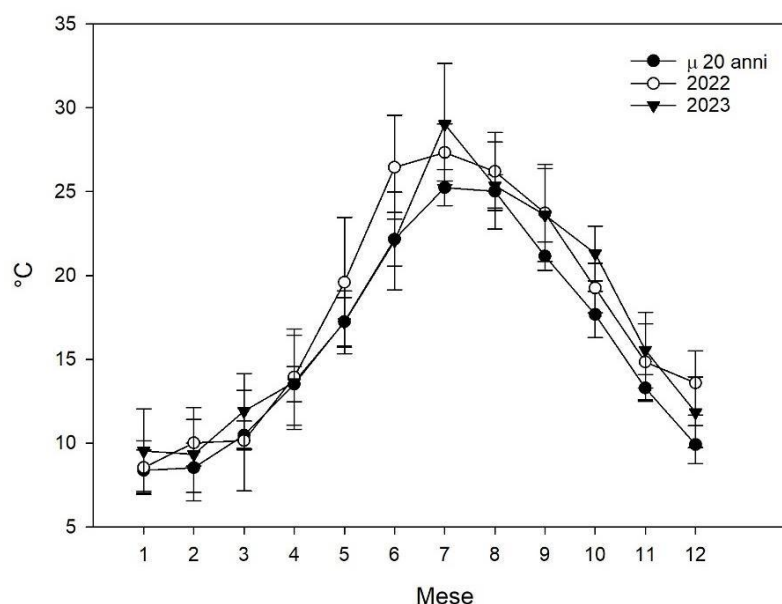


Figura 1. Andamento mensile della temperatura media (°C) nel 2022 e 2023 (media $\pm$ errore standard) con confronto rispetto alla media del ventennio 2001- 2021.

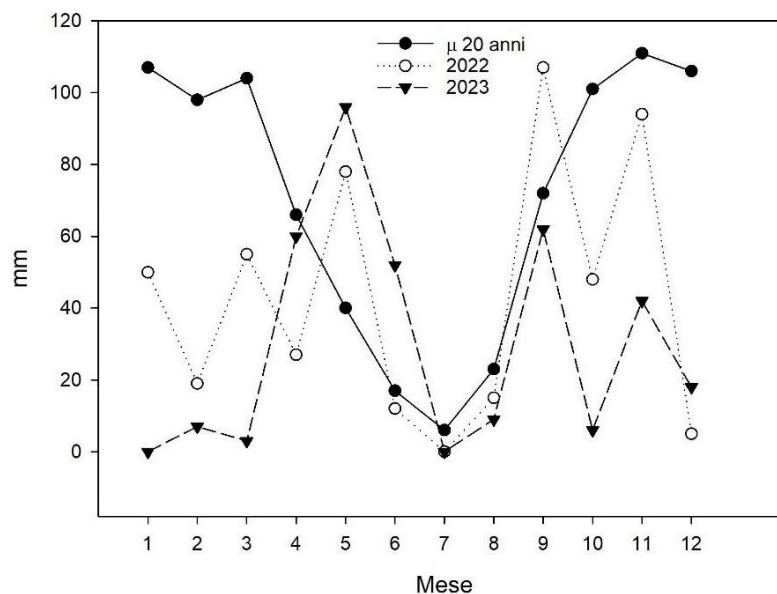


Figura 2. Andamento mensile delle precipitazioni (mm) nel 2022 e 2023, rispetto alla media del ventennio 2001-2021.

2.3.2 Vigore Agronomico dei Punti di Monitoraggio

L'analisi della varianza ha mostrato che né il fattore "anno" ($p = 0.124$), né l'interazione tra zona e anno ($p = 0.924$) hanno avuto un effetto significativo sul peso del legno di potatura. Al contrario, il fattore "zona" ha inciso significativamente su questo parametro ($p = 0.004$), evidenziando differenze tra i punti di monitoraggio. I risultati riportati in Figura 3 indicano che le zone 3 e 5, con medie rispettivamente di 475 g e 393 g, non risultano significativamente differenti tra loro, ma lo sono rispetto a tutti gli altri punti e presentano i valori più elevati di peso del legno. Le zone 2 e 6, con medie di 330 g e 310 g, mostrano valori intermedi, mentre le zone 1 e 4, con valori di 214 g e 184 g, si distinguono per valori significativamente più bassi. Sulla base di queste evidenze, le sei zone di monitoraggio sono state raggruppate in tre classi di vigore per consentire un confronto più dettagliato tra le diverse condizioni di sviluppo vegetativo. Come riportato in figura 4, l'analisi statistica condotta su questi gruppi ha confermato che il solo fattore vigore ha avuto un effetto significativo sul peso del legno ($p = 0.000$), mentre né il fattore anno ($p = 0.116$) né la loro interazione ($p = 0.957$) hanno mostrato differenze statisticamente rilevanti. Questi risultati confermano la presenza di un chiaro gradiente di vigore all'interno del vigneto, riflesso dalle differenze di biomassa legnosa tra i gruppi individuati.

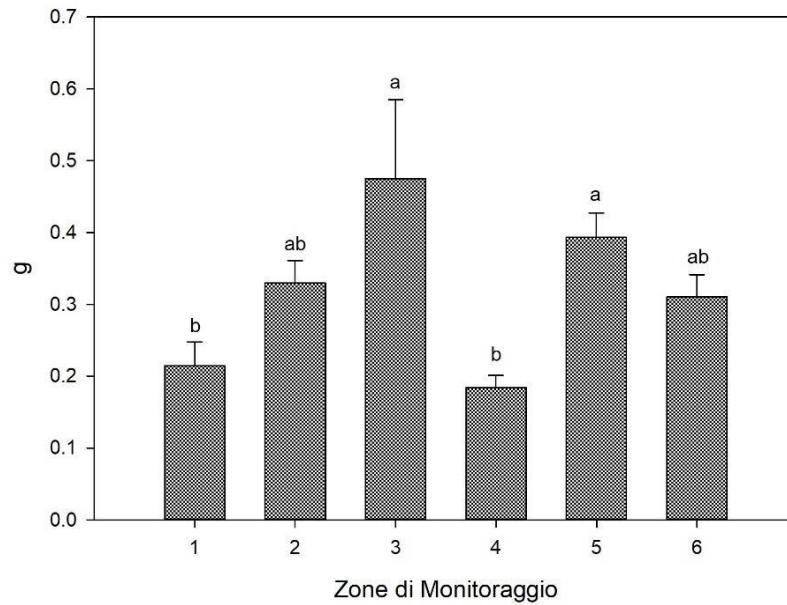


Figura 3. Peso del legno di potatura (g) nelle sei zone di monitoraggio (media $\pm$ errore standard). Le lettere indicano differenze significative tra le zone ($p < 0.05$). I valori riportati rappresentano la media dei due anni di osservazione (2022 e 2023), in quanto l'effetto dell'anno non è risultato statisticamente significativo. Ogni punto è calcolato su un totale di 12 osservazioni (6 piante $\times$ 2 anni).

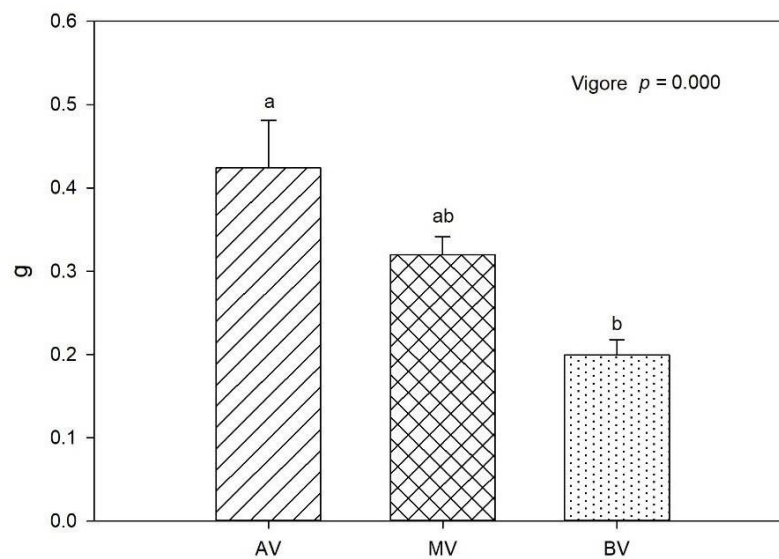


Figura 4 Peso del legno di potatura (g) nei tre livelli di vigore: AV (alto vigore), MV (medio vigore) e BV (basso vigore). I valori sono espressi come media $\pm$ errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore ($p < 0.05$). Poiché l'effetto dell'anno non è risultato significativo, i dati presentati rappresentano la media dei due anni di osservazione (2022 e 2023). Per ciascun livello di vigore, ogni valore è stato calcolato su un totale di 24 osservazioni (6 piante $\times$ 2 zone $\times$ 2 anni).

2.3.3 Distribuzione e Stabilità Spazio-Temporale dei Valori NDVI

L'analisi dei valori NDVI ha evidenziato una stretta relazione con il vigore agronomico delle viti. Il fattore vigore e l'epoca di rilievo hanno influenzato significativamente i valori NDVI ($p = 0.000$ per entrambi), con un'interazione significativa tra i due fattori ($p = 0.019$). Al contrario, la non significatività del fattore anno ($p = 0.520$) indica che, nonostante eventuali variazioni climatiche tra le due stagioni, la distribuzione della vigoria è rimasta stabile.

I valori NDVI rilevati a giugno (BBCH 75) sono sistematicamente più elevati rispetto a quelli di agosto (BBCH 89) (Figura 5). Questa progressiva riduzione della risposta spettrale con l'avanzare della stagione vegetativa suggerisce una variazione intra-annuale legata alla fisiologia della vite nelle due fasi fenologiche indagate.

Tuttavia, indipendentemente dall'anno e dal mese di rilievo, si mantiene un chiaro gradiente di vigore: la categoria AV presenta sempre i valori più elevati, seguita da MV e BV. Inoltre, il confronto tra gli anni mostra che le variazioni nei valori medi di NDVI all'interno di ciascuna classe di vigoria sono minime, confermando una stabilità spazio-temporale. A supporto di queste evidenze, i dati ottenuti sono stati elaborati per la produzione di mappe di zonazione, finalizzate a rappresentare graficamente la distribuzione del vigore vegetativo nel vigneto. Le mappe NDVI (Figure 6a-b, 7a-b) costituiscono una rappresentazione visiva delle differenze descritte in precedenza, evidenziando la distribuzione spaziale del gradiente di vigore nelle diverse epoche di rilievo e tra le due stagioni considerate.

In entrambe le epoche fenologiche e gli anni di monitoraggio, le mappe mostrano una chiara distinzione tra le zone a vigore alto, medio e basso, le quali risultano ben definite e coerenti nel tempo. La stabilità spaziale e temporale del gradiente di vigore è ulteriormente evidenziata dalla consistenza dei valori NDVI per ciascuna classe, riflettendo fedelmente quanto emerso dall'analisi statistica.

In particolare, l'evoluzione cromatica osservabile nelle mappe tra giugno e agosto evidenzia una riduzione progressiva dei valori NDVI con l'avanzare della stagione. Questa transizione, caratterizzata da una variazione verso tonalità rappresentative di valori inferiori di NDVI, indica una diminuzione del vigore vegetativo delle viti, coerente con i

cambiamenti fisiologici legati alle diverse fasi fenologiche. Tale comportamento sottolinea l'utilità delle mappe NDVI come strumento integrativo per la visualizzazione e l'interpretazione spaziale delle dinamiche di vigore nel vigneto, garantendo un valido supporto alla gestione agronomica di precisione.

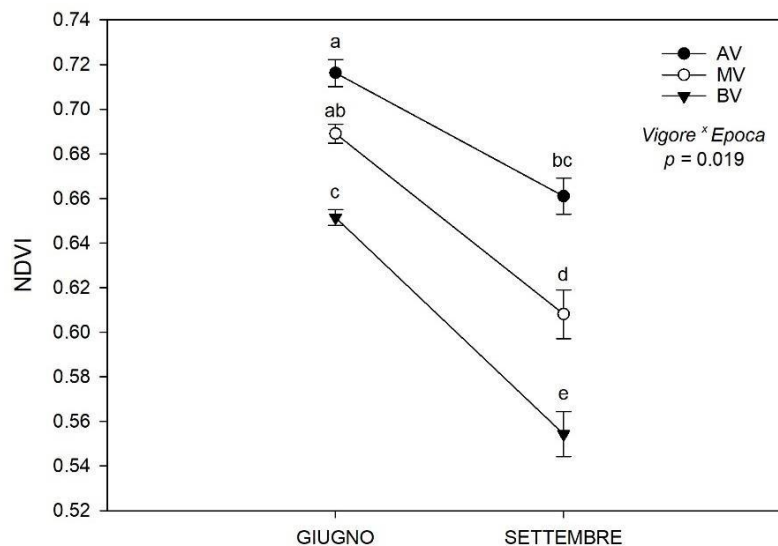


Figura 5. Andamento dei valori NDVI in relazione all'epoca di rilievo e ai livelli di vigore. La figura mostra un'interazione positiva tra il vigore e l'epoca di rilevamento. Le lettere indicano differenze significative tra le zone ($p < 0.05$).

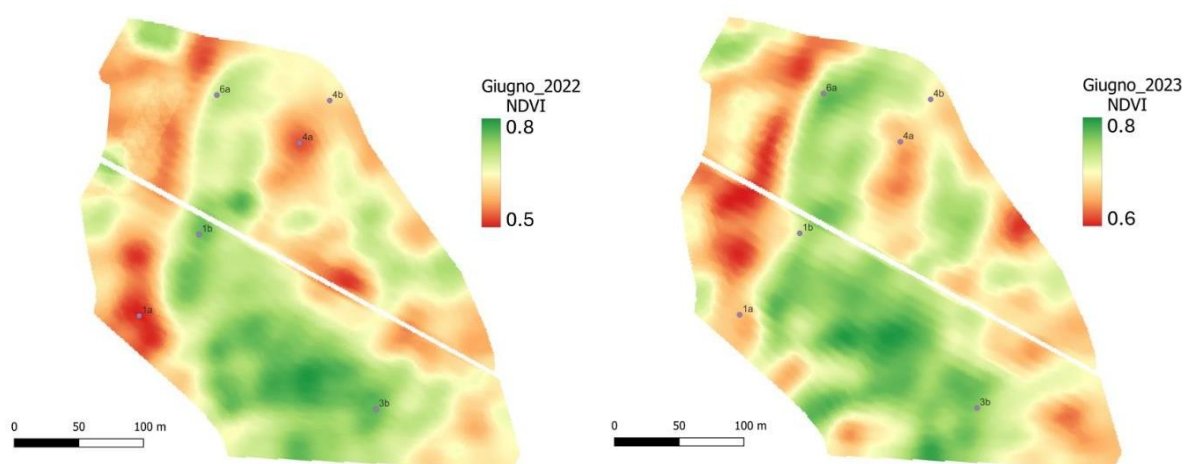


Figura 6. Mappe tematiche dei valori NDVI rappresentative delle zone di vigore a giugno nei due anni di sperimentazione

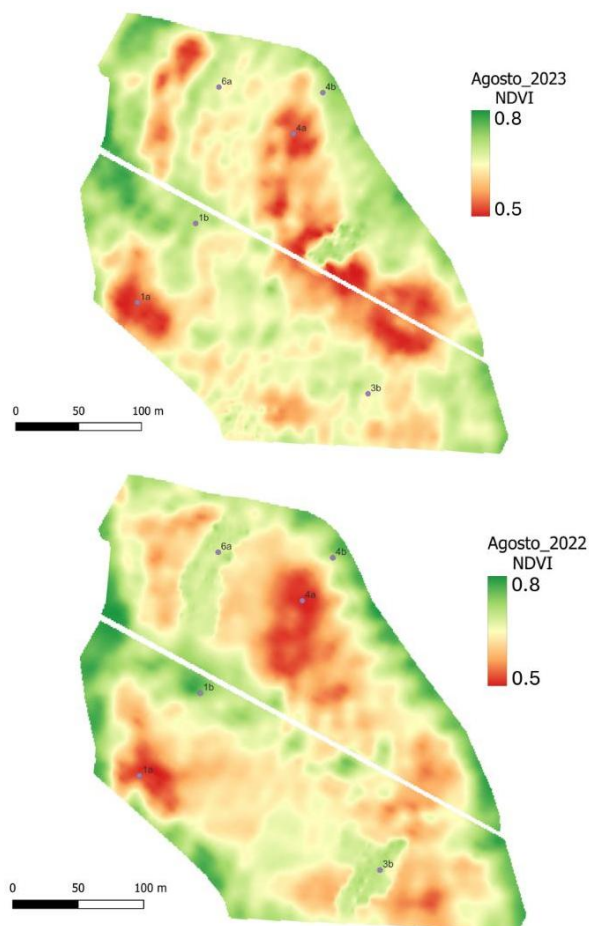


Figura 7. Mappe tematiche dei valori NDVI rappresentative delle zone di vigore ad agosto nei due anni di sperimentazione

2.3.4 Caratteristiche del Suolo

I risultati in tabella 2 sottolineano specifiche differenze nelle caratteristiche chimico-fisiche del suolo in funzione del livello di vigore delle viti. Il contenuto di sabbia risulta massimo nei suoli associati al livello MV, con un valore medio di 437 ± 21.5 g/kg s.s., seguito da AV (132.7 ± 18.8 g/kg s.s.) e infine BV con 94 ± 15.0 g/kg s.s.. Il limo presenta la massima concentrazione nei suoli BV (459.5 ± 25.5 g/kg s.s.) e valori minori nelle zone MV (244 ± 27.0 g/kg s.s.). Le zone ad alto vigore mostrano invece un contenuto intermedio di 382.7 ± 13.7 g/kg s.s. Per quanto riguarda l'argilla, si osservano valori elevati per i livelli AV (484.7 ± 13.1 g/kg s.s.) e BV (446.5 ± 50.0 g/kg s.s.), mentre i suoli MV mostrano una ridotta presenza di questa frazione granulometrica (319 ± 36.5 g/kg s.s.).

Dal punto di vista chimico, la sostanza organica (S.O.), raggiunge i valori ottimali solo nel caso di AV (24.813 ± 0.51 g/kg s.s.), mentre tende a ridursi nei livelli MV (17.1 ± 2.87 g/kg s.s.) e BV (16.95 ± 2.51 g/kg s.s.). Una

simile tendenza si osserva per l'azoto totale, che supera il valore di 1 g/kg s.s. solo nei suoli AV (1.42 ± 0.03 g/kg s.s.) e MV (1.03 ± 0.11 g/kg s.s.), risultando inferiore nei suoli BV (0.985 ± 0.16 g/kg s.s.). Mediamente, il fosforo assimilabile presenta concentrazioni contenute in tutti i livelli di vigore, con un valore massimo di 4.5 ± 1.11 mg/kg s.s. nei suoli MV.

Infine, il potassio e la capacità di scambio cationico (CSC) mostrano differenze tra i livelli di vigore. Il potassio di scambio raggiunge il massimo valore nei suoli BV (0.74 ± 0.04 meq/100 g s.s.) e il minimo nei suoli MV (0.56 ± 0.08 meq/100 g s.s.). La CSC segue un andamento simile, risultando maggiore nei suoli AV (32.43 ± 1.60 meq/100 g s.s.) rispetto ai livelli MV (21.26 ± 2.18 meq/100 g s.s.) e BV (23.92 ± 1.48 meq/100 g s.s.).

Tab. 2. Caratteristiche medie del suolo in relazione al livello di vigore

	AV	MV	BV
Sabbia (g/kg s.s.)	132.7 ± 18.8	437 ± 21.5	94 ± 15.0
Limo (g/kg s.s.)	382.7 ± 13.7	244 ± 27.0	459.5 ± 25.5
Argilla (g/kg s.s.)	484.7 ± 13.1	319 ± 36.5	446.5 ± 50.0
S.O. (g/kg s.s.) (>20)	24.813 ± 0.51	17.1 ± 2.87	16.95 ± 2.51
Azoto totale (g/kg s.s.) (>1)	1.42 ± 0.03	1.03 ± 0.11	0.985 ± 0.16
Fosforo assimilabile (mg/kg s.s.)	3.333 ± 0.88	4.5 ± 1.11	2 ± 0.41
Potassio di scambio (meq/100 g s.s.)	0.6333 ± 0.05	0.56 ± 0.08	0.74 ± 0.04
C.S.C. (meq/100 g s.s.)	32.43 ± 1.60	21.26 ± 2.18	23.92 ± 1.48

2.3.5 Componente vegetativa

2.3.5.1 *Lunghezza dei Germogli e Superficie Fogliare dell'Asse*

La lunghezza dei germogli è stata significativamente influenzata sia dal fattore anno ($p = 0.006$) sia dal livello di vigore ($p < 0.001$). L'analisi condotta per singolo anno ha mostrato che, nel 2022, la lunghezza dei germogli non ha subito variazioni significative tra le due epoche di rilievo ($p = 0.977$). Tuttavia, come illustrato in tabella 3, essa è risultata significativamente diversa tra i livelli di vigore ($p < 0.001$), con le piante BV che hanno registrato valori inferiori rispetto agli altri due gruppi. Nello stesso anno, la superficie fogliare dell'asse è stata influenzata sia dal livello di vigore sia dall'epoca di rilievo, con

una significativa interazione tra i due fattori. In particolare, a giugno (BBCH 75), le piante MV hanno mostrato una superficie fogliare superiore di quasi il 30% rispetto alle piante AV (Tab. 3). Tuttavia, a fine settembre, la distribuzione dei valori è cambiata: i germogli delle piante AV hanno registrato una superficie fogliare media di 1885 cm², con una riduzione dell'8% rispetto a giugno. Al contrario, la superficie fogliare media per germoglio delle piante MV è diminuita del 33%, raggiungendo 1744 cm². Le piante BV hanno mostrato una tendenza differente: indipendentemente dall'epoca di rilievo, i loro valori sono rimasti significativamente inferiori rispetto agli altri gruppi. Già a giugno, la superficie fogliare del germoglio BV era inferiore rispetto alle altre classi, e la differenza si è ulteriormente accentuata a settembre. In particolare, la superficie fogliare media di questa categoria è risultata inferiore di circa il 50% rispetto alla media nelle piante AV e MV nello stesso periodo (Tab. 3). Complessivamente, mentre le piante AV hanno mantenuto valori relativamente stabili tra le due epoche di rilievo, MV e BV hanno subito una riduzione significativa, sebbene con entità diversa, risultando comunque significativamente distinte tra loro, con valori più elevati per MV. L'analisi delle cause di questa riduzione suggerisce che la variazione osservata sia principalmente attribuibile alla diminuzione del numero di foglie per germoglio. Questo parametro è stato significativamente influenzato sia dal livello di vigore sia dall'epoca di rilievo, con una significativa interazione tra i due fattori. Come illustrato in Figura 8, a giugno le piante MV presentavano mediamente 25 foglie per germoglio, rispetto alle 19 e 20 foglie registrate nelle classi AV e BV. Tuttavia, a settembre si è osservato un cambiamento di tendenza: le piante MV hanno subito una riduzione di sei foglie per germoglio, raggiungendo un valore medio di 19 foglie, mentre le piante AV sono rimaste stabili (20 foglie in media) e quelle BV hanno registrato un calo più marcato, con una media di 14 foglie. Questi risultati confermano che la filloptosi rappresenta il principale fattore responsabile della riduzione della superficie fogliare dell'asse. Nel 2023, le stesse analisi hanno mostrato che la lunghezza dei germogli non è stata significativamente influenzata dal livello di vigore ($p = 0.272$), nonostante si osservi una tendenza. In contrasto, la differenza tra le due epoche di rilievo è risultata significativa, mentre l'interazione tra vigore ed epoca non ha raggiunto la significatività statistica. Come evidenziato in tabella 3, indipendentemente dal livello di vigore, la lunghezza del germoglio è aumentata di circa il 30% tra giugno e i primi giorni di settembre. L'analisi della superficie fogliare dell'asse ha evidenziato un effetto significativo sia del livello di vigore sia dell'epoca di rilievo; tuttavia, non si può dire lo stesso per la loro interazione. Nel 2023 l'andamento è simile a quello osservato nel 2022, con MV che presenta valori più elevati (pur senza differenze significative rispetto ad AV), mentre entrambe le categorie si

discostano leggermente dai valori medi registrati per BV. A settembre, la riduzione della superficie fogliare osservata nel 2022 si ripropone anche nel 2023, con AV che mostra il calo più marcato (-50%), seguito da BV (-35%) e MV (-28%). Un'analisi simile emerge considerando il numero medio di foglie per germoglio: MV è passata da circa 22 a 18 foglie, AV da 22 a 11 e BV da 19 a 12 (fig. 9). Complessivamente, BV ha mantenuto un comportamento costante nei due anni, rappresentando la categoria con il minor sviluppo vegetativo. Al contrario, AV e MV hanno mostrato un andamento variabile. Infine, è importante notare le differenze nella superficie fogliare tra le due stagioni. Nel 2022, AV e MV hanno registrato valori di 1885 e 1744 cm², significativamente superiori rispetto ai 960 e 640 cm² del 2023. Anche BV ha mostrato un calo, passando da 891 cm² nel 2022 a 625 cm² nel 2023.

Questi dati evidenziano una variabilità stagionale significativa nello sviluppo vegetativo, con una maggiore stabilità per BV e una dinamica più variabile per AV e MV.

Tab. 3. Lunghezza dei germogli e superficie fogliare dell'asse media per germoglio, misurati nelle diverse classi di vigore (AV, MV, BV), nelle due epoche di rilievo (GIUGNO, SETTEMBRE) per gli anni 2022 e 2023.

LUNGHEZZA GERMOGLI (cm)					SUPERFICIE FOGLIARE ASSE (cm ²)				
2022	GIUGNO		SETTEMBRE	Media	2022	GIUGNO		SETTEMBRE	Media
AV	136.3 ± 6.2	n.s.	135.2 ± 6.0	135.8 ± 6.1 A	AV	2043.0 ± 83.8	b	1884.6 ± 85.0 bc	1963.8 ± 84.4 A
MV	136.7 ± 8.1		132.7 ± 3.7	134.7 ± 5.9 A	MV	2588.1 ± 130.0	a	1744.3 ± 66.2 bc	2166.3 ± 98.1 A
BV	87.60 ± 8.3		92.25 ± 3.5	89.9 ± 5.9 B	BV	1589.7 ± 173.0	c	891.6 ± 62.3 d	1240.7 ± 117.7 B
Media	120.2 ± 7.5		120.1 ± 4.5 N.S.		Media	2073.6 ± 128.9	A	1506.8 ± 71.2 B	
2023	GIUGNO		SETTEMBRE	Media	2023	GIUGNO		SETTEMBRE	Media
AV	121.3 ± 6.7	n.s.	148.6 ± 7.6	134.9 ± 7.2 N.S.	AV	1315.0 ± 26.8	n.s.	642.5 ± 59.2	978.7 ± 43 AB
MV	115.2 ± 5.5		150.9 ± 8.6	133.0 ± 7.1	MV	1341.6 ± 36.9		961.1 ± 112	1151.3 ± 74.5 A
BV	105.7 ± 6.3		142.8 ± 6.7	124.2 ± 6.5	BV	1133.0 ± 65.8		625.0 ± 44.3	879.0 ± 55.1 B
Media	114.0 ± 6.2	B	147.4 ± 7.6 A		Media	1263.2 ± 43.2	A	742.8 ± 71.8 B	

I dati sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$), "n.s." differenze non significative. Le lettere maiuscole evidenziano differenze significative tra le classi di vigore indipendentemente dall'epoca di misurazione o tra le epoche indipendentemente dalla classe di vigore. Le lettere minuscole indicano differenze significative dovute all'interazione tra classe di vigore ed epoca di misurazione.

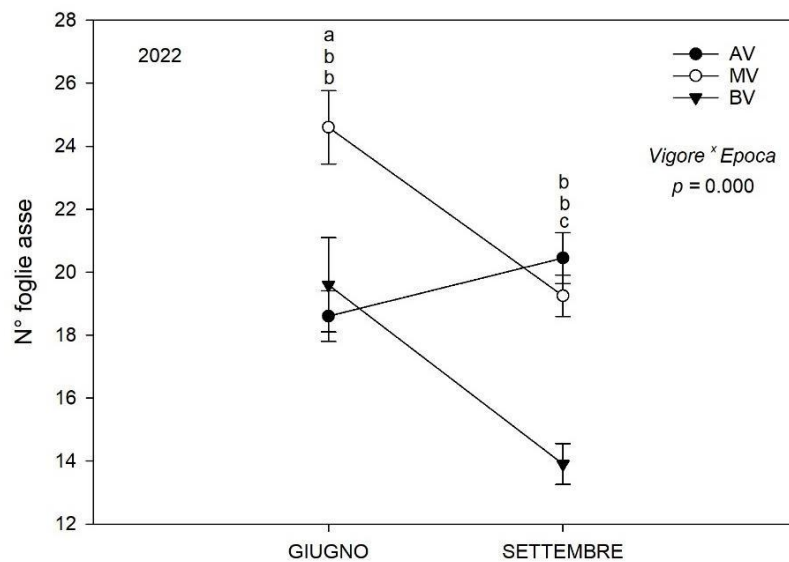


Figura 8. Numero di foglie dell'asse nel **2022** in relazione all'epoca di rilievo e ai tre livelli di vigore.

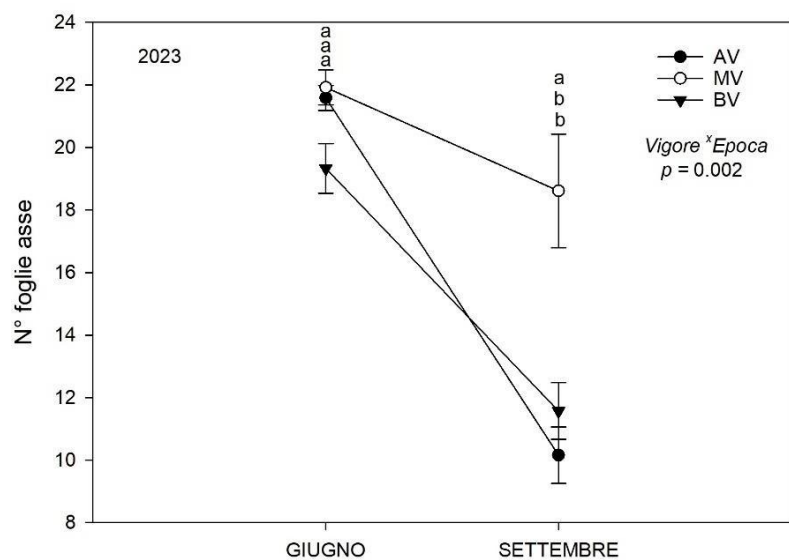


Figura 9. Numero di foglie dell'asse nel **2023** in relazione all'epoca di rilievo e ai tre livelli di vigore.

2.3.5.2 Superficie Fogliare delle Femminelle

Nel 2022, la superficie fogliare delle femminelle è stata significativamente influenzata dal livello di vigore, mentre né l'epoca di rilievo (giugno vs. settembre) né l'interazione tra i due fattori hanno mostrato effetti statisticamente rilevanti. Come riportato in Tabella 4, MV ha sviluppato una superficie fogliare nelle femminelle significativamente maggiore rispetto a BV, con un incremento superiore al 100% mentre, rispetto ad AV, l'aumento è stato più

contenuto, pari a circa il 10%. Tali differenze suggeriscono un effetto strutturale del vigore sulla capacità di emissione e sviluppo delle femminelle, indipendentemente dallo stadio fenologico.

Nel 2023, oltre al livello di vigore, anche l'epoca di rilievo ha influenzato significativamente la superficie fogliare mentre, l'assenza di interazione tra i due fattori, indica che la risposta delle diverse classi di vigore è stata omogenea nel corso della stagione. Pur mantenendo un trend simile all'anno precedente, nel 2023 AV ha mostrato il maggiore sviluppo laterale, con un incremento del 5% rispetto a MV e del 42% rispetto a BV. Inoltre, la riduzione osservata tra giugno e settembre è risultata statisticamente significativa per tutte le classi di vigore, con un calo medio del 30%, confermando un fisiologico declino della superficie fogliare secondaria nella fase avanzata della stagione.

Tab. 4. Superficie fogliare delle femminelle media per germoglio, misurata nelle diverse classi di vigore (AV, MV, BV), nelle due epoche di rilievo (GIUGNO, SETTEMBRE) per gli anni 2022 e 2023.

SUPERFICIE FOGLIARE FEMMINELLE (cm ²)					
2022	GIUGNO		SETTEMBRE		Media
AV	905.2 ± 190.0	n.s.	1112.3 ± 196.0		1008.7 ± 84.4 AB
MV	989.5 ± 202.0		1234.5 ± 314.0		1112.0 ± 98.1 A
BV	675.4 ± 120.0		406.9 ± 59.9		541.2 ± 117.7 B
Media	856.7 ± 170.6		917.9 ± 189.9	N.S.	
2023	GIUGNO		SETTEMBRE		Media
AV	1345.3 ± 139.0	n.s.	1087.1 ± 280.0		1216.2 ± 43 A
MV	1386.2 ± 130.0		929.7 ± 109.0		1158.0 ± 74.5 AB
BV	1045.0 ± 74.0		672.5 ± 78.3		858.7 ± 55.1 B
Media	1258.8 ± 114.3	A	896.4 ± 155.8	B	

I dati sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$), "n.s." differenze non significative. Le lettere maiuscole indicano differenze significative tra le classi di vigore indipendentemente dall'epoca di misurazione o tra le epoche indipendentemente dalla classe di vigore. Le lettere minuscole indicano differenze significative dovute all'interazione tra classe di vigore ed epoca di misurazione.

2.3.5.3 *Superficie Fogliare a Germoglio e a Pianta*

La superficie fogliare complessiva del germoglio, nel 2022 è risultata significativamente influenzata dal livello di vigore e dall'epoca di rilievo mentre non si è riscontrata alcuna interazione tra i due fattori. I germogli delle categorie AV e MV hanno mostrato valori simili, pari rispettivamente a 2.973 e 3.278 cm², senza differenze statisticamente significative tra loro (Tab. 5). Al contrario, BV ha registrato valori significativamente inferiori, con una superficie fogliare a germoglio pari a 1.782 cm². Anche l'epoca di rilievo ha avuto un effetto significativo: a giugno, la superficie fogliare per germoglio era superiore rispetto a settembre, con un incremento medio del 20% nelle prime fasi della stagione. Nel 2022, indipendentemente dal livello di vigore, la superficie fogliare del germoglio era costituita in media per il 68% da foglie dell'asse principale (66% per AV e MV, 70% per BV). La restante quota, pari al 32%, era rappresentata dalle foglie delle femminelle, con una distribuzione simile per AV e MV (34%) e leggermente inferiore per BV (30%) (Fig. 10); questa ripartizione ha influenzato direttamente la superficie fogliare totale per pianta. In particolare, AV e MV hanno registrato rispettivamente 3,10 m² e 3,25 m², contro 1,74 m² di BV (Tab. 5). Anche l'epoca di rilievo ha influito su questo parametro, con una riduzione del 20 % della superficie fogliare media per pianta passando da 2,94 m² a giugno a 2,45 m² a settembre.

Nel 2023 l'analisi ANOVA ha confermato le tendenze osservate nell'anno precedente. La superficie fogliare del germoglio ha mantenuto differenze significative tra le classi di vigore, con AV e MV che hanno registrato valori simili (~2.195 cm² e ~2.309 cm², rispettivamente), entrambi superiori rispetto ai ~1.709 cm² di BV. Anche la riduzione stagionale è stata marcata, con una diminuzione da 2.522 cm² a 1.621 cm² tra giugno e settembre. Tuttavia, un'importante differenza tra le due annate riguarda la composizione della superficie fogliare del germoglio. Se nel 2022 la componente dominante era rappresentata dalle foglie dell'asse principale, nel 2023 si è osservato un netto incremento dell'incidenza delle femminelle.

Queste hanno raggiunto in media il 52% della superficie fogliare complessiva, con valori pari al 55% per AV, 51% per MV e 48% per BV, superando così la quota dell'asse principale, che si attestava al 48% (45% AV, 50% MV, 49% BV) (Fig. 10). Infine, i dati a livello di pianta confermano con coerenza le differenze tra i livelli di vigore, rafforzando le tendenze precedentemente descritte (Tab. 5).

Tab. 5. Superfici fogliari germoglio e per pianta misurate nelle diverse classi di vigore (AV, MV, BV), nelle due epoche di rilievo (GIUGNO, SETTEMBRE) per gli anni 2022 e 2023.

SUPERFICIE FOGLIARE TOTALE DEL GERMOGLIO (cm ²)					SUPERFICIE FOGLIARE MEDIA PER PIANTA (m ²)				
2022	GIUGNO	SETTEMBRE	Media		2022	GIUGNO	SETTEMBRE	Media	
AV	2948.2 ± 237.0	n.s. 2996.9 ± 253.0	2972.5 ± 245.0	A	AV	3.1 ± 0.27	n.s. 3.1 ± 0.27	3.1 ± 0.27	A
MV	3577.6 ± 310.0	2978.7 ± 330.0	3278.1 ± 320.0	A	MV	3.5 ± 0.30	3.0 ± 0.41	3.3 ± 0.36	A
BV	2265.1 ± 274.0	1298.6 ± 77.7	1781.8 ± 175.8	B	BV	2.2 ± 0.29	1.3 ± 0.07	1.7 ± 0.18	B
Media	2930.3 ± 273.6	A 2424.7 ± 220.3	B		Media	2.9 ± 0.29	A 2.5 ± 0.25	B	
2023	GIUGNO	SETTEMBRE	Media		2023	GIUGNO	SETTEMBRE	Media	
AV	2660.3 ± 161.0	n.s. 1729.6 ± 268.0	2194.9 ± 214.5	A	AV	2.6 ± 0.18	1.7 ± 0.24	2.1 ± 0.21	A
MV	2727.7 ± 156.0	1890.9 ± 171.0	2309.3 ± 163.5	A	MV	2.7 ± 0.18	1.8 ± 0.16	2.3 ± 0.17	A
BV	2178.0 ± 73.3	1241.4 ± 80.1	1709.7 ± 76.3	B	BV	2.2 ± 0.14	1.3 ± 0.10	1.7 ± 0.12	B
Media	2522.0 ± 130.1	A 1620.6 ± 173.0	B		Media	2.5 ± 0.17	A 1.6 ± 0.25	B	

I dati sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$), "n.s." differenze non significative. Le lettere maiuscole evidenziano differenze significative tra le classi di vigore indipendentemente dall'epoca di misurazione o tra le epoche indipendentemente dalla classe di vigore. Le lettere minuscole indicano differenze significative dovute all'interazione tra classe di vigore ed epoca di misurazione.

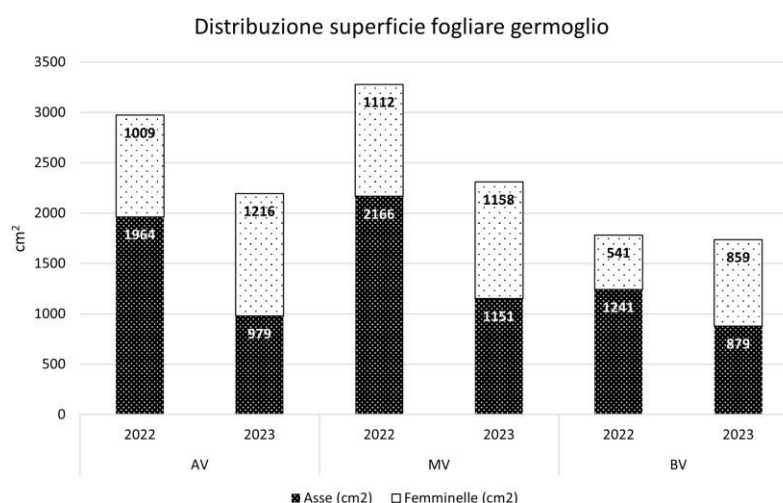


Figura 10. Distribuzione della superficie fogliare del germoglio tra l'asse principale e le femminelle, in relazione ai tre livelli di vigore, nelle due stagioni dello studio.

2.3.6 Stato Nutrizionale delle Foglie

2.3.6.1 Clorofilla

Nel 2022, i risultati mostrano un andamento non uniforme del contenuto di Chl in relazione alle date di rilievo e al livello di vigore (Figura 11). Le foglie delle viti MV hanno costantemente registrato i valori più elevati di Chl, raggiungendo un picco significativo di $29 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ a metà giugno. In confronto, le viti AV hanno mostrato valori iniziali di Chl simili a MV, ma una diminuzione progressiva nelle epoche successive, stabilizzandosi intorno a $25 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Le viti BV hanno mantenuto valori di Chl inferiori in tutte le epoche, con un calo significativo da 24 a $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ tra giugno e agosto. Questi dati evidenziano che, nel 2022, la capacità fotosintetica delle foglie variava in modo significativo in funzione del vigore, con differenze particolarmente marcate durante la fase iniziale della stagione. Nel 2023, il contenuto di Chl ha mostrato dinamiche diverse rispetto all'anno precedente, con un'interazione più evidente tra vigore ed epoca (Figura 12). Le viti AV hanno registrato un aumento progressivo del contenuto di Chl, partendo da valori comparabili con BV e MV a giugno ($\sim 22 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) e raggiungendo il picco massimo di $27,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ a fine agosto. Le viti MV hanno seguito una tendenza simile, ma con valori leggermente inferiori (da 20 a $25 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). Le viti BV, invece, hanno mostrato una progressione meno marcata, mantenendo valori significativamente inferiori rispetto ad AV e MV per tutta la stagione, con un massimo di $21 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ a fine agosto. Confrontando i due anni, emerge che le viti AV e MV tendono a conservare un contenuto di clorofilla relativamente stabile o in crescita durante la stagione, mentre quelle a BV mostra livelli di Chl significativamente inferiori, indicativi di una più limitata capacità fotosintetica.

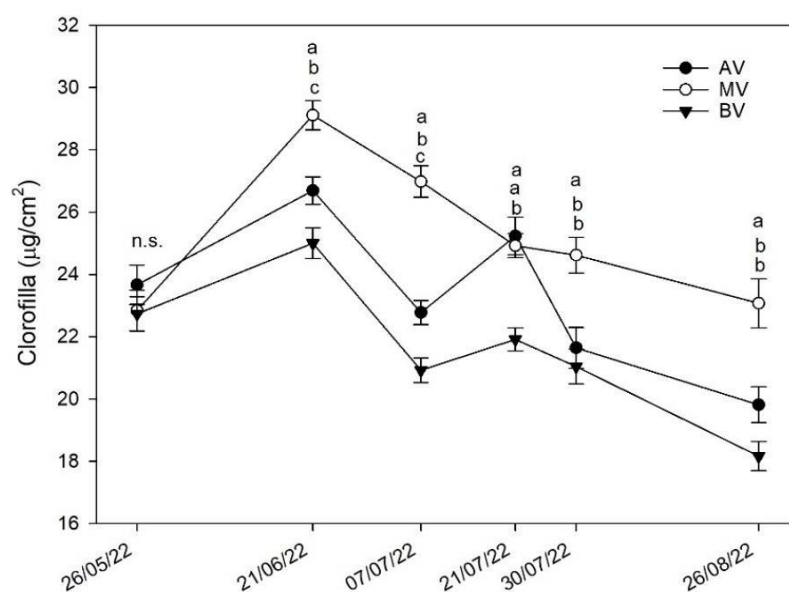


Figura 11. Andamento del contenuto di clorofilla fogliare ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) durante la stagione 2022. I valori rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

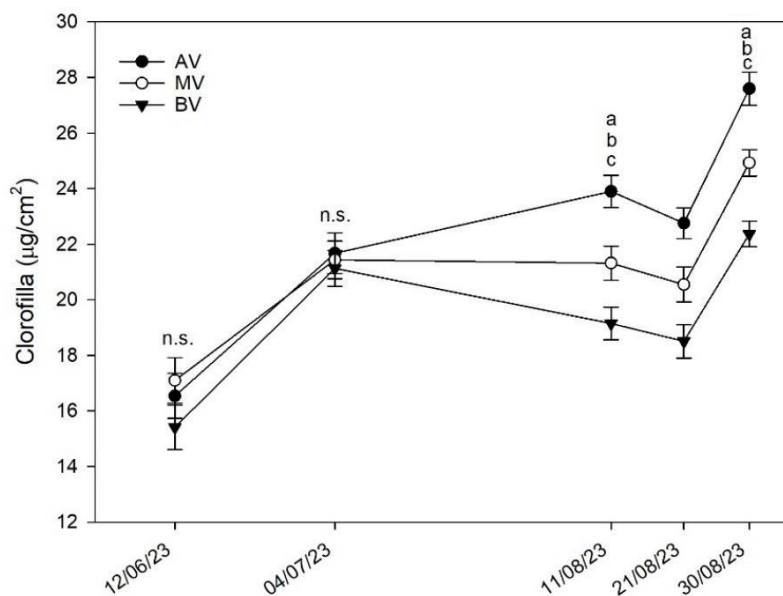


Figura 12. Andamento del contenuto di clorofilla fogliare ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) durante la stagione **2023**. I valori rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

2.3.6.2 Antociani Fogliari

L'analisi degli antociani fogliari nei due anni di studio ha evidenziato differenze significative nel tempo e tra i livelli di vigore, fornendo un quadro chiaro delle dinamiche di accumulo di questi composti nelle foglie.

Nel 2022, i valori iniziali di antociani (26 maggio) non hanno mostrato differenze significative tra i livelli di vigore.

Tuttavia, a partire dal 21 giugno, le piante BV hanno iniziato a differenziarsi, mostrando una leggera ma significativa tendenza verso valori superiori rispetto alle categorie AV e

MV. Come mostrato in figura 13, questa divergenza si è progressivamente accentuata nel corso della stagione, raggiungendo il massimo il 26 agosto, quando le piante BV hanno registrato i valori più alti ($0,16 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), significativamente superiori a quelli osservati per AV ($0,10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) e MV ($0,12 \mu\text{g}/\text{cm}^2$).

Il 2023 ha mostrato dinamiche iniziali diverse, con valori più elevati nelle fasi precoci rispetto al 2022. Anche in questo caso, non sono state riscontrate differenze significative tra i livelli di vigore nei primi stadi della stagione (fig. 14). Tuttavia, il calo registrato il 4 luglio è stato più marcato per le piante a maggiore vigore (AV e MV), con una riduzione del contenuto di antociani a circa $0,03 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, mentre le piante BV hanno mantenuto valori leggermente superiori ($0,04 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). A metà stagione (21 agosto), BV ha mostrato un aumento significativo, raggiungendo valori di $0,07 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, superiori rispetto a MV ($0,05 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) e AV ($0,03 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). Verso la fine della stagione (30 agosto), il contenuto di antociani si è stabilizzato, mantenendo le tendenze osservate, con BV che ha continuato a registrare valori più alti rispetto agli altri livelli di vigore.

Confrontando i due anni, si evidenzia una maggiore variabilità nei livelli di antociani nel 2023, probabilmente attribuibile a differenze nelle condizioni ambientali tra le stagioni. Tuttavia, in entrambi gli anni, BV ha mostrato una tendenza costante ad accumulare maggiori quantità di antociani rispetto a AV e MV, specialmente nelle fasi avanzate della stagione.

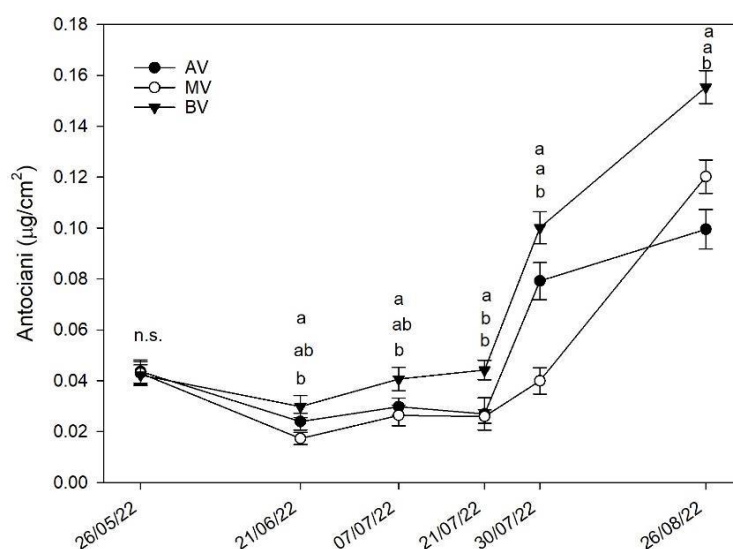


Figura 13. Andamento del contenuto di antociani fogliari ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) durante la stagione **2022**. I valori rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

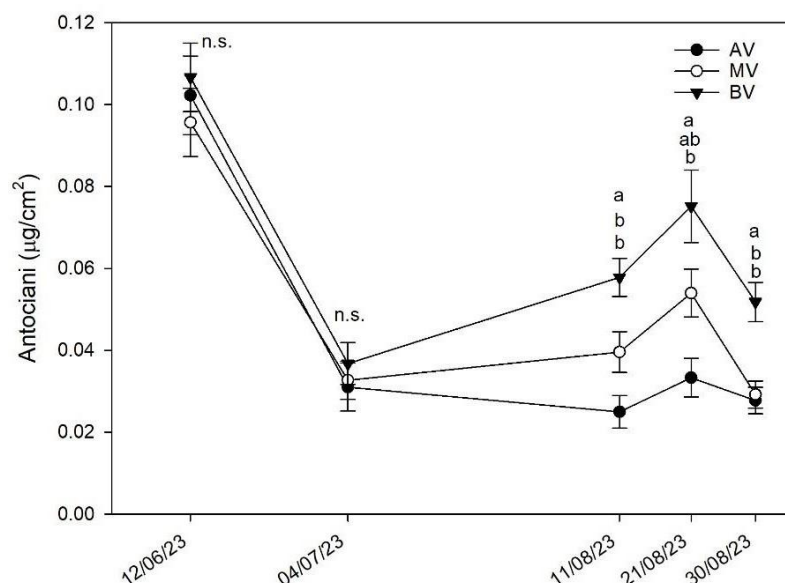


Figura 14. Andamento del contenuto di antociani fogliari ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) durante la stagione **2023**. I valori rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

2.3.6.3 Nitrogen Balance Index (NBI)

Nel 2022, i valori medi di NBI hanno mostrato una diminuzione progressiva durante la stagione vegetativa per tutti i gruppi di vigore. Tuttavia, AV ha mantenuto valori di NBI significativamente superiori rispetto a BV, con MV che presenta valori intermedi (fig. 15). Ad esempio, il valore medio di NBI per AV al primo campionamento (26/05/2022) era pari a circa 45, rispetto a 30 per MV e 25 per BV, con una differenza significativa tra AV e BV. In epoche più avanzate della stagione (26/08/2022), i valori medi di NBI sono scesi a circa 20 per BV, 25 per MV e 30 per AV.

Le differenze tra i livelli di vigore sono risultate significative in diverse date di campionamento, con una netta separazione tra AV e BV, mentre MV ha mostrato una maggiore variabilità, sovrapponendosi parzialmente a entrambi gli altri gruppi. Nel 2023, l'andamento del NBI ha mostrato una tendenza simile a quella osservata nel 2022, con differenze più marcate nelle prime fasi della stagione (fig. 16). In particolare, il gruppo AV ha evidenziato un picco pronunciato a inizio luglio (04/07/2023), con un valore medio di circa 60, significativamente più alto rispetto a MV (40) e BV (20). Alla fine della stagione (30/08/2023), i valori medi sono diminuiti a 25 per BV, 30 per MV e 35 per AV, mostrando un comportamento analogo a quello osservato nel 2022. In entrambi gli anni, il vigore si è

confermato un fattore determinante nel modulare il valore di NBI, riflettendo probabilmente differenze nella capacità di assorbimento e utilizzo dell'azoto tra le piante di diverso vigore. La riduzione generale del NBI in entrambi gli anni può essere attribuita alla progressiva maturazione delle foglie e alla diminuzione dell'attività fotosintetica durante la stagione.

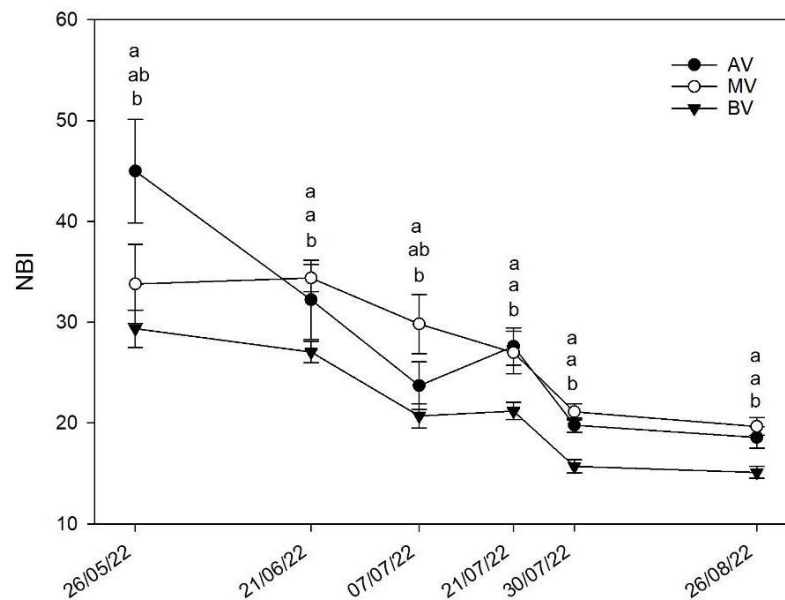


Figura 15. Andamento del valore di Nitrogen Balance Index (NBI) nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) durante la stagione 2022. I valori rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

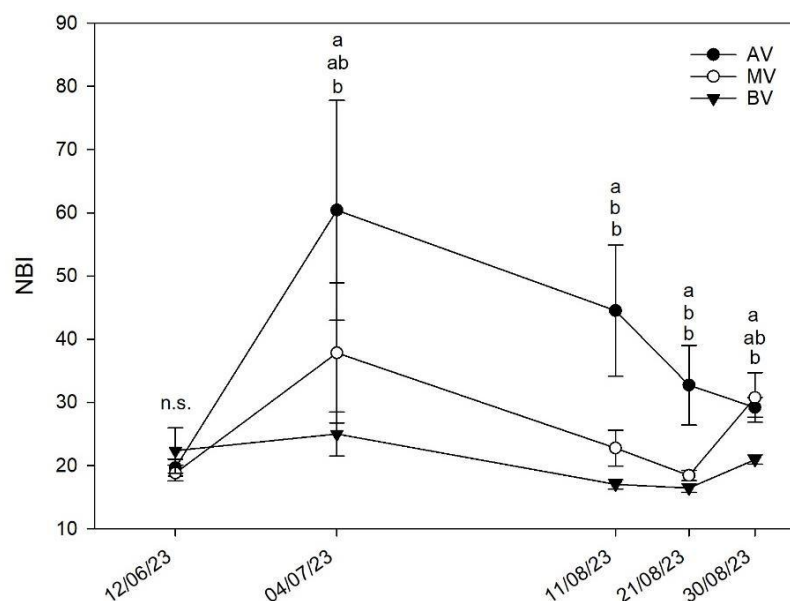


Figura 16. Andamento del valore di Nitrogen Balance Index (NBI) nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) durante la stagione 2023. I valori rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

2.3.7 Stato idrico

Nel 2022, le condizioni climatiche si sono distinte per l'assenza di piogge significative durante tutto l'intervallo di rilievo, fatta eccezione per un evento di 10 mm verificatosi il 12 agosto, troppo distante temporalmente (13 giorni) dal rilievo successivo e di lieve entità per determinare un impatto apprezzabile sui valori del potenziale idrico. Nelle prime fasi della stagione, si osserva un progressivo peggioramento dello stato idrico, con i valori medi che passano da -9 bar per MV, -10 bar per AV e -11 bar per BV il 21 giugno a -10 bar per MV, -11 bar per AV e -12 bar per BV il 30 giugno (fig. 17).

Il picco massimo di stress idrico viene raggiunto il 21 luglio, quando BV registra -14 bar, significativamente inferiore rispetto ad AV (-11 bar) e MV (-10 bar). Questi dati sottolineano la maggiore vulnerabilità di BV alle condizioni di stress idrico prolungato. Un cambiamento dello stato idrico si osserva il 26 agosto, in corrispondenza di un intervento irriguo effettuato con un volume di circa 130 m³ per ettaro. I valori medi di potenziale idrico risalgono a -9 bar per MV, -10 bar per AV e -11 bar per BV, segnalando una

significativa riduzione dello stress idrico per tutti i gruppi, ma in modo più pronunciato per BV. Questo comportamento evidenzia come BV, nonostante la maggiore sensibilità agli stress, risponda in modo marcato agli interventi irrigui.

Nel 2023, le dinamiche risultano influenzate da condizioni climatiche differenti. Tra luglio e agosto si registrano precipitazioni quasi nulle, sostituite da interventi irrigui il 10 e il 20 luglio, che sembrano aver avuto principalmente una funzione di mantenimento dello stato idrico, senza determinare un miglioramento significativo (fig. 18). I valori medi al 21 luglio sono -8 bar per MV, -9 bar per AV e -10 bar per BV, con differenze meno marcate rispetto al 2022. Il picco massimo di stress idrico si verifica il 21 agosto, con BV che raggiunge -16 bar, mentre AV e MV registrano rispettivamente -13 e -12 bar, confermando, ancora una volta la maggiore vulnerabilità di BV. Un ulteriore intervento irriguo effettuato il 27 agosto porta a un lieve miglioramento dello stato idrico verso la fine della stagione, con valori di -9 bar per AV, -10 bar per MV e -11 bar per BV il 22 settembre. Un confronto complessivo tra i due anni mette in evidenza differenze sostanziali nella risposta idrica dei diversi livelli di vigore. Nel 2022, l'andamento climatico ha determinato una chiara separazione tra i gruppi di vigore, evidenziando differenze nette nello stato idrico delle piante. Al contrario, nel 2023, sebbene i livelli di stress idrico siano rimasti diversi tra i gruppi, le differenze risultano meno marcate.

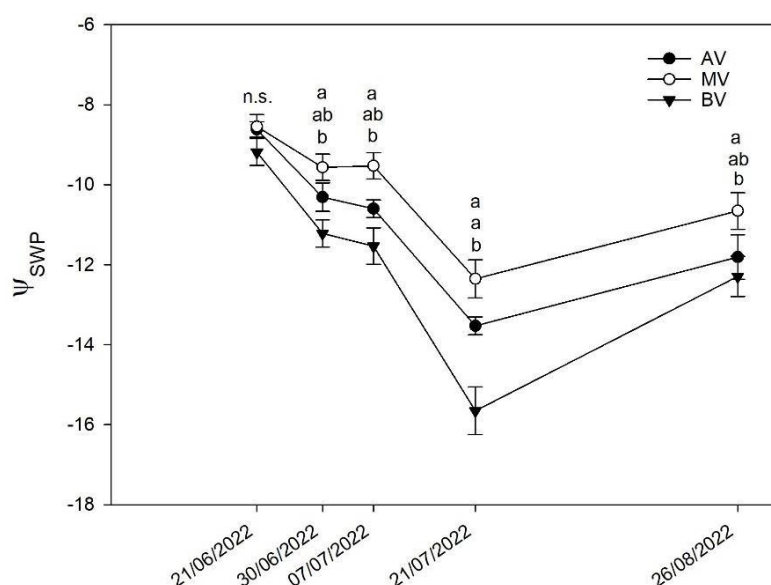


Figura 17. Variazione stagionale dello stem water potential (Ψ_{SWP}) misurato a mezzogiorno nel corso della stagione 2022 nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV). I valori riportati rappresentano le medie, con barre di errore indicate

come $\pm$ deviazione standard . Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

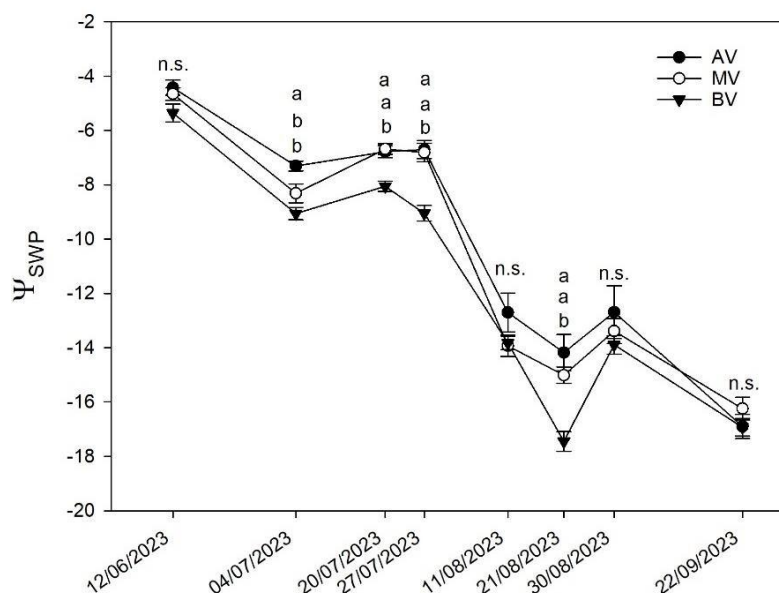


Figura 18. Variazione stagionale dello stem water potential (Ψ_{SWP}) misurato a mezzogiorno nel corso della stagione 2023 nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV). I valori riportati rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard . Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i livelli di vigore per ciascuna data ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

2.3.8 Qualità delle uve

2.3.8.1 Solidi Solubili Totali (°Brix)

La valutazione del contenuto in solidi solubili totali (SST) al momento della raccolta ha evidenziato differenze significative attribuibili a tutti i fattori considerati, inclusa la loro interazione. Come illustrato nella Figura 19, nel 2022 il livello di vigore BV ha registrato un valore medio di 22.9 °Brix, significativamente superiore rispetto a MV (20.5 °Brix) e AV (21.1 °Brix). Nel 2023, pur mantenendo una dinamica simile, si osserva un calo generalizzato del grado zuccherino medio per l'intero vigneto, con riflessi evidenti nei valori medi dei singoli livelli di vigore. Anche in questa annata, MV si conferma come il livello di vigore associato al valore medio più basso (19.3 °Brix), mentre AV e BV mostrano valori più elevati e molto vicini tra loro, tanto che le differenze tra questi ultimi non risultano statisticamente significative. In termini di variazioni inter-annuali, AV e MV hanno mostrato un comportamento relativamente stabile, con riduzioni contenute nel

contenuto zuccherino medio, rispettivamente pari al 3% e al 6%. Al contrario, BV ha registrato una riduzione molto più marcata, pari al 10%, che ha portato il suo valore medio nel 2023 a convergere con quello di AV. Questo comportamento suggerisce che le piante a basso vigore abbiano subito un maggiore impatto dalle condizioni climatiche specifiche dell'annata, evidenziando una maggiore suscettibilità alle variazioni ambientali rispetto ai livelli di vigore medio e alto.

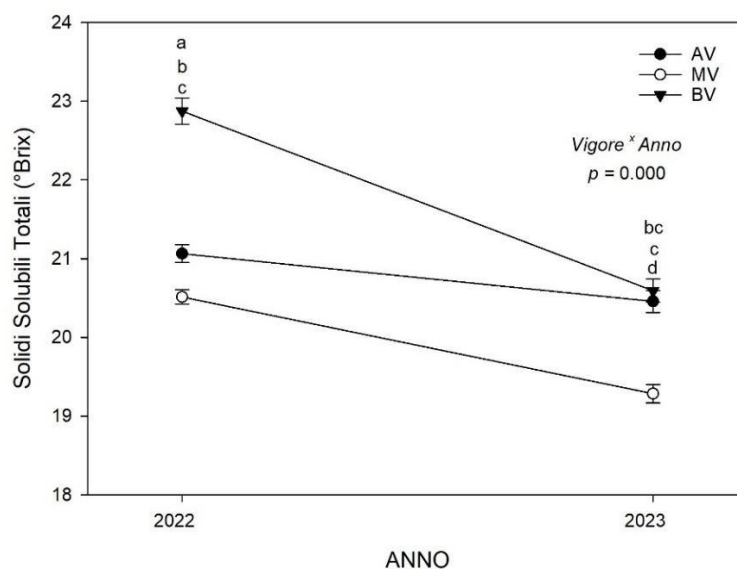


Figura 19. Contenuto di solidi solubili totali (°Brix) delle uve alla raccolta nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) in relazione all'anno di rilievo (2022–2023). La figura evidenzia un'interazione significativa tra vigore e anno ($p < 0,001$). I valori riportati rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra le combinazioni vigore $\times$ anno ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

2.3.8.2 pH e Acidità Titolabile

L'analisi del pH ha evidenziato un effetto significativo sia per i fattori vigore e anno, sia per la loro interazione. La Figura 20 mostra che, in entrambi gli anni, il livello di vigore BV ha presentato i valori di pH mediamente più alti rispetto agli altri livelli di vigore. Nel 2022, BV ha registrato un pH medio di 3.55, significativamente superiore rispetto ai valori riscontrati per MV (3.44) e AV (3.37). Nel 2023, sebbene BV mantenesse la tendenza a valori di pH superiori, le differenze con MV e AV si sono ridotte, tanto da non risultare più

significative. Per quanto riguarda l'acidità titolabile, i risultati confermano un effetto significativo di tutti i fattori considerati, compresa la loro interazione.

La Figura 21 evidenzia una tendenza generale alla diminuzione dell'acidità titolabile passando dal 2022 al 2023. Complessivamente, BV si è distinto per valori di acidità significativamente inferiori rispetto ad AV e MV. Nel 2022, BV ha registrato un'acidità media di 6.3 g/L, significativamente inferiore ai 6.8 g/L di MV e ai 7.2 g/L di AV. Questa differenza si è mantenuta anche nel 2023, nonostante il calo generale dei valori. In particolare, BV ha raggiunto un'acidità titolabile di 4.8 g/L, contro i 5.3 g/L e 5.2 g/L rispettivamente di MV e AV.

Questi risultati confermano una chiara relazione tra il vigore e le caratteristiche di acidità e pH delle uve, evidenziando come BV tenda a produrre uve caratterizzate da un maggiore pH e una minore acidità titolabile rispetto agli altri livelli di vigore. Le variazioni osservate tra gli anni possono essere attribuite alle differenti condizioni climatiche, che sembrano aver influenzato in modo diversificato i parametri studiati in relazione al livello di vigore.

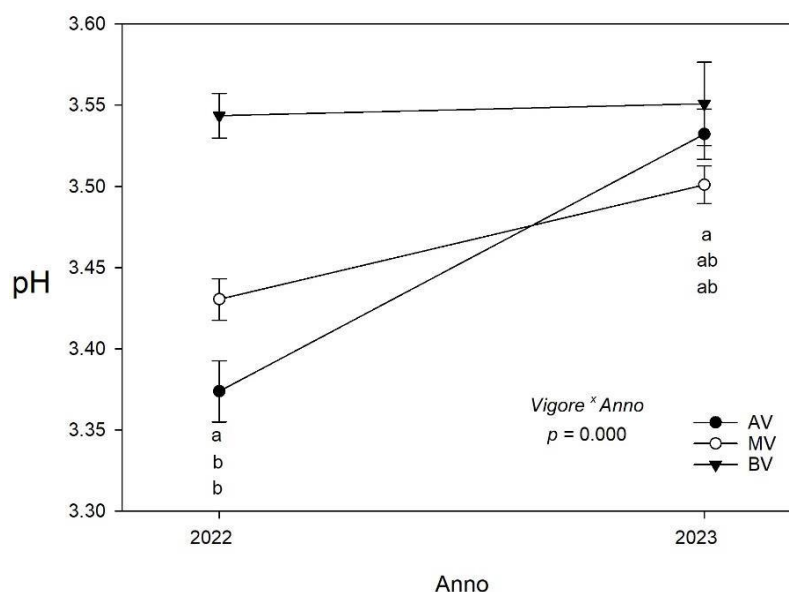


Figura 20. Valori pH delle uve alla raccolta nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) in relazione all'anno di rilievo (2022-2023). La figura evidenzia un'interazione significativa tra vigore e anno ($p = 0,000$). I valori riportati rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra le combinazioni vigore $\times$ anno ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

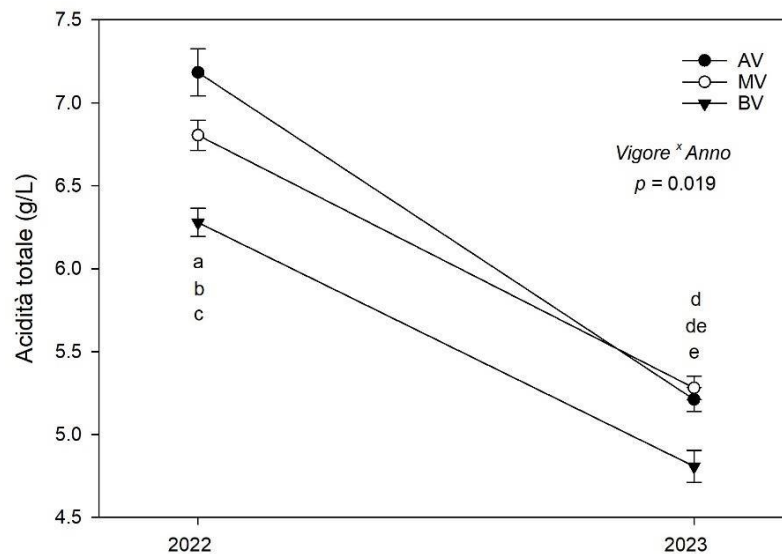


Figura 21. Valori Acidità titolabile (g/L) delle uve alla raccolta nei tre livelli di vigore (AV, MV, BV) in relazione all'anno di rilievo (2022–2023). La figura evidenzia un'interazione significativa tra vigore e anno ($p = 0,019$). I valori riportati rappresentano le medie, con barre di errore indicate come $\pm$ deviazione standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra le combinazioni vigore $\times$ anno ($p < 0,05$); "n.s." indica differenze non significative.

2.3.9 Parametri Produttivi

2.3.9.1 Fertilità Potenziale

Il monitoraggio della fertilità potenziale ha evidenziato differenze significative sia tra i livelli di vigore sia tra gli anni, mentre l'interazione tra questi fattori non è risultata significativa (tab. 6). Un dato particolarmente rilevante è l'incremento significativo della fertilità potenziale media complessiva osservato passando dal 2022 al 2023, con un aumento medio da 0.96 a 1.13 grappoli per germoglio.

Analizzando i risultati in funzione dei livelli di vigore, si osserva che AV e MV hanno registrato valori medi molto simili, non significativamente differenti tra loro, pari rispettivamente a 1.18 e 1.21 grappoli per germoglio.

Questi valori sono significativamente superiori rispetto a quelli riscontrati per BV, che ha fatto registrare una media di soli 0.76 grappoli per germoglio. Questo andamento sottolinea una chiara relazione tra vigore e fertilità potenziale, con i livelli di vigore più elevati associati a una maggiore produzione potenziale.

2.3.9.2 *Peso dell'acino*

L'analisi del peso medio dell'acino ha evidenziato effetti significativi per tutti i fattori considerati, inclusa l'interazione tra vigore e anno. Come illustrato in tabella 6, nel 2022 si osservano differenze significative tra i livelli di vigore: AV ha fatto registrare un peso della bacca pari a 1.54 g, significativamente superiore rispetto a MV (1.47 g) e BV (1.22 g). Nel 2023, sebbene le differenze tra i livelli di vigore siano ancora presenti, si evidenzia un incremento generale del peso dell'acino per tutti i gruppi. In particolare, AV ha mostrato un aumento fino a 1.58 g, mantenendo un peso significativamente maggiore rispetto a MV, che ha raggiunto 1.52 g, e a BV, il cui peso è salito a 1.30 g. L'interazione significativa tra anno e vigore suggerisce che le condizioni stagionali abbiano influenzato in modo differente i livelli di vigore, con BV che ha mostrato il maggior incremento percentuale (+7%) rispetto agli anni precedenti, pur rimanendo il gruppo con il peso medio dell'acino più basso.

2.3.9.3 *Peso del Grappolo*

L'analisi del peso medio del grappolo ha evidenziato effetti significativi per tutti i fattori considerati, inclusa l'interazione tra vigore e anno. Come mostrato in tabella 6, nel 2022 i grappoli AV e MV hanno registrato valori significativamente superiori rispetto a quelli di BV, con rispettivamente 173 g, 170 g e 130 g. Tuttavia, nel 2023 si osserva un'inversione della tendenza rispetto all'anno precedente, con BV che registra il peso del grappolo più elevato (144 g), mentre AV mostra il valore più basso (133 g). Nonostante questa apparente inversione, le differenze tra i vigori nel 2023 non risultano statisticamente significative, e le variazioni si mantengono contenute, nell'ordine di circa 10 g. Questo suggerisce che, nel 2023, le condizioni ambientali abbiano avuto un impatto omogeneizzante sul peso dei grappoli, riducendo le differenze normalmente associate ai livelli di vigore. Complessivamente, i risultati mettono in evidenza una forte interazione tra fattori ambientali e vigore delle piante, che influisce in modo differente sul peso del grappolo nei due anni considerati.

2.3.9.4 Resa per Vite

L'analisi statistica ha evidenziato un effetto significativo del fattore vigore ($p = 0.000$) sulla produzione media per pianta. L'anno e l'interazione anno per vigore non hanno influenzato la resa. La tabella 6 mostra chiaramente che il livello BV è associato a una produzione significativamente inferiore rispetto ai livelli AV e MV.

In particolare, BV ha fatto registrare una produzione pari a 1,05 kg per pianta, un valore notevolmente inferiore rispetto a quello di AV e MV, rispettivamente pari a 2,17 kg e 2,08 kg. Le analisi post-hoc hanno confermato che AV e MV appartengono allo stesso gruppo statistico, suggerendo che le loro produzioni non differiscono significativamente tra loro, ma sono entrambe significativamente superiori a quella di BV. Questi risultati sottolineano come il livello di vigore rappresenti un determinante critico per la produttività delle piante, con piante ad alto e medio vigore che mostrano un rendimento doppio rispetto a quelle a basso vigore.

Tab. 6. Fertilità potenziale, peso dell'acino, peso del grappolo e produzione per pianta misurati nelle diverse classi di vigore (AV, MV, BV), per gli anni 2022 e 2023.

FERTILITÀ POTENZIALE						PESO DELL'ACINO (g)					
	2022		2023		Media		2022		2023		Media
AV	1.08 ± 0.10	n.s.	1.27 ± 0.09		1.18 ± 0.10	A	AV	1.49 ± 0.02	bc	1.57 ± 0.01	a
MV	1.13 ± 0.07		1.30 ± 0.24		1.21 ± 0.16	A	MV	1.44 ± 0.01	c	1.50 ± 0.01	b
BV	0.68 ± 0.05		0.83 ± 0.07		0.76 ± 0.06	B	BV	1.16 ± 0.02	e	1.35 ± 0.01	d
Media	0.97 ± 0.07	B	1.13 ± 0.15	A			Media	1.36 ± 0.01	B	1.48 ± 0.01	A
PESO DEL GRAPPOLO (g)						RESA/VITE (kg)					
	2022		2023		Media		2022		2023		Media
AV	171.5 ± 8.8	a	133.2 ± 6.5	b	152.3 ± 7.6	AB	AV	2.28 ± 0.29	n.s.	2.01 ± 0.17	
MV	170.5 ± 7.8	a	138.2 ± 5.9	b	154.3 ± 6.8	A	MV	1.96 ± 0.32		2.20 ± 0.24	
BV	127.2 ± 6.0	b	144.1 ± 9.1	ab	135.6 ± 7.0	B	BV	0.87 ± 0.13		1.21 ± 0.20	
Media	156.4 ± 7.5	A	138.5 ± 7.2	B			Media	1.70 ± 0.25		1.81 ± 0.20	N.S.

I dati sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$), "n.s." differenze non significative. Le lettere maiuscole evidenziano differenze significative tra le classi di vigore indipendentemente dall'epoca di misurazione o tra le epoche indipendentemente dalla classe di vigore. Le lettere minuscole indicano differenze significative dovute all'interazione tra classe di vigore ed epoca di misurazione.

2.3.10 Indici di Equilibrio

L'indice di Ravaz non è stato influenzato dall'effetto anno, vigore e dalla loro interazione. Lo stesso risultato si è osservato nel rapporto tra superficie fogliare e produzione. Nel complesso, nonostante le differenze emerse negli altri parametri analizzati, le viti appartenenti ai tre livelli di vigore hanno dimostrato di possedere un adeguato rapporto vegeto-produttivo in grado di supportare la produzione.

2.3.11 Analisi della variabilità tra le piante: impatto di NDVI per pianta e delle classi di vigore

L'analisi evidenzia che la suddivisione delle piante in classi di vigore comporta una perdita di informazioni rispetto all'uso dei valori di NDVI specifici per ciascuna pianta, con un impatto particolarmente marcato sui SST. Nel modello ad effetti misti che utilizza l'NDVI individuale (Tab. 7), il fattore anno spiega il 33,4% della varianza totale (varianza = 1,0), mentre l'NDVI contribuisce per il 31% (0,95). La componente attribuita alla pianta rappresenta il 9,9% della variabilità (0,30), mentre l'errore residuo, ossia la quota di varianza non spiegata, ammonta al 26%. Nel modello a effetti misti basato sulla classificazione in classi di vigore, il fattore anno mantiene un ruolo predominante (35,1%, varianza = 0,86), ma la quota di varianza spiegata dalla pianta aumenta al 13,1% (0,32). Tuttavia, l'errore residuo cresce significativamente fino al 51,5%, indicando una perdita di informazioni relative alla variabilità intra-vigore. La persistenza dell'effetto significativo della pianta ($p < 0,001$) suggerisce che la variabilità inter-individuale non sia esclusivamente riconducibile alle differenze di vigore, ma includa componenti intra-vigore attenuate dalla suddivisione in classi.

Per quanto riguarda l'acidità titolabile, il modello basato sulle classi di vigore attribuisce al fattore anno la quota maggiore della varianza (60,2%, varianza = 1,28), seguito dalla pianta (7,9%, 0,17). L'errore residuo rappresenta il 31,1% (0,66).

Nel modello che utilizza l'NDVI individuale, il contributo della pianta si riduce al 2,2% (0,04), mentre l'NDVI spiega il 16,1% della variabilità totale (0,33). L'errore residuo si riduce al 24,9% (0,51), ma in misura meno marcata rispetto a quanto osservato per i SST, suggerendo che l'uso dell'NDVI non aggregato in classi di vigore, migliori la spiegazione della variabilità dell'acidità titolabile, seppur in misura inferiore rispetto ai SST.

Per il pH, nel modello basato sulla classificazione per vigore, la varianza attribuita alla

pianta è pari al 17,0% (0,0046), seguita dal fattore anno (13,4%, 0,0036). L'errore residuo ammonta al 63,6% (0,0171). Nel modello che incorpora l'NDVI individuale, il contributo della pianta si riduce al 5,6% (0,0015), mentre l'NDVI emerge come il principale fattore esplicativo dopo l'errore residuo, spiegando il 35,1% della variabilità totale (0,0095). L'errore residuo scende al 44,8% (0,0121), evidenziando un miglioramento più marcato rispetto a quanto osservato per l'acidità titolabile.

Questi risultati confermano che il modello basato sull'NDVI specifico per pianta consente una migliore spiegazione della variabilità individuale rispetto alla suddivisione in classi di vigore. Tuttavia, il beneficio in termini di riduzione dell'errore residuo varia a seconda del parametro analizzato: è più pronunciato per i SST, meno evidente per l'acidità titolabile e particolarmente rilevante per il pH. Ciò suggerisce che l'uso dell'NDVI rappresenta un approccio metodologicamente più accurato per descrivere la variabilità intra-vigore, riducendo la quota di varianza non spiegata rispetto alla classificazione per classi di vigore.

Tabella 7. Modelli a effetti misti per i parametri Solidi Solubili Totali (SST), Acidità Totale (AT) e pH, analizzati in funzione della classificazione per vigore e dell'NDVI per pianta

	Modello	Anno		Pianta		NDVI-A		Errore Residuo	
		Varianza	p-value	Varianza	p-value	Varianza	p-value	Varianza	p-value
SST	Vigore	0.86 (35%)	0.002	0.32 (13%)	0.001	-	-	1.25 (52%)	0.000
	NDVI	1.03 (33%)	0.246	0.30 (9.9%)	0.031	0.95 (31%)	0.000	0.74 (24%)	0.000
AT	Vigore	1.28 (30%)	0.240	0.17 (7.9%)	0.001	-	-	0.66 (31%)	0.000
	NDVI	1.14 (56%)	0.242	0.05 (2%)	0.279	0.33 (16%)	0.000	0.51 (25%)	0.000
pH	Vigore	0.0036 (13%)	0.244	0.0046 (17%)	0.002	-	-	0.017 (64%)	0.000
	NDVI	0.0023 (9%)	0.267	0.0015 (6%)	0.257	0.0095 (35%)	0.000	0.012 (45%)	0.000

Le percentuali indicate rappresentano la variabilità spiegata dai diversi fattori nel modello, inclusi Anno, Pianta, NDVI di agosto, nonché la quota di errore residuo.

2.3.12 Analisi delle Correlazioni

I risultati ottenuti dallo studio delle correlazioni evidenziano una relazione significativa tra i valori di NDVI e il peso del legno di potatura. In particolare, mettendo in relazione i dati di NDVI acquisiti a giugno 2022, in corrispondenza della fase fenologica di "pea-size" (BBCH 75), con il peso del legno di potatura registrato nel mese di dicembre dello stesso anno, è stata osservata una correlazione polinomiale con un R^2 adj pari al 78,5% e un valore di S di 75,5 g. Questo valore, una volta normalizzato rispetto al range osservato (SN), definisce un errore dell'8,7%, fornendo una misura diretta dell'accuratezza del

modello in termini relativi (fig. 22). Un ulteriore miglioramento della relazione è stato osservato considerando i valori di NDVI acquisiti a fine agosto, in prossimità della fase fenologica di maturazione ottimale per la raccolta. Per questa epoca, la correlazione ha mostrato un R^2 adj dell'86,1%, un valore di S pari a circa 61 g, e un SN ridotto al 7%, evidenziando un miglioramento rispetto all'epoca precedente (fig. 23). Le medesime analisi, condotte nel secondo anno dello studio (2023), hanno confermato risultati analoghi. La correlazione tra i valori di NDVI acquisiti a giugno e il peso del legno misurato a dicembre ha mostrato un R^2 adj pari al 76,6%, con un valore di S di circa 111 g e un SN del 9% (fig. 24). Anche nel 2023, il passaggio dall'epoca di giugno a quella di fine agosto ha comportato un miglioramento nella capacità predittiva della relazione: l' R^2 adj ha raggiunto l'82,3%, il valore di S è sceso a 96,6 g, e l'SN si è ridotto al 7,6%, indicando un errore relativo minore e quindi una maggiore affidabilità del modello (fig. 25). Inoltre, dall'analisi dei dati è emerso che la relazione NDVI e peso del legno di potatura non si limita ai dati acquisiti nella stessa stagione vegeto-produttiva, ma si estende anche tra stagioni consecutive. In particolare, è stato osservato che i dati NDVI di giugno 2023 mostrano una correlazione positiva quadratica con il peso del legno pesato a dicembre 2022 e dunque riferito alla stagione precedente (fig. 26). Il modello di regressione descrive con buona precisione questa relazione (R^2 adj 64.3%), valori di S pari a 97.4 g SN che sale all'11.2%. Le stesse considerazioni eseguite con i valori NDVI di agosto 2023 e il peso del legno del 2022 evidenziano ancora una volta un leggero miglioramento del modello (fig. 27). La correlazione in questione riporta un R^2 adj di 77.6%, S pari a 77.2 g e SN del 8.9%. L'analisi delle correlazioni tra NDVI e altri parametri agronomici ha evidenziato una relazione selettiva. In particolare, la valutazione della correlazione tra la superficie fogliare media per pianta e i valori di NDVI acquisiti a giugno 2022 ha mostrato l'assenza di una relazione significativa, con un R^2 adj pari al 9%, un valore di S di 1,1 m² e un SN del 23% (fig. 28). Analogamente, prendendo in esame i valori di NDVI e superficie fogliare di fine agosto 2022, la correlazione è risultata ancora debole (R^2 adj 11,9%, S di 1,2 m² e SN del 25,2%), confermando l'assenza di un'associazione tra questi parametri (fig. 29).

Per quanto riguarda i parametri produttivi, l'unico indicatore che mostra una correlazione moderata con i valori di NDVI è la produzione media per pianta. Nel 2022, si osserva un incremento della resa all'aumentare di NDVI, con un R^2 adj del 51%, un S di 0,74 kg e un SN del 17%, sebbene l'errore associato resti considerevole (fig. 30). L'analisi delle relazioni tra NDVI e parametri qualitativi delle uve non ha evidenziato alcuna correlazione

significativa. In particolare, mettendo in relazione i valori di NDVI acquisiti ad agosto 2022 con il contenuto zuccherino (TSS) alla raccolta, R^2 adj è risultato pari al 20,5%, con un valore di S di 1,25 °Brix e un SN del 23%, suggerendo un'elevata incertezza del modello (fig. 31). Nel 2023, la correlazione tra questi parametri è risultata ancora più debole, con un R^2 pari a zero, confermando l'assenza di una relazione tra NDVI e qualità delle uve. Lo stesso andamento è stato osservato per l'acidità titolabile (fig. 30). Nel complesso, i risultati indicano che l'NDVI rappresenta in modo efficace la struttura vegetativa della pianta, come dimostrato dalla forte correlazione con il peso del legno di potatura. Tuttavia, non emerge come un indicatore affidabile per la stima della superficie fogliare complessiva, della resa produttiva o dei parametri qualitativi delle uve.

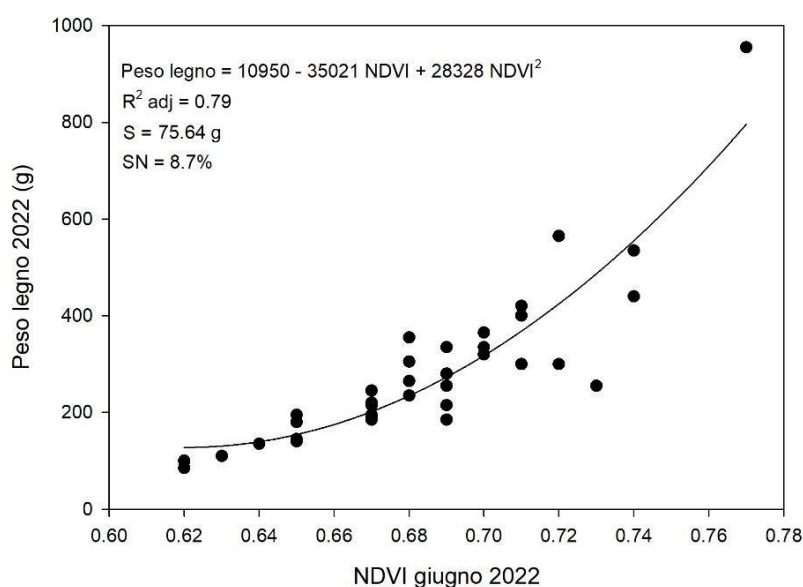


Figura 22. Relazione tra l'NDVI di giugno 2022 e il peso del legno prodotto nello stesso anno. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.79. S indica l'errore standard della regressione (75.64 g), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (8.7%).

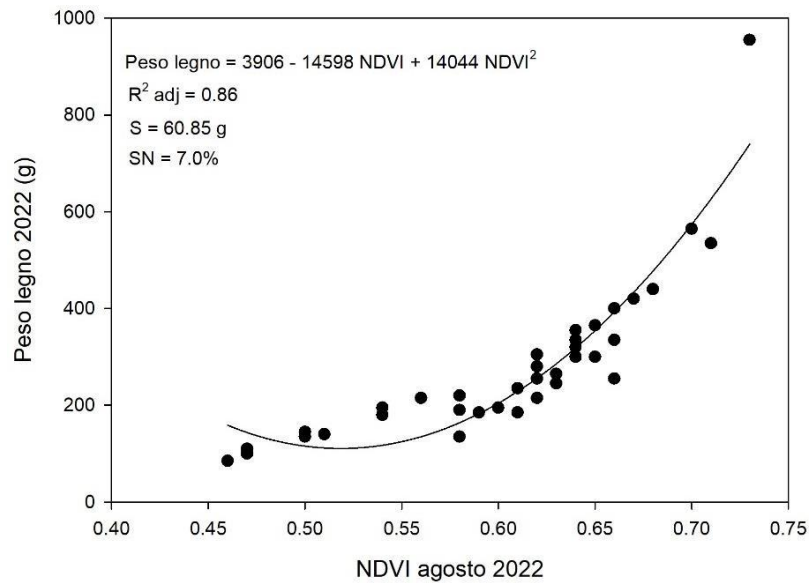


Figura 23. Relazione tra l'NDVI di agosto 2022 e il peso del legno prodotto nello stesso anno. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.86. S indica l'errore standard della regressione (60.85 g), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (7.0%).

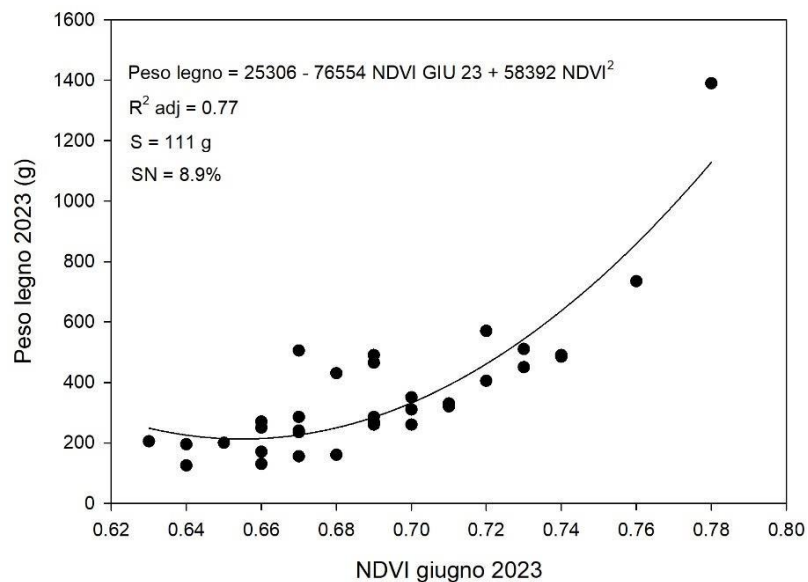


Figura 24. Relazione tra l'NDVI di giugno 2023 e il peso del legno prodotto nello stesso anno. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.77. S indica l'errore standard della regressione (111 g), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (8.9%).

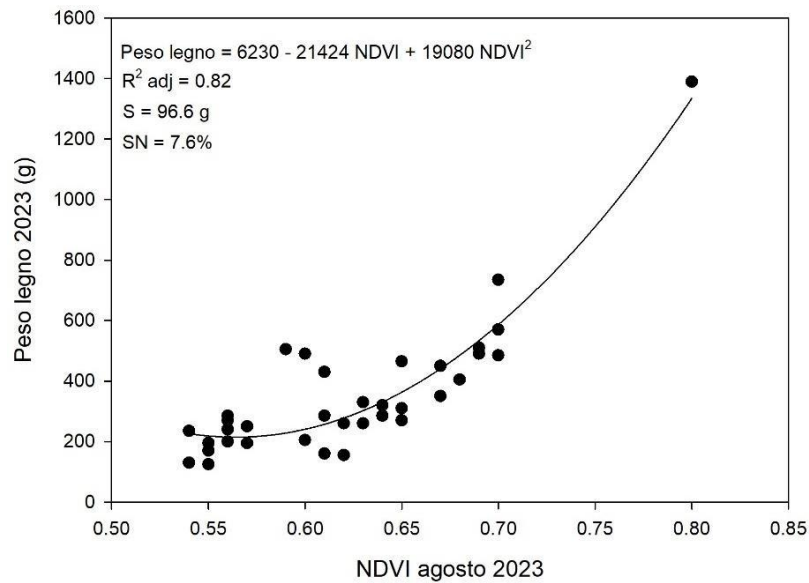


Figura 25. Relazione tra l'NDVI di agosto 2023 e il peso del legno prodotto nello stesso anno. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.82. S indica l'errore standard della regressione (96.60 g), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (7.6%).

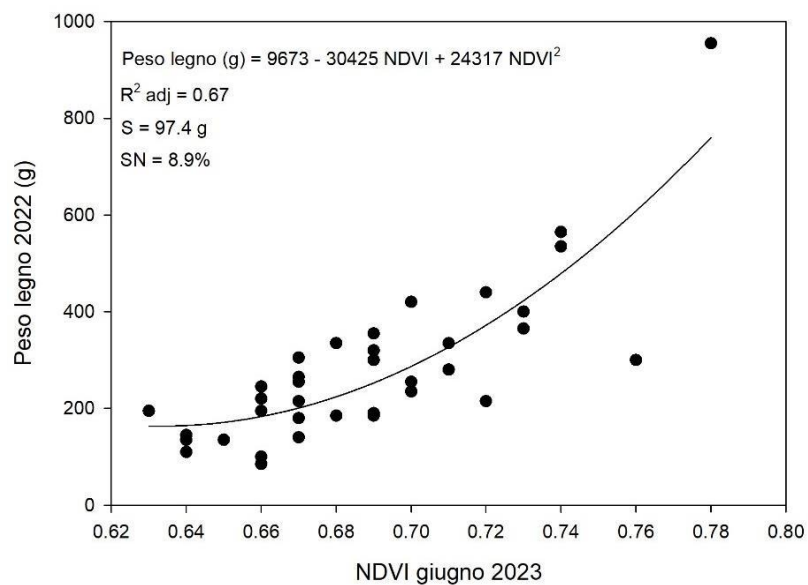


Figura 26. Relazione tra l'NDVI di giugno 2023 e il peso del legno prodotto nel 2022. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.67. S indica l'errore standard della regressione (97.4 g), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (8.9%).

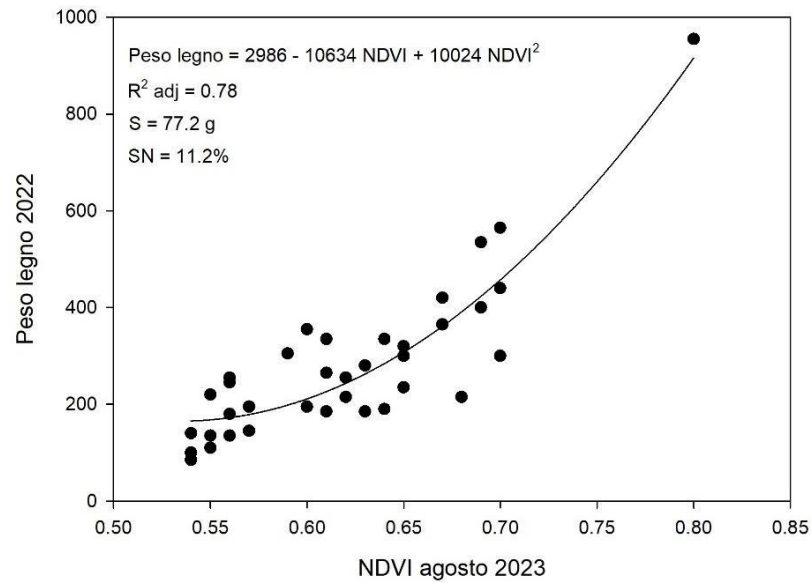


Figura 27. Relazione tra l'NDVI di agosto 2023 e il peso del legno prodotto nel 2022. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.78. S indica l'errore standard della regressione (77.2 g), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (11.2%).

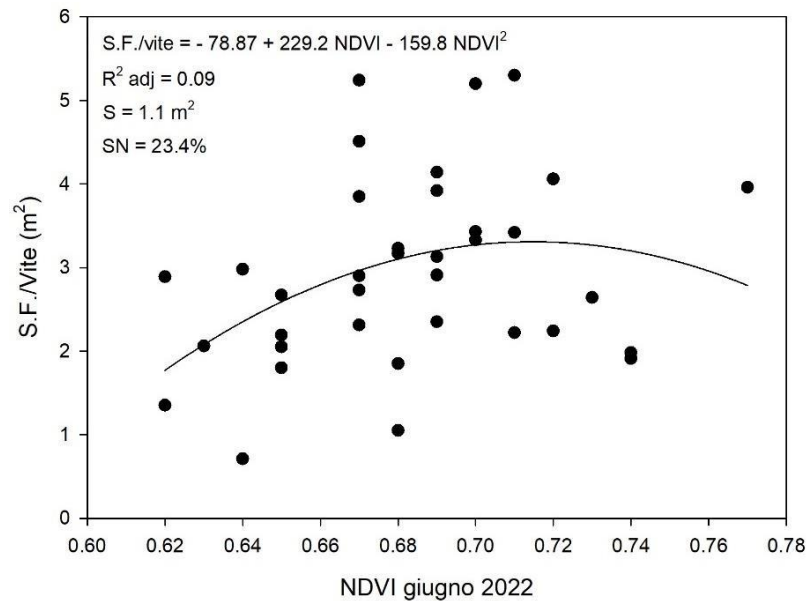


Figura 28. Relazione tra l'NDVI di giugno 2022 e la superficie fogliare media per vite di giugno 2022. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.09. S indica l'errore standard della regressione (1.1. m^2), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (23.4%).

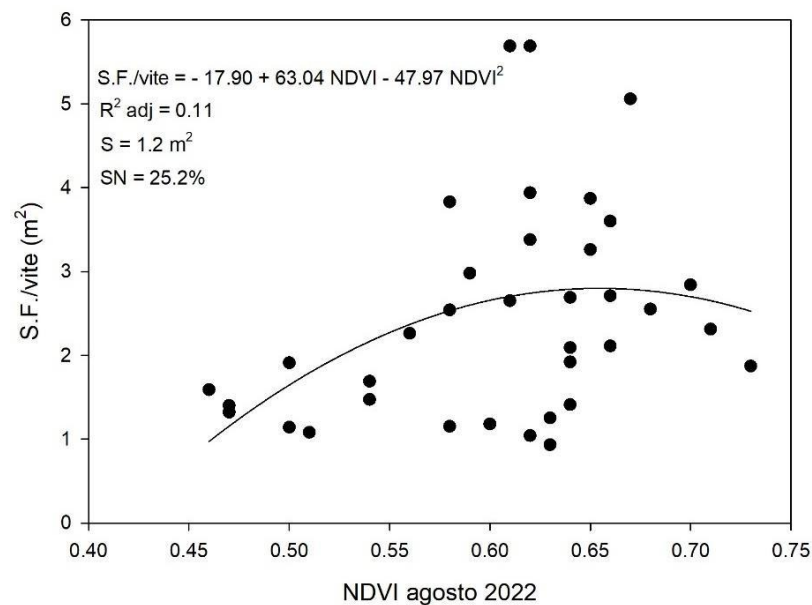


Figura 29. Relazione tra l'NDVI di agosto 2022 e la superficie fogliare media per vite di agosto 2022. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.11. S indica l'errore standard della regressione (1.2. m^2), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (25.2%).

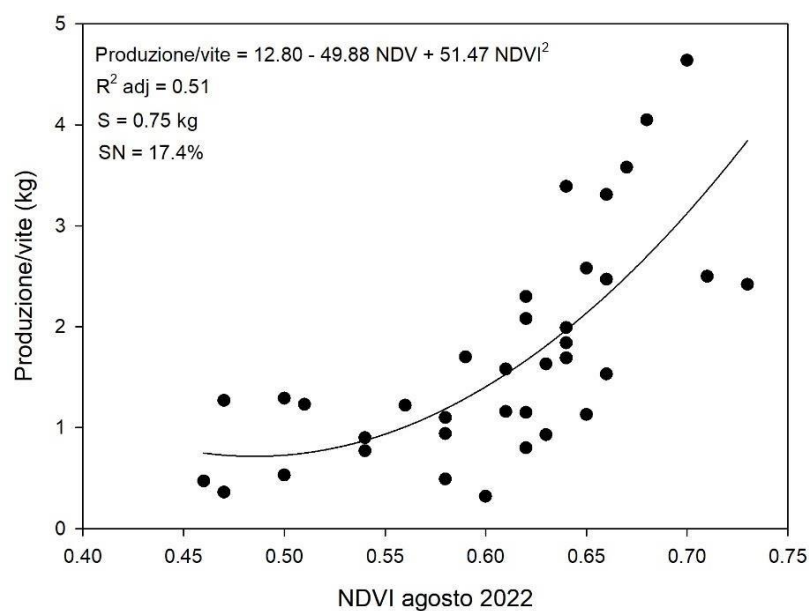


Figura 30. Relazione tra l'NDVI di agosto 2022 e la produzione media per vite nel 2022. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.51. S indica l'errore standard della regressione (0.75 kg), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (17.4%).

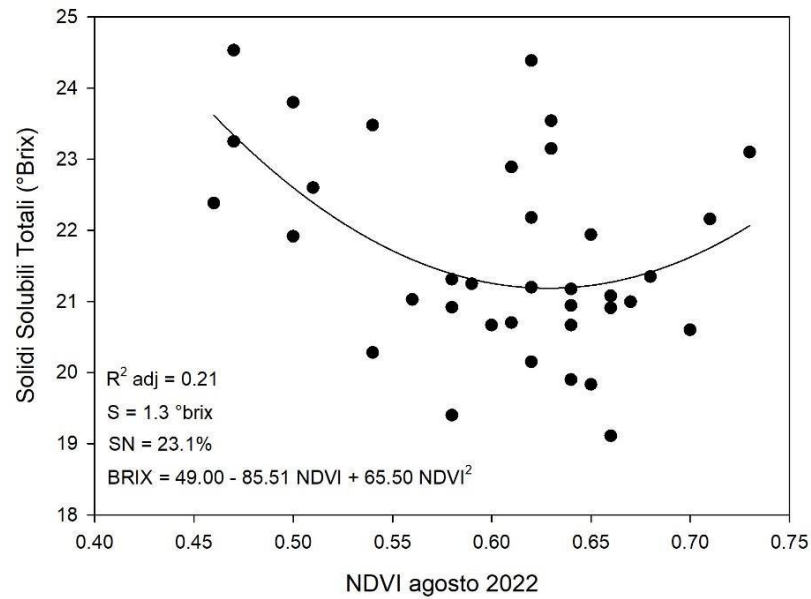


Figura 31. Relazione tra l'NDVI di agosto 2022 e SST alla raccolta nel 2022. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.21. S indica l'errore standard della regressione (1.3 °brix), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (23.1%).

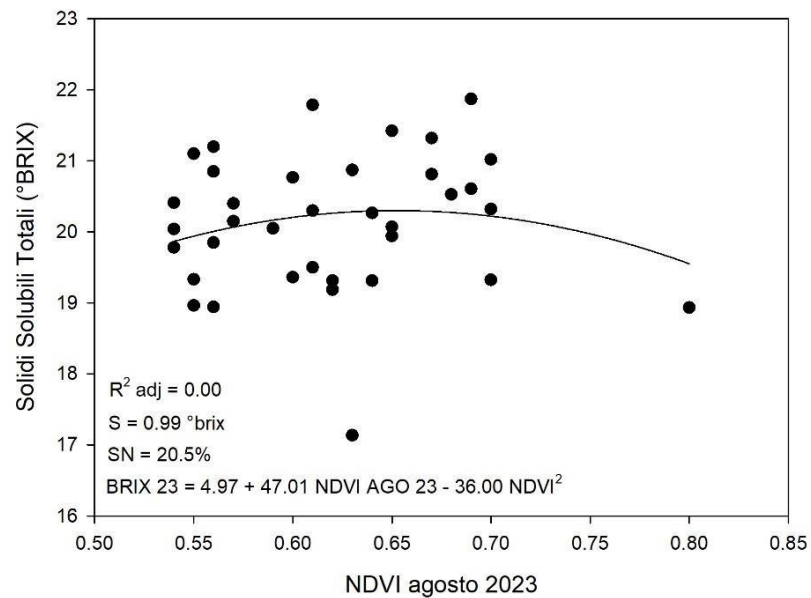


Figura 32. Relazione tra l'NDVI di agosto 2023 e SST alla raccolta nel 2023. La curva rappresenta il modello di regressione quadratica (equazione riportata nel grafico), con un R^2 aggiustato di 0.21. S indica l'errore standard della regressione (1.3 °brix), mentre SN rappresenta l'errore standard normalizzato rispetto al range dei dati osservati (23.1%).

2.4 Discussione

2.4.1 Analisi delle Correlazioni e Stabilità Spazio-Temporale del Vigore

La determinazione dell'indice di vegetazione NDVI ha evidenziato una relazione significativa con il peso del legno di potatura. Studi come quello di King et al. (2014) hanno riportato una correlazione statisticamente significativa ($p < 0.01$), nonostante un R^2 relativamente basso (< 0.5). Questi risultati suggeriscono un legame reale tra i due parametri ma indicano, al tempo stesso, la necessità di ulteriori approfondimenti per valutarne la stabilità e l'affidabilità in diversi contesti.

Il presente studio tenta di integrare questi contributi, confermando la robusta correlazione tra i due parametri e approfondendo l'evoluzione della relazione in funzione delle diverse fasi fenologiche. In linea con quanto osservato da Hall et al. (2011), si rileva che la correlazione tra l'area e la densità della chioma, derivata dall'NDVI, e il peso del legno di potatura varia durante la stagione: mentre nelle fasi prefioritura la relazione risulta meno evidente, essa si rafforza significativamente verso la fine della stagione o in post-raccolta.

I risultati di questa ricerca, basati su rilievi effettuati nelle fasi fenologiche di pea-size (BBCH 75, indicativamente nel mese di giugno) e di maturazione ottimale per la raccolta (BBCH 89, compresa tra l'ultima decade di agosto e la prima di settembre), indicano che, pur evidenziando una maggiore affidabilità nelle stime ottenute nelle fasi finali, i valori di correlazione calcolati a BBCH 75 si discostano solo moderatamente da quelli rilevati successivamente, con margini d'errore contenuti.

Questo equilibrio tra precisione e tempestività suggerisce che l'adozione di una valutazione anticipata, già a giugno, possa offrire notevoli vantaggi in termini di pianificazione logistica e gestione delle risorse, senza precludere in modo significativo l'accuratezza della stima. Inoltre, il fatto che la solida correlazione si mantenga anche confrontando il peso del legno della stagione precedente con l'NDVI acquisito nella stagione in corso, rafforza l'idea che il rapporto tra questi parametri sia stabile e riproducibile nel tempo. Questi risultati si allineano con studi precedenti che documentano come, su scala inter-annuale, la struttura spaziale del vigore vegetativo rimanga stabile nel tempo (Gatti et al., 2017; Ferrer et al., 2020; Gatti et al., 2022). Le aree con differente vigore vegetativo tendono a conservare nel corso degli anni le proprie caratteristiche, in quanto fortemente influenzate da fattori costanti, come le proprietà pedologiche specifiche

delle diverse zone del vigneto. Contrariamente a quanto riscontrato per il peso del legno, non si evidenzia alcuna correlazione tra NDVI e superficie fogliare media per vite. Le stesse considerazioni fatte da Junges et al. (2019), riportano una correlazione significativa con $R = 0.60$; dunque nonostante gli autori evidenzino una correlazione positiva, solo il 36% della variazione dell'NDVI è spiegata dalle variabili considerate. Questo lascia il 64% della variazione non spiegata, suggerendo che altri fattori (non considerati nel modello) influenzano fortemente l'NDVI. Presumibilmente, il contesto nettamente differente ha migliorato la risposta; infatti, oltre alle differenze varietali (Chardonnay) e ambientali (regione della Serra Gaúcha, nello stato di Rio Grande do Sul, Brasile), il suddetto studio è stato condotto in un vigneto con un sistema di allevamento a pergola, caratterizzato da una chioma disposta orizzontalmente. In tale configurazione, probabilmente l'affastellamento dovuto a interventi agronomici, come il condizionamento della vegetazione, potrebbe essere stato più contenuto, favorendo una risposta NDVI maggiormente corrispondente al reale sviluppo vegetativo della chioma. Questo risultato può essere attribuito a limitazioni tecniche delle immagini multispettrali, che pur basandosi su tecniche di rilievo sofisticate, non sono in grado di cogliere la complessa struttura tridimensionale della chioma della vite. L'NDVI è efficace nel fornire informazioni sulla copertura e sulla densità della vegetazione, ma non è in grado di discriminare in modo dettagliato il numero di strati fogliari che incidono drasticamente sul dato agronomico espresso in m^2 . Un altro aspetto di rilievo è legato alle pratiche agronomiche utili alla gestione della chioma, quali ad esempio gli interventi di condizionamento che possono modificare la disposizione spaziale dei germogli. Queste considerazioni sembrano suggerire che mentre l'NDVI può essere un indicatore efficace della vigoria della vite espressa in termini di biomassa legnosa, risulta meno precisa per altri indici di vigore, quale la superficie fogliare. Per quest'ultima potrebbe essere necessario sfruttare immagini multispettrali realizzate con strumentazione quale ad esempio il LIDAR (Tardaguila et al., 2021; Pagliai et al., 2022).

2.4.2 Andamento Climatico, Proprietà del Suolo e Componente Vegetativa

L'analisi delle differenze climatiche tra le due stagioni oggetto di studio evidenzia variazioni significative, con impatti rilevanti sulla crescita vegetativa della vite. Tra i parametri climatici considerati, l'andamento delle precipitazioni risulta essere quello soggetto alle maggiori fluttuazioni, non solo nel confronto tra gli anni analizzati, ma anche rispetto alla media pluviometrica dell'ultimo ventennio.

Questa discontinuità rispetto al trend storico rappresenta una delle manifestazioni più evidenti del cambiamento climatico, che non si limita all'incremento delle temperature medie, ma si riflette anche in una distribuzione anomala delle piogge.

Diversi studi hanno documentato un'evoluzione del regime pluviometrico in varie regioni viticole. Lereboullet et al. (2014) hanno evidenziato, nella regione vinicola di Côtes-du-Roussillon-Villages (Francia meridionale), una progressiva riduzione delle precipitazioni estive di circa 7,5 mm per decennio nel corso del XX e XXI secolo, mentre le piogge autunnali del periodo 1991-2010 risultano ridotte a circa 174 mm rispetto ai 236 mm registrati tra il 1951 e il 1970. Analogamente, Teslic et al. (2018) hanno riscontrato, in Emilia-Romagna, una riduzione media delle precipitazioni di circa 118 mm durante la stagione vegetativa della vite. Tendenze analoghe si osservano anche nelle regioni viticole della Spagna nord-orientale: Ramos et al. (2008) hanno dimostrato che le precipitazioni nel periodo compreso tra la fioritura e l'invasatura sono diminuite di circa 10 mm, con conseguenze significative sulla resa di diverse cultivar.

Durante i due anni del presente studio, è stata osservata una riduzione delle precipitazioni nei periodi tipicamente piovosi, tra l'autunno e l'inverno, e un incremento in fasi dell'anno generalmente caratterizzate da livelli pluviometrici più contenuti. Questa alterazione del regime delle piogge ha avuto effetti diretti sulla crescita vegetativa della vite. Nel 2022, nonostante una piovosità complessiva inferiore alla media, la maggiore regolarità delle precipitazioni ha favorito uno sviluppo iniziale più equilibrato, con un'incidenza relativamente contenuta delle femminelle.

Diversamente, nel 2023 la combinazione di una scarsa piovosità nei primi mesi dell'anno con precipitazioni abbondanti tra aprile e giugno ha influenzato significativamente la distribuzione della superficie fogliare tra l'asse principale e le femminelle. In particolare, le ridotte precipitazioni iniziali, seguite da piogge primaverili abbondanti, hanno stimolato una crescita laterale più marcata, determinando un incremento della quota delle femminelle rispetto al totale del germoglio.

Indipendentemente dall'andamento climatico, le differenze nei livelli di vigore si sono manifestate attraverso una crescita vegetativa significativamente differente. In particolare, le zone a maggiore vigore presentano mediamente una superficie fogliare significativamente più ampia rispetto alle viti a basso vigore. Questo dato trova riscontro nei risultati di altri studi, che evidenziano come le caratteristiche pedologiche esercitino

un'influenza determinante. Ad esempio, Tardaguila et al. (2011) hanno dimostrato che tessitura, sostanza organica e capacità di scambio cationico (CSC) sono elementi discriminanti nella determinazione del livello di vigore delle diverse zone del vigneto. Inoltre, diversi studi indicano che la risposta vegetativa della pianta dipende anche dalla temperatura del suolo, la quale è influenzata non solo dalla disponibilità idrica, ma anche dalle caratteristiche tessiturali del terreno. In particolare, la temperatura del suolo influisce sulla crescita dei germogli e delle radici della vite attraverso il suo impatto sulla distribuzione del carbonio e dell'azoto dalle riserve della pianta (Clarke et al., 2015; Field et al., 2020).

Le caratteristiche fisiche del suolo, inclusi tessitura, struttura e profondità, rappresentano fattori fondamentali da considerare per il loro effetto sulla temperatura radicale e sulla disponibilità idrica e minerale della pianta (Schmitz and Sourell, 2000; Brillante et al., 2016). Il ruolo della componente nutrizionale nella crescita vegetativa è stato ulteriormente approfondito da Gaiotti et al. (2017), i quali hanno osservato un significativo effetto dell'aggiunta di compost al suolo sulla crescita della vite. In particolare, hanno evidenziato come il miglioramento della fertilità e della struttura del suolo possa favorire una maggiore vigoria, confermando l'importanza della disponibilità di nutrienti nel determinare la risposta vegetativa della pianta. Pereyra et al. (2023) hanno confermato le differenze pedologiche tra le zone a differente vigore, evidenziando come le aree ad alto vigore presentino suoli meno superficiali e una maggiore disponibilità di azoto. Questa differenza è attribuibile a una maggiore presenza di azoto minerale (NO_3^- e NH_4^+) e a una più elevata mineralizzazione della sostanza organica, favorita dalla maggiore profondità del suolo e da un contenuto organico leggermente superiore. Lo stesso studio suggerisce che, a causa delle differenze pedologiche tra le zone a diverso vigore, la crescita radicale risulta influenzata, con una maggiore presenza di radici fini nelle viti ad alto vigore, il cui ruolo nell'assorbimento di acqua e nutrienti è cruciale (Mahmud et al., 2019).

Complessivamente, Pereyra et al. (2023) evidenziano come le differenze pedologiche siano responsabili di uno sviluppo vegetativo significativamente diverso, quantificato in valori di superficie fogliare maggiori per le viti ad alto vigore. Tuttavia, alcuni fattori non hanno sempre un ruolo positivo. Ad esempio, Alliaume et al. (2024), in uno studio condotto nel sud dell'Uruguay sulla cv Tannat, riportano una stretta correlazione tra caratteristiche del suolo e crescita vegetativa delle viti. Essi osservano che le zone caratterizzate da un eccesso di argilla presentano una maggiore resistenza alla penetrazione delle radici, con

conseguenti problemi di compattazione e ridotta aerazione del suolo, oltre a un limitato drenaggio, fattori che portano a una minore crescita vegetativa. Tuttavia, Karn et al. (2024) indicano che le zone a maggiore vigoria sono associate a suoli con una quota maggiore di argilla, ma anche con un più alto contenuto di azoto e sostanza organica.

2.4.3 Parametri Fisiologici: Pigmenti Fogliari e Stato Idrico

Come descritto in precedenza, la stabilità delle zone di vigore nel tempo è principalmente associata a fattori edafici (Sarri et al., 2019; Gatti et al., 2022). Tra questi, il contenuto di argilla, la sostanza organica e la profondità del suolo influenzano la disponibilità idrica, condizionando così lo stato idrico della vite.

Nel nostro studio, l'analisi delle diverse zone di vigore ha evidenziato una chiara relazione con lo stato idrico della vite. Le piante a basso vigore hanno manifestato livelli di stress idrico più elevati rispetto a quelle delle zone ad alto vigore. È plausibile che tale differenza sia attribuibile alle proprietà chimico-fisiche del suolo, le quali influenzano la disponibilità idrica per le viti. In tal senso, Brillante et al. (2016) hanno dimostrato che le caratteristiche del suolo regolano il contenuto idrico e, di conseguenza, lo stato idrico delle viti. Nel loro studio, infatti, le zone del vigneto con un alto contenuto di sabbia hanno mostrato una minore ritenzione idrica, con effetti negativi sulle viti in termini di stress idrico.

L'acqua e i nutrienti rappresentano fattori chiave per lo sviluppo vegetativo e produttivo della vite (Pellegrino et al., 2005). Un grave deficit idrico può limitare la crescita radicale e aerea a causa della riduzione del turgore cellulare e dell'aumento della resistenza meccanica del suolo all'approfondimento delle radici (Bengough et al., 2011). La disponibilità idrica influisce sull'assorbimento dei nutrienti (Keller, 2015), sulla conduttanza stomatica e sulla fotosintesi (Flexas et al., 1999), con effetti diretti sulla componente vegeto-produttiva. Ad esempio, Pereyra et al. (2023) riportano che una maggiore disponibilità idrica, combinata con un'elevata temperatura del suolo nelle zone ad alto vigore, ha determinato un aumento della concentrazione di azoto nel suolo e una maggiore percentuale di azoto fogliare.

Questa correlazione è influenzata sia dallo stato idrico che dalla temperatura del suolo, la quale favorisce l'attività microbica e la mobilità dell'azoto. Al contrario, nelle zone a basso vigore, la limitata disponibilità idrica potrebbe aver ridotto l'assorbimento di azoto da parte delle radici, limitando la crescita vegetativa delle viti.

I risultati di questo studio suggeriscono che la differente disponibilità idrica tra le zone di vigore si riflette nelle caratteristiche fisiologiche della pianta, in particolare nel contenuto di pigmenti fogliari. Le viti ad alto vigore presentano un maggiore contenuto di clorofilla e NBI. Tali risultati trovano conferma nello studio condotto da Junges et al. (2019), che evidenzia una correlazione tra vigore e clorofilla ($R = 0.84$; $p < 0.01$), particolarmente marcata nelle fasi finali della stagione. Parallelamente, le zone a basso vigore, caratterizzate da minori livelli di clorofilla, hanno registrato un maggiore accumulo di antociani fogliari. Questo fenomeno è associato a una condizione di stress foto-ossidativo, che può indicare un declino della capacità fotosintetica nelle ultime fasi della stagione vegeto-produttiva (Chalker-Scott, 1999; Micciché et al., 2023).

2.4.4 Resa e Qualità delle Uve

La valutazione della risposta produttiva ha rivelato differenze significative tra i tre livelli di vigore per tutti i parametri analizzati, tra cui fertilità potenziale, peso dell'acino, peso del grappolo e resa per pianta. Questi risultati sono in pieno accordo con numerosi studi che hanno documentato l'effetto del vigore sulla resa e sulla composizione dell'uva, suggerendo che le viti ad alto vigore siano generalmente correlate a rese più elevate e acini di dimensioni maggiori (Bramley et al., 2011; Van Leeuwen et al., 2018).

La fertilità potenziale, definita come il numero medio di grappoli per germoglio, rappresenta un parametro cruciale per la comprensione della produttività, poiché, se combinata con il numero medio di germogli per pianta, consente di stimare il numero complessivo di grappoli per pianta. Quest'ultima informazione è di fondamentale importanza, in quanto la variabilità nel numero di grappoli gioca un ruolo determinante nella fluttuazione della resa del vigneto da un anno all'altro, con un impatto che può variare dal 30% al 70%, rispetto ad altri fattori produttivi (Carrillo et al., 2016). Le differenze riscontrate nella resa sono supportate da un ampio corpus di studi scientifici. Pereyra et al. (2023) riportano che le zone ad alto vigore mostrano una produzione media per pianta significativamente superiore rispetto a quelle a basso vigore. Analogamente, King et al. (2014) confermano che le viti ad alto vigore non solo tendono a produrre un numero maggiore di grappoli per pianta, ma presentano anche acini di dimensioni superiori e una maggiore produzione totale. Calderon-Orellana et al. (2014) osservano, inoltre, che il peso dell'acino risulta maggiore nelle zone a vigore alto e medio rispetto a quelle a basso vigore. Gatti et al. (2016) ribadiscono che le viti ad alto e medio vigore presentano acini

più pesanti, accompagnati da una produzione per pianta più elevata. Bonilla et al. (2015), infine, aggiungono che le zone a vigore elevato sono caratterizzate da rese per pianta superiori, con acini di dimensioni maggiori.

Le differenze evidenziate nei dati di resa possono essere ricondotte alla diversa disponibilità di risorse, quali acqua e azoto, che determinano un miglior apporto nutritivo nelle viti ad alto vigore, favorendo rese più elevate (Arnó et al., 2012). Tuttavia, come precedentemente menzionato, le viti a basso vigore, oltre a presentare rese inferiori, sviluppano una chioma che per volume e densità fornisce una limitata schermatura dalla radiazione solare, la quale può risultare eccessiva in ambiente caratterizzati da elevate irradiazioni ed elevato numero di ore di luce, fenomeno che può influire negativamente sulla qualità complessiva dell'uva (Tardaguila et al., 2011; McClymont et al., 2012; Ferrer et al., 2020).

In questo contesto, la maggior parte delle ricerche suggerisce che le viti in zone ad alto vigore tendano a subire un ritardo nella maturazione rispetto a quelle a basso vigore (van Leeuwen et al., 2018). Tale fenomeno è attribuibile al fatto che il vigore influisce sulla composizione degli acini, determinando variazioni nei contenuti di zuccheri, acidi e antociani. Tuttavia, l'entità di tale effetto risulta altamente dipendente dalle condizioni climatiche specifiche di ciascun anno (Tisseyre et al., 2008; McClymont et al., 2012; Gatti et al., 2022). Diverse variabili, tra cui il rapporto superficie fogliare/produzione, il microclima dei grappoli e le dimensioni degli acini, contribuiscono a spiegare le differenze compositive osservate. In particolare, le dimensioni ridotte degli acini nelle zone a basso vigore potrebbero portare a una maggiore concentrazione di zuccheri, dovuta all'effetto di concentrazione, mentre gli acini più grandi nelle zone ad alto vigore tendono a diluire il contenuto zuccherino.

2.5 Conclusioni

L'analisi della variabilità intra-parcellare del vigneto ha evidenziato come tale fenomeno sia un elemento strutturale e persistente, determinato principalmente da fattori pedologici che ne condizionano la distribuzione e l'intensità nel tempo. L'impiego di tecnologie di proximal sensing ha consentito di delineare con maggiore precisione la distribuzione spaziale del vigore vegetativo e di correlarlo con parametri agronomici e qualitativi delle uve. I risultati confermano che la variabilità intra-parcellare non è casuale, ma segue pattern spaziali ben definiti e relativamente stabili nel tempo, il che implica un potenziale significativo per la gestione sito-specifica del vigneto.

Le osservazioni condotte hanno dimostrato che le differenze di vigore all'interno del vigneto si traducono in variazioni significative della crescita vegetativa, dello stato idrico, della resa e della qualità dell'uva. In particolare, le zone a maggiore vigoria hanno mostrato un incremento della superficie fogliare e della biomassa legnosa, ma una maturazione più lenta e una qualità dell'uva differente rispetto alle zone a minor vigore, confermando quanto emerso da studi precedenti sulla relazione tra vigore e qualità delle uve. Le aree a bassa vigoria, invece, si sono distinte per una maggiore concentrazione zuccherina e minore acidità delle uve.

Dal punto di vista metodologico, l'integrazione di dati multispettrali e misurazioni dirette in campo ha permesso di validare l'affidabilità degli indici di vegetazione, come l'NDVI, nella caratterizzazione della variabilità intra-parcellare.

Un ulteriore aspetto emerso dallo studio riguarda la metodologia di classificazione del vigore.

I risultati indicano che l'utilizzo di valori di NDVI rilevati a livello di singola pianta, garantisce una maggiore capacità esplicativa rispetto alla suddivisione in classi discrete di vigore. L'impiego dell'NDVI riferito alla singola pianta ha infatti permesso di ridurre significativamente la quota di varianza residua non spiegata dai modelli, soprattutto per parametri qualitativi quali i solidi solubili totali (SST). Ciò suggerisce che, sebbene la classificazione in zone omogenee di vigore rappresenti un approccio utile per la gestione operativa del vigneto, essa comporta una semplificazione che può limitare la precisione delle analisi. Tale considerazione è supportata dalla persistenza di differenze significative tra le piante anche all'interno di ciascuna classe di vigore, suggerendo l'esistenza di una componente di variabilità non completamente spiegata dalla zonazione in classi. Alla luce

di queste evidenze, l'opportunità di impiegare dati di vigore a scala pianta-specifica per fini analitici e decisionali appare un ambito di grande interesse, che merita di essere ulteriormente approfondito attraverso studi dedicati, anche in differenti contesti varietali e pedoclimatici. Tuttavia, i risultati sottolineano l'importanza di adottare un approccio multi-temporale nell'acquisizione dei dati, poiché la relazione tra NDVI e peso del legno di potatura varia in funzione della fase fenologica. La relazione tra questi due parametri evidenzia come la variabilità intra-parcellare mantenga una struttura spaziale stabile nel tempo, rendendo possibile l'adozione di strategie di monitoraggio predittivo. Sebbene le misurazioni finali offrano maggiore affidabilità, i risultati suggeriscono che una valutazione anticipata, già nelle prime fasi della stagione, possa garantire un'adeguata precisione, favorendo una gestione più tempestiva delle risorse. Questa stabilità inter-annuale della correlazione NDVI-peso del legno sottolinea il potenziale di strumenti di telerilevamento per ottimizzare la zonazione del vigneto e migliorare l'efficacia delle pratiche agronomiche.

L'analisi della stabilità spazio-temporale ha rivelato che, sebbene i valori assoluti di NDVI possano subire variazioni tra le stagioni a causa di condizioni climatiche specifiche, la distribuzione delle zone di vigore si mantiene relativamente costante, confermando il ruolo predominante dei fattori pedologici nella determinazione della variabilità del vigneto.

Un aspetto cruciale emerso dallo studio riguarda l'influenza della variabilità spaziale sulle strategie di campionamento per la determinazione della maturazione dell'uva e delle decisioni di raccolta. I dati evidenziano che un campionamento casuale in vigneti con elevata eterogeneità spaziale potrebbe condurre a stime non rappresentative dello stato reale di maturazione, con ripercussioni sulla qualità della vendemmia e sulle caratteristiche enologiche dei futuri vini. La suddivisione del vigneto in zone omogenee di vigore, identificabili tramite remote o proximal sensing, rappresenta quindi un approccio strategico per migliorare la precisione del campionamento e ottimizzare le pratiche di gestione.

Va sottolineato, tuttavia, che i risultati ottenuti si riferiscono a uno specifico contesto sperimentale, caratterizzato da una determinata cultivar e da un particolare sistema di potatura. Pertanto, la loro applicabilità deve essere valutata con cautela in altri contesti viticoli che presentino differenti varietà, tipologie di potatura o condizioni pedoclimatiche. Alla luce delle evidenze riportate, è possibile considerare che la gestione della variabilità intra-parcellare può seguire due differenti approcci. Se si sceglie di non intervenire per ridurre le differenze di vigore tra le zone, mantenendo dunque l'eterogeneità esistente, sarà

necessario adottare protocolli di campionamento che tengano conto di ciascuna zona di vigore, garantendo una rappresentatività adeguata dei campioni raccolti. In alternativa, una mirata gestione nutrizionale e idrica potrebbe contribuire a uniformare le condizioni di crescita delle viti, riducendo le differenze di vigore tra le diverse aree del vigneto. In tal caso, una maggiore omogeneità consentirebbe l'adozione di protocolli di campionamento casuali, semplificando le procedure e garantendo una gestione più uniforme del vigneto.

Alla luce di queste evidenze, il presente studio conferma l'importanza di considerare la variabilità intra-parcellare non solo come una caratteristica intrinseca del vigneto, ma come un'opportunità strategica per migliorare la gestione agronomica, la qualità delle produzioni e la sostenibilità complessiva del sistema viticolo.

2.6 Riferimenti Bibliografici

Alliaume, F., Echeverria, G., Ferrer, M., and González Barrios, P. (2024). A Study of the Multivariate Spatial Variability of Soil Properties, and their Association with Vine Vigor Growing on a Clayish Soil. *J Soil Sci Plant Nutr* 24, 3282–3297. doi: 10.1007/s42729-024-01751-8

Arnó, J., Rosell, J. R., Blanco, R., Ramos, M. C., and Martínez-Casasnovas, J. A. (2012). Spatial variability in grape yield and quality influenced by soil and crop nutrition characteristics. *Precis. Agric.* 13, 393–410. doi: 10.1007/s11119-011-9254-1

Barbeau, G., Morlat, R., Asselin, C., Jacquet, A., and Pinard, C. (1998). Behaviour of the Cabernet Franc grapevine variety in various « *terroirs* » of the Loire Valley. Influence of the precocity on the composition of the harvested grapes for a normal climatic year (example of the year 1988). *OENO One* 32, 69. doi: 10.20870/oeno-one.1998.32.2.1050

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., and Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. doi: 10.1093/jxb/erq350

Bonilla, I., Martinez De Toda, F., and Martínez-Casasnovas, J. A. (2015). Vine vigor, yield and grape quality assessment by airborne remote sensing over three years: Analysis of unexpected relationships in cv. Tempranillo. *Span. J. Agric. Res.* 13, e0903. doi: 10.5424/sjar/2015132-7809

Bramley, R. G. V., Trought, M. C. T., and Praat, J.-P. (2011). Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterising variation in vineyard performance and options for the implementation of Precision Viticulture: Precision Viticulture - Marlborough. *Aust. J. Exp. Agric.* 17, 72–78. doi: 10.1111/j.1755-0238.2010.00119.x

Brillante, L., Bois, B., Lévêque, J., and Mathieu, O. (2016). Variations in soil-water use by grapevine according to plant water status and soil physical-chemical characteristics—A 3D spatio-temporal analysis. *Eur. J. Agron.* 77, 122–135. doi: 10.1016/j.eja.2016.04.004

- Calderon-Orellana, A., Matthews, M. A., Drayton, W. M., and Shackel, K. A. (2014). Uniformity of Ripeness and Size in Cabernet Sauvignon Berries from Vineyards with Contrasting Crop Price. *Am. J. Enol. Vitic.* 65, 81–88. doi: 10.5344/ajev.2013.13084
- Carrillo, E., Matese, A., Rousseau, J., and Tisseyre, B. (2016). Use of multi-spectral airborne imagery to improve yield sampling in viticulture. *Precis. Agric.* 17, 74–92. doi: 10.1007/s11119-015-9407-8
- Clarke, S. J., Lamont, K. J., Pan, H. Y., Barry, L. A., Hall, A., and Rogiers, S. Y. (2015). Spring root-zone temperature regulates root growth, nutrient uptake and shoot growth dynamics in grapevines: Root-zone warming, growth and N partitioning. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 21, 479–489. doi: 10.1111/ajgw.12160
- Clingeffer, P. (1989). Effect of varying node number per bearer on yield and juice composition of Cabernet Sauvignon grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res.* 29, 701. doi: 10.1071/EA9890701
- Dobrowski, S. z., Ustin, S. l., and Wolpert, J. a. (2003). Grapevine dormant pruning weight prediction using remotely sensed data. *Aust. J. Grape Wine Res.* 9, 177–182. doi: 10.1111/j.1755-0238.2003.tb00267.x
- Eltom, M., Trought, M. C. T., Agnew, R., Parker, A., and Winefield, C. S. (2017). Pre-budburst temperature influences the inner and outer arm morphology, phenology, flower number, fruitset, TSS accumulation and variability of *Vitis vinifera* L. Sauvignon Blanc bunches: Temperature and inflorescence development. *Aust. J. Grape Wine Res.* 23, 280–286. doi: 10.1111/ajgw.12260
- Eltom, M., Trought, M. C. T., and Winefield, C. S. (2014). The effect of pre-budbreak cane girdling on the physical and phenological development of the inner and outer arm in *Vitis vinifera* L. “Sauvignon blanc” inflorescence structures.
- Falquina, R., de la Vara, A., Cabos, W., Sein, D., and Gallardo, C. (2022). Impact of ocean-atmosphere coupling on present and future Köppen-Geiger climate classification in Europe. *Atmos. Res.* 275, 106223. doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106223

- Ferrer, M., Echeverría, G., Pereyra, G., Gonzalez-Neves, G., Pan, D., and Mirás-Avalos, J. M. (2020). Mapping vineyard vigor using airborne remote sensing: relations with yield, berry composition and sanitary status under humid climate conditions. *Precis. Agric.* 21, 178–197. doi: 10.1007/s11119-019-09663-9
- Ferro, M. V., Catania, P., Micciché, D., Pisciotta, A., Vallone, M., and Orlando, S. (2023). Assessment of vineyard vigour and yield spatio-temporal variability based on UAV high resolution multispectral images. *Biosyst. Eng.* 231, 36–56. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2023.06.001
- Ferro, M. V., Sørensen, C. G., and Catania, P. (2024). Comparison of different computer vision methods for vineyard canopy detection using UAV multispectral images. *Comput. Electron. Agric.* 225, 109277. doi: 10.1016/j.compag.2024.109277
- Field, S. K., Smith, J. P., Morrison, E. N., Emery, R. J. N., and Holzapfel, B. P. (2020). Soil Temperature Prior to Veraison Alters Grapevine Carbon Partitioning, Xylem Sap Hormones, and Fruit Set. *Am J Enol Vitic.* 71, 52–61. doi: 10.5344/ajev.2019.19038
- Flexas, J., Badger, M., Chow, W. S., Medrano, H., and Osmond, C. B. (1999). Analysis of the Relative Increase in Photosynthetic O₂ Uptake When Photosynthesis in Grapevine Leaves Is Inhibited following Low Night Temperatures and/or Water Stress. *Plant Physiol.* 121, 675–684. doi: 10.1104/pp.121.2.675
- Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., and Fraisse, C. W. (2004). Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agron. J.* 96, 100–108. doi: 10.2134/agronj2004.1000
- Gaiotti, F., Marcuzzo, P., Belfiore, N., Lovat, L., Fornasier, F., and Tomasi, D. (2017). Influence of compost addition on soil properties, root growth and vine performances of *Vitis vinifera* cv Cabernet sauvignon. *Sci. Hortic.* 225, 88–95. doi: 10.1016/j.scienta.2017.06.052
- Gatti, M., Dosso, P., Maurino, M., Merli, M. C., Bernizzoni, F., José Pirez, F., et al. (2016). MECS-VINE®: A New Proximal Sensor for Segmented Mapping of Vigor and Yield Parameters on Vineyard Rows. *Sensors* 16, 2009. doi: 10.3390/s16122009

- Gatti, M., Garavani, A., Squeri, C., Diti, I., De Monte, A., Scotti, C., et al. (2022). Effects of intra-vineyard variability and soil heterogeneity on vine performance, dry matter and nutrient partitioning. *Precis. Agric.* 23, 150–177. doi: 10.1007/s11119-021-09831-w
- Gatti, M., Garavani, A., Vercesi, A., and Poni, S. (2017). Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management: Vigour mapping and vineyard management. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 23, 399–408. doi: 10.1111/ajgw.12286
- Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B., and Louis, J. (2002). Optical remote sensing applications in viticulture - a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 8, 36–47. doi: 10.1111/j.1755-0238.2002.tb00209.x
- Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B. P., and Louis, J. P. (2011). Within-season temporal variation in correlations between vineyard canopy and winegrape composition and yield. *Precis. Agric.* 12, 103–117. doi: 10.1007/s11119-010-9159-4
- Junges, A. H., Fontana, D. C., and Lampugnani, C. S. (2019). Relationship between the normalized difference vegetation index and leaf area in vineyards. *Bragantia* 78, 297–305. doi: 10.1590/1678-4499.2018168
- Karn, R., Hillin, D., Helwi, P., Scheiner, J., and Guo, W. (2024). Assessing grapevine vigor as affected by soil physicochemical properties and topographic attributes for precision vineyard management. *Sci. Hortic.* 328, 112857. doi: 10.1016/j.scienta.2024.112857
- Keller, M. (2020). The Science of Grapevine. In *Anatomy and Physiology*, 3rd ed.; Elsevier Ltd.
- King, P. D., Smart, R. E., and McClellan, D. J. (2014). Within-vineyard variability in vine vegetative growth, yield, and fruit and wine composition of Cabernet Sauvignon in Hawke's Bay, New Zealand: Vigour effects on Cabernet Sauvignon vine growth. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 20, 234–246. doi: 10.1111/ajgw.12080
- Lamb, D., Hall, A., and Louis, J. (2001). Airborne remote sensing of vines for canopy variability and productivity. *Aust. Grapegrower Winemaker* 89-94.

Lefort, P. L., and Schaeffer, A. (1979). Etude des variations de maturité des grappes de vigne selon leur position sur la souche Recherche d'une méthode d'échantillonnage.

Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., Bardsley, D. K., and Rouvellac, E. (2014). The viticultural system and climate change: coping with long-term trends in temperature and rainfall in Roussillon, France. *Reg. Environ. Change* 14, 1951–1966. doi: 10.1007/s10113-013-0446-2

Lopes, C., and Pinto, P. A. (2005). Easy and accurate estimation of grapevine leaf area with simple mathematical models. *Vitis*, 44(2), 55-61.

Matese, A., and Di Gennaro, S. F. (2015). Technology in precision viticulture: A state of the art review. *Int. J. Wine Res.* 7, 69–81.

May, P. (2000). From bud to berry, with special reference to inflorescence and bunch morphology in *Vitis vinifera* L. *Aust. J. Exp. Agric.* 6, 82–98. doi: 10.1111/j.1755-0238.2000.tb00166.x

May, P., Clingeffer, P., Brien, C., and Scholefield, P. (1978). Harvest pruning of young Sultana vines under various training systems. *Aust. J. Exp. Agric.* 18, 847. doi: 10.1071/EA9780847

McClymont, L., Goodwin, I., Mazza, M., Baker, N., Lanyon, D. M., Zerihun, A., et al. (2012). Effect of site-specific irrigation management on grapevine yield and fruit quality attributes. *Irrig. Sci.* 30, 461–470. doi: 10.1007/s00271-012-0376-7

Miccichè, D., De Rosas, M. I., Ferro, M. V., Di Lorenzo, R., Puccio, S., and Pisciotta, A. (2023). Effects of artificial canopy shading on vegetative growth and ripening processes of cv. Nero d'Avola (*Vitis vinifera* L.). *Front. Plant Sci.* 14, 1210574. doi: 10.3389/fpls.2023.1210574

Odeh, I. O. A., McBratney, A. B., and Chittleborough, D. J. (1992). Soil Pattern Recognition with Fuzzy-c-means: Application to Classification and Soil—Landform Interrelationships.

- Pagliai, A., Ammoniaci, M., Sarri, D., Lisci, R., Perria, R., Vieri, M., et al. (2022). Comparison of Aerial and Ground 3D Point Clouds for Canopy Size Assessment in Precision Viticulture. *Remote Sensing* 14, 1145. doi: 10.3390/rs14051145
- Pellegrino, A., Lebon, E., Simonneau, T., and Wery, J. (2005). Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Aust. J. Grape Wine Res.* 11, 306–315. doi: 10.1111/j.1755-0238.2005.tb00030.x
- Pereyra, G., Pellegrino, A., Ferrer, M., and Gaudin, R. (2023). How soil and climate variability within a vineyard can affect the heterogeneity of grapevine vigour and production. *OENO One* 57, 297–313. doi: 10.20870/oeno-one.2023.57.3.7498
- Pucheu-Planté, B., and Seguin, G. (1981). Influence des facteurs naturels sur la maturation et la surmaturation du raisin dans le Sauternais, en 1978 et 1979. *OENO One* 15, 143. doi: 10.20870/oeno-one.1981.15.3.1362
- Ramos, M., Jones, G., and Martínez-Casasnovas, J. (2008). Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. *Clim. Res.* 38, 1–15. doi: 10.3354/cr00759
- Rey-Caramés, C., Diago, M., Martín, M., Lobo, A., and Tardaguila, J. (2015). Using RPAS Multi-Spectral Imagery to Characterise Vigour, Leaf Development, Yield Components and Berry Composition Variability within a Vineyard. *Remote Sensing* 7, 14458–14481. doi: 10.3390/rs71114458
- Schmitz, M., and Sourell, H. (2000). Variability in soil moisture measurements. *Irrig. Sci.* 19, 147–151. doi: 10.1007/s002710000015
- Tardaguila, J., Baluja, J., Arpon, L., Balda, P., and Oliveira, M. (2011). Variations of soil properties affect the vegetative growth and yield components of “Tempranillo” grapevines. *Precis. Agric.* 12, 762–773. doi: 10.1007/s11119-011-9219-4
- Tardaguila, J., Stoll, M., Gutiérrez, S., Proffitt, T., and Diago, M. P. (2021). Smart applications and digital technologies in viticulture: A review. *Smart Agric. Technol.* 1, 100005. doi: 10.1016/j.atech.2021.100005

Tesic, D., Woolley, D. J., Hewett, E. W., and Martin, D. J. (2002). Environmental effects on cv Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) grown in Hawke's Bay, New Zealand.: 1. Phenology and characterisation of viticultural environments. *Aust. J. Grape Wine Res.* 8, 15–26. doi: 10.1111/j.1755-0238.2002.tb00207.x

Tisseyre, B., Mazzoni, C., and Fonta, H. (2008). Within-field temporal stability of some parameters in Viticulture: potential toward a site specific management. *OENO One* 42, 27. doi: 10.20870/oenone.2008.42.1.834

Van Leeuwen, C., Roby, J.-P., and De Rességuier, L. (2018). Soil-related terroir factors: a review. *OENO One* 52, 173–188. doi: 10.20870/oenone.2018.52.2.2208

Van Leeuwen, C., Barbe, J.-C., Darriet, P., Geffroy, O., Gomès, E., Guillaumie, S., et al. (2020). Recent advancements in understanding the terroir effect on aromas in grapes and wines: This article is published in cooperation with the XIIIth International Terroir Congress November 17-18 2020, Adelaide, Australia. Guests editors: Cassandra Collins and Roberta De Bei. *OENO One* 54. doi: 10.20870/oenone.2020.54.4.3983

3 Variabilità Intra-Pianta

3.1 Introduzione

È noto che all'interno della stessa pianta, non tutti i grappoli presentano lo stesso grado di maturazione. Uno dei primi studi che ha indagato questa variabilità è quello di Lefort e Schaeffer (1979), condotto in diversi vigneti dell'Alsazia, su cultivar autoctone francesi e non potate sia a Guyot singolo che doppio. L'obiettivo principale della ricerca era quello di analizzare le differenze di maturazione delle uve, in termini di zuccheri e acidità titolabile, provenienti da diversi punti del capo a frutto, considerando i grappoli derivanti da germogli prossimali, mediani e distali. Oltre alla valutazione delle differenze di maturazione lungo il capo a frutto, lo studio ha esaminato anche la risposta in termini di maturazione tra il primo e il secondo grappolo dello stesso germoglio.

I risultati hanno evidenziato che, nel contesto specifico delle viti potate a Guyot, esiste una variabilità significativa nella maturazione delle uve in relazione al germoglio di appartenenza. In particolare, i grappoli appartenenti ai germogli distali presentavano mediamente livelli di zuccheri superiori e una minore acidità titolabile rispetto a quelli dei germogli prossimali e mediani. Questo risultato può essere spiegato dalla natura acropeta della formazione delle gemme e delle infiorescenze, secondo quanto riportato da Srinivasan and Mullins (1981) e Swanepoel e Archer (1988).

In questo contesto, diversi studi (May et al., 1976; Clingeleffer, 1989; Friend e Trought, 2007) suggeriscono che le gemme in posizione distale germogliano prima rispetto a quelle in posizione basale o intermedia. Tale differenza fenologica porta a una emergenza anticipata delle infiorescenze, influenzando così il grado di maturazione delle uve.

Inoltre, è stato osservato che il primo grappolo di un germoglio, indipendentemente dalla posizione del germoglio sul capo a frutto, manifesta uno stato di maturazione più avanzato in termini di zuccheri ma con un'acidità titolabile più bassa. Studi successivi hanno esplorato le cause di questa variabilità tra i grappoli dello stesso germoglio, arrivando alla conclusione che esistono marcate differenze nei tempi di fioritura tra i grappoli basali e apicali. In particolare, le infiorescenze basali emergono e fioriscono prima di quelle situate nella porzione distale del germoglio (Wolpert et al., 1980; Trought, 1997; May, 1987).

Oltre a questa differenza temporale, è emerso che le infiorescenze apicali tendono ad avere un numero inferiore di fiori rispetto a quelle basali (Huglin e Balthazard, 1975; Eltom et al., 2014).

Un altro studio condotto da Tarter and Keuter (2008) in Napa Valley ha riportato che i grappoli situati in posizione basale su germogli di diverse cultivar internazionali, tra cui Cabernet Sauvignon, Merlot e Chardonnay, erano più pesanti del 20%-35% rispetto a quelli situati nella seconda posizione sul germoglio. Inoltre, questi grappoli mostrano una variabilità maggiore in termini di peso. Tuttavia, la valutazione delle differenze lungo il cordone non ha rivelato differenze specifiche tra le diverse posizioni. Un altro fattore che contribuisce alla variabilità è il diametro del germoglio. Eltom et al. (2014) hanno suggerito che le infiorescenze sviluppate su germogli di maggiore diametro abbiano una maggiore probabilità di sviluppare un'ala esterna, la quale matura più tardi. La stessa ricerca riporta anche una correlazione positiva tra l'area della sezione trasversale del tralcio e il numero di infiorescenze, suggerendo che un maggiore volume del germoglio possa favorire la produzione di infiorescenze più numerose e potenzialmente più vigorose.

In sintesi, la variabilità intra-pianta nella maturazione delle uve è influenzata da diversi fattori legati alla posizione e al diametro dei germogli e ai tempi fenologici di fioritura.

Alla luce delle evidenze presenti in letteratura, lo studio della variabilità intra-pianta assume particolare rilevanza, specialmente in un contesto di campionamento per grappolo. È infatti fondamentale comprendere se la zona della pianta da cui vengono prelevati i campioni influenzi in modo significativo i risultati, al fine di garantire la rappresentatività dei dati. In questo scenario, l'obiettivo principale di questo studio è valutare se la variabilità intra-pianta nelle viti potate a cordone speronato presenta livelli di variabilità tali da richiedere un'attenzione particolare nella definizione di futuri protocolli di campionamento. Un altro aspetto rilevante di questa ricerca riguarda l'incidenza del vigore, in quanto è fondamentale comprendere se il livello di vigore della pianta modifichi in modo significativo la variabilità intra-pianta.

L'ipotesi che guida questa ricerca è che la variabilità riportata in letteratura e osservata lungo il capo a frutto nelle viti potate a Guyot, con la sua evidente distribuzione acropeta,

non si ripeta nelle viti potate a cordone speronato. Questo perché quest'ultimo tipo di potatura risulta essere molto meno suscettibile al fenomeno dell'acrotonia che caratterizza il Guyot. Inoltre, considerata questa differenza potenziale, si desidera approfondire se la variabilità all'interno del germoglio sia ancora presente anche in un contesto di potatura a cordone speronato. Questo aspetto risulta cruciale per la progettazione di protocolli di campionamento che possano tenere conto, o meno, di eventuali differenze intra-pianta significative, e se tali differenze siano influenzate dal vigore della pianta.

3.2 Materiali e Metodi

3.2.1 Studio della Variabilità Intra-pianta e Protocollo di Codifica dei Campioni

Lo studio della variabilità intra-pianta è stato condotto all'interno dello stesso vigneto sperimentale e ha coinvolto le medesime 36 viti campione (12 piante x 3 classi di sviluppo vegetativo) utilizzate per le analisi descritte nel capitolo precedente, estendendo l'analisi anche all'annata 2024. Per ciascuna vite, è stata indagata la variabilità intra-pianta considerando tre fattori principali (il centro produttivo, nodo sul centro produttivo e posizione grappolo sul germoglio). Il centro produttivo (C.P.) di provenienza dei grappoli è stato classificato in base alla distanza dal ceppo lungo il cordone permanente (figura 33), identificando con il codice 1 il centro produttivo più vicino al ceppo, quello intermedio con il codice 2 e quello più distante con il codice 3. Poiché ciascun sperone era potato a due gemme, è stato valutato se i grappoli sviluppatisi dalla prima gemma presentassero differenze rispetto a quelli derivanti dalla seconda (nodo di provenienza). Infine, è stata esaminata la posizione del grappolo lungo il germoglio (G.S.G.) per verificare eventuali variazioni tra grappoli appartenenti allo stesso germoglio.

Per garantire una tracciabilità rigorosa fino al momento dell'analisi, subito dopo la completa allegagione (BBCH 71), tutti i grappoli delle 12 piante selezionate per ciascun livello di vigore sono stati contrassegnati con un codice riportato in una etichetta e quest'ultima è stata legata al rachide. Come riportato in figura 33, ogni etichetta riportava informazioni dettagliate sulla provenienza del grappolo, includendo il livello di vigore (AV, MV, BV), il numero della pianta (da 1 a 12), il centro produttivo lungo il cordone (1, 2, 3), il nodo di origine (1, 2) e la posizione sul germoglio (A, B). Questo sistema di codifica ha assicurato un'organizzazione precisa dei campioni, eliminando qualsiasi margine di errore durante le fasi di analisi. Sono stati esclusi dalla raccolta i grappoli sviluppatisi da germogli secondari, laterali (femminelle) o da gemme latenti non rientranti nella potatura invernale.

La vendemmia è stata effettuata contestualmente a quella dell'intero vigneto, in modo da garantire che i campioni analizzati rappresentassero il reale stato di maturità delle uve al momento della raccolta commerciale. I grappoli sono stati immediatamente trasferiti in laboratorio, dove sono stati pesati singolarmente e successivamente ammostati integralmente. Per ciascun campione, un volume compreso tra 0,5 e 1 ml è stato prelevato per la determinazione dei Solidi Solubili Totali (SST, °Brix) mediante un rifrattometro digitale (HI96811, Hanna Instruments, Padova, Italia), mentre 10 ml di mosto sono

stati utilizzati per la misurazione del pH e dell'acidità titolabile, eseguita con un titolatore automatico (Titromatic 8652, Crison Instruments, Barcellona, Spagna).

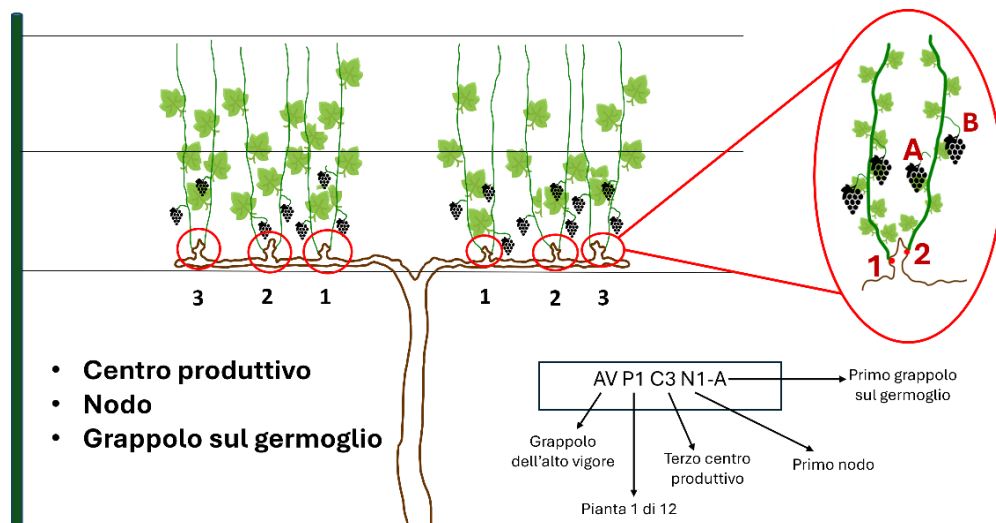


Figura 33. Schema della metodologia adottata per lo studio della variabilità intra-pianta. L'illustrazione rappresenta la suddivisione dei grappoli in base al centro produttivo lungo il cordone permanente (1 = vicino al ceppo, 2 = intermedio, 3 = più distante), al nodo di origine (1° o 2° nodo) e alla posizione sul germoglio (A, B). Il sistema di classificazione ha permesso di identificare con precisione ogni grappolo per l'analisi, garantendo una tracciabilità rigorosa dei campioni

3.2.2 Determinazione del Numero di Fiori, Acini e Percentuale di Allegagione

Durante la stagione 2023, tutte le infiorescenze catalogate sono state utilizzate per il conteggio del numero di fiori e acini, consentendo la determinazione della percentuale di allegagione. Nella fase di prefioritura (BBCH 55), corrispondente allo stadio di separazione dei bottoni fiorali, tutte le infiorescenze (n=300) sono state misurate e contrassegnate su ciascuna pianta con un codice univoco per garantirne la tracciabilità fino alla raccolta. Successivamente, ogni infiorescenza è stata avvolta con una rete di tulle a maglia fine, atta a trattenere le calipre staccate senza compromettere la ventilazione e riducendo il rischio di ristagno di umidità (Fig. 34).

Dopo la completa fioritura, i sacchetti di tulle sono stati rimossi e trasportati in laboratorio per il conteggio delle calipre. Queste sono state distribuite uniformemente su un foglio bianco e successivamente fotografate. Le immagini ottenute sono state elaborate con il software ImageJ (v. 1.53, National Institutes of Health, USA) per il conteggio automatico dei singoli elementi, utilizzando la funzione "Analyze Particles". Il processo di analisi ha

incluso la conversione delle immagini in scala di grigi, la soglia binaria per distinguere le calipre dallo sfondo e l'applicazione della funzione di conteggio automatico.

Alla raccolta, per tutti i grappoli raccolti, oltre ad aver definito i parametri già descritti, si è proceduto alla determinazione del numero di acini. Il rapporto tra il numero di fiori e il numero di acini ha permesso di definire la percentuale di allegagione.



Figura 34. Infiorescenze di cv. Catarratto coperte con sacchetti di tulle nella fase di prefioritura (BBCH 55). Il rivestimento in tulle ha consentito la raccolta delle calipre cadute, permettendo la successiva quantificazione per la determinazione della percentuale di allegagione.

3.2.3 Analisi Statistica

L'analisi statistica è stata condotta per valutare la variabilità intra-pianta in relazione ai diversi livelli di vigore e alle fonti di variabilità considerate. Per ciascun parametro analizzato (peso del grappolo, SST, pH, acidità titolabile), la distribuzione dei dati è stata preliminarmente verificata mediante il test di normalità di Anderson-Darling. In caso di deviazione dalla normalità, è stata applicata una trasformazione logaritmica per rendere i dati conformi ai requisiti dei test parametrici. La presenza di valori anomali è stata valutata con il test di Grubbs, escludendo eventuali outlier che potessero influenzare i risultati.

Per verificare l'omogeneità delle varianze tra i gruppi di confronto, è stato eseguito il test di Levene. I dati validati sono stati successivamente analizzati mediante un'ANOVA a due vie per esaminare l'effetto dei fattori "centro produttivo" (1, 2, 3), "nodo di origine" (1, 2) e "posizione del grappolo sul germoglio" (A, B), oltre all'effetto del "vigore" della pianta (alto, medio, basso) e delle loro interazioni. Le differenze tra le medie sono state valutate con il test di Tukey, adottando un livello di significatività di $p < 0,05$.

Per analizzare la variabilità dei parametri studiati e identificare le componenti principali che la determinano, è stato applicato un modello a effetti misti. Questo approccio ha permesso di stimare l'influenza dei fattori fissi e di quantificare la quota di variabilità attribuibile ai fattori ad effetti casuali (random), fornendo così una descrizione dettagliata della struttura gerarchica dei dati. L'adozione di un modello misto si è resa necessaria per distinguere la variabilità associata ai fattori sperimentali predefiniti da quella derivante da sorgenti di variabilità non controllabili direttamente, garantendo un'interpretazione più accurata delle dinamiche che influenzano i parametri studiati. La struttura gerarchica dei dati è stata riflessa attraverso un annidamento dei fattori random, in cui il nodo è stato considerato annidato nel centro produttivo, il centro produttivo nella pianta e la pianta nel vigore. Questo schema ha consentito di modellare in modo appropriato le dipendenze tra le osservazioni e di evitare sottostime delle componenti di varianza. Parallelamente, è stata valutata la significatività dei fattori fissi attraverso test di ipotesi basati sulla distribuzione F, al fine di determinare se il vigore esercitasse un'influenza significativa sui parametri analizzati. Per l'analisi delle differenze statistiche relative alla percentuale di allegagione, i dati percentuali sono stati sottoposti a una trasformazione preliminare. In primo luogo, i valori percentuali sono stati espressi in valore assoluto. Successivamente, è stata applicata la trasformazione della radice quadrata per stabilizzare la varianza. Infine, è stata utilizzata la trasformazione arcsen della radice quadrata. Questo processo riduce le asimmetrie tipiche dei dati percentuali e consente di ottenere una distribuzione adeguata ai test parametrici come l'ANOVA. Tutte le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il software Minitab 19 (State College, PA: Minitab, Inc.).

3.3 Risultati

3.3.1 Analisi Preliminare

La decisione di separare le analisi per anno è stata motivata dalla forte evidenza di una variabilità interannuale significativa nei parametri analizzati. In particolare, l'effetto anno è risultato altamente significativo per tutti i parametri considerati (zuccheri, pH, acidità titolabile e peso del grappolo). L'analisi della varianza ha evidenziato anche interazioni significative tra anno e altri fattori, come il vigore, suggerendo un effetto di quest'ultimo sulla maturazione dell'uva non uniforme nel tempo. Le differenze tra i livelli di vigore, infatti, sono apparse più accentuate in alcune annate, mentre in altre tendevano ad attenuarsi, come evidenziato dai risultati relativi all'interazione tra anno e vigore ($p < 0.001$). Probabilmente le condizioni ambientali e climatiche, variabili da un anno all'altro, influenzano la risposta delle viti al vigore in modo non lineare. Un esempio evidente è l'interazione tra anno e vigore per il parametro zuccheri, in quanto mostrava in alcuni anni, differenze tra i livelli di vigore più marcate mentre, in altri anni, probabilmente a causa di fattori climatici specifici, la variabilità tra i livelli di vigore si attenuava. Analoghe osservazioni sono state fatte per altri parametri per i quali le interazioni tra anno e vigore hanno mostrato una risposta variabile in funzione delle annate (es. pH, acidità e peso del grappolo).

L'analisi separata per anno è dunque risultata necessaria per evitare che l'aggregazione dei dati potesse mascherare gli effetti significativi di queste interazioni e compromettere l'interpretazione dei risultati. Separando i dati, infatti, è stato possibile isolare la variabilità stagionale e comprendere meglio l'influenza di ciascun fattore nelle diverse annate, evitando di sovrapporre effetti che potrebbero avere avuto una rilevanza variabile a seconda delle condizioni climatiche di ogni anno.

3.3.2 Numero di Fiori, Acini e Percentuale di Allegagione

L'analisi del numero di fiori e acini per grappolo ha evidenziato differenze significative in relazione sia al vigore sia alla posizione del grappolo sul germoglio. Di conseguenza, questi stessi fattori hanno influenzato in modo significativo la percentuale di allegagione. Tuttavia, non sono emerse differenze per gli altri fattori considerati nello studio della variabilità intra-pianta (centro produttivo e nodo), per nessuno dei parametri analizzati. Inoltre, non sono state rilevate interazioni significative tra i fattori esaminati.

Un'analisi più dettagliata dei risultati mostra che, in media, le infiorescenze MV hanno prodotto il maggior numero di fiori per grappolo (383), con un incremento del 16% rispetto ad AV e del 22% rispetto a BV. Considerando il fattore G.S.G., il grappolo A ha mostrato un numero significativamente maggiore di fiori rispetto al grappolo B, con una differenza media di circa 275 fiori (Tab. 8). Tali differenze si sono riflesse nella percentuale di allegagione. Infatti, nonostante MV presentasse il maggior numero di fiori per grappolo, esse hanno registrato la minore percentuale di allegagione (37%), rispetto ad AV e BV, le cui percentuali (45,5% e 51,0%, rispettivamente) non differivano significativamente tra loro.

Analogamente, il grappolo A, caratterizzato dal maggior numero di fiori, ha mostrato una percentuale di allegagione significativamente inferiore (36,2%) rispetto al grappolo B (53,0%). Queste differenze si sono riflesse anche sul numero di acini per grappolo. Sebbene i grappoli MV presentassero, in media, un numero maggiore di fiori, la loro ridotta percentuale di allegagione ha determinato una produzione di acini comparabile a quello osservato in AV e BV. Diversamente, considerando il fattore G.S.G., il grappolo A, pur registrando una percentuale di allegagione significativamente inferiore rispetto al grappolo B, ha prodotto un numero di acini superiore di quasi il 60%, attribuibile alla maggiore abbondanza iniziale di fiori, superiore del 100% rispetto al grappolo B.

Tab. 8. Numero di fiori e acini per grappolo, percentuale di allegagione in relazione al vigore (AV, MV, BV) e alla posizione del grappolo sul germoglio (G.S.G., A-B) per la stagione vegeto-produttiva 2023.

N° FIORI							N° ACINI						
A		B		Media			A		B		Media		
AV	458 ± 31.2	n.s.	203 ± 23.5		331 ± 26.6	B	AV	171 ± 10.1	n.s.	109 ± 7.26		140 ± 7.78	AB
MV	514 ± 38.0		253 ± 18.7		383 ± 27.1	A	MV	172 ± 9.08		104 ± 7.20		138 ± 6.69	B
BV	471 ± 70.5		157 ± 45.9		314 ± 63.8	B	BV	178 ± 14.0		101 ± 12.0		140 ± 14.0	A
Media	481 ± 23.5	A	205 ± 14.4	B			Media	174 ± 6.15	A	109 ± 4.90	B		
% DI ALLEGAGIONE													
A		B		Media									
AV	37.27 ± 3.43	n.s.	53.80 ± 4.76		45.53 ± 2.20	A							
MV	33.39 ± 3.04		41.01 ± 3.44		37.20 ± 1.71	B							
BV	37.86 ± 7.98		64.22 ± 8.47		51.04 ± 2.40	A							
Media	36.17 ± 2.18	B	53.0 ± 2.84	A									

I dati sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$), "n.s." differenze non significative. Le lettere maiuscole evidenziano differenze significative tra le classi di vigore indipendentemente dall'epoca di misurazione o tra le epoche indipendentemente dalla classe di vigore. Le lettere minuscole indicano differenze significative dovute all'interazione tra classe di vigore ed epoca di misurazione.

3.3.3 Peso del Grappolo

L'analisi della dimensione del grappolo ha evidenziato una notevole coerenza nei trend osservati durante le tre annate di studio. Nel 2022, l'ANOVA ha rilevato una variazione significativa del peso del grappolo in funzione del vigore e tra le diverse piante. Tuttavia, tra i fattori che spiegano la variabilità intra-pianta, solo il fattore G.S.G. ha mostrato un effetto statisticamente rilevante (Tab. 9). In particolare, il grappolo B, ovvero il secondo sul germoglio, ha sistematicamente registrato un peso inferiore rispetto al grappolo A. La mancanza di interazione con il vigore suggerisce che tale andamento sia costante indipendentemente dal livello di vigore considerato.

Tali risultati sono stati confermati anche nel 2023, anno in cui il grappolo A ha evidenziato un peso superiore di circa il 70% rispetto al grappolo B. Nel 2024, le differenze tra i due grappoli si sono mantenute, sebbene con un divario quantitativo inferiore, pari a un incremento del 46% a favore del grappolo A.

L'importanza del fattore G.S.G. è emersa anche dall'analisi delle componenti di varianza mediante il modello a effetti misti. Nel 2022, tale fattore ha spiegato il 7% della variabilità totale ($p = 0.157$), mentre le differenze tra le piante e tra i diversi livelli di vigore hanno contribuito per il 10.7% (Tab. 10). La quota preponderante della variabilità è risultata attribuibile all'errore residuo (70%). Nel 2023, pur mantenendo la stessa logica interpretativa, si sono osservate differenze rilevanti a livello quantitativo: la variabilità spiegata da G.S.G. è aumentata al 28% ($p = 0.004$), mentre la componente associata alle differenze tra le piante è rimasta sostanzialmente invariata (13.6%), determinando una riduzione dell'errore residuo al 58%. I dati del 2024 confermano questo trend, con G.S.G. che spiega il 27.8% della variabilità totale ($p = 0.043$), seguito dalla componente legata alle differenze tra piante (14.2%, $p = 0.055$). Anche in questo caso, la quota di variabilità non spiegata rimane preponderante, attestandosi al 54.7% ($p = 0.000$).

Nel complesso, questi risultati sottolineano il ruolo chiave di G.S.G. nella determinazione del peso del grappolo, evidenziando al contempo una quota rilevante di variabilità residua non catturata dal modello.

Tabella 9. Differenze in termini di peso del grappolo (g) in funzione del centro produttivo (C.P.), del nodo e della posizione del grappolo sul germoglio (G.S.G.) per le annate 2022, 2023 e 2024.

	2022			2023			2024	
C.P.								
1	145.0 ± 0.11	n.s.		142.5 ± 0.07	n.s.		114.7 ± 0.10	n.s.
2	159.3 ± 0.12			137.8 ± 0.07			107.1 ± 0.10	
3	164.3 ± 0.11			128.5 ± 0.11			102.4 ± 0.10	
Nodo								
1	144.2 ± 0.09	n.s.		136.5 ± 0.07	n.s.		101.2 ± 0.11	n.s.
2	168.2 ± 0.09			136.2 ± 0.06			115.0 ± 0.07	
G.S.G.								
A	205.1 ± 0.07	a		126.1 ± 0.05	a		131.3 ± 0.05	a
B	128.1 ± 0.17	b		73.8 ± 0.12	b		90.4 ± 0.24	b

I valori sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse nella stessa colonna indicano differenze significative. L'assenza di differenze significative tra i livelli di ciascun fattore è indicata da "n.s." (non significativo).

Tabella 10. Componenti di varianza e test di significatività per il modello a effetti misti applicato ai dati del **peso del grappolo** nei tre anni di studio (2022-2024).

	2022		2023		2024	
Fattore	Varianza	p-value	Varianza	p-value	Varianza	p-value
G.S.G.	425.9 (7.2%)	0.157	1190.7 (27.5%)	0.004	637.3 (27.8%)	0.043
Pianta (vigore)	631.3 (10.7%)	0.006	588.2 (13.6%)	0.028	326.2 (14.2%)	0.055
C.P. (vigore, pianta)	433.4 (7.4%)	0.142	0.00 (0.0%)	*	76.0 (3.3%)	0.362
Nodo (C.P., pianta, vigore)	0.00 (0.0%)	*	0.00 (0.0%)	*	0.00 (0.0%)	*
Errore residuo	4405.6 (74.7%)	0.000	2544.6 (58.8%)	0.000	1255.1 (54.7%)	0.000
Varianza totale	5896.2		4323.6		2294.6	

La tabella riporta la varianza stimata per ciascun fattore del modello, con la percentuale relativa tra parentesi rispetto alla varianza totale.

3.3.4 Solidi Solubili Totali (°Brix)

I risultati del 2022 mostrano che il fattore vigore e il fattore pianta hanno avuto un effetto significativo sul contenuto di SST ($p = 0.000$), mentre nessun effetto significativo è stato rilevato per i fattori relativi alla variabilità intra-pianta (centro produttivo, nodo e posizione del grappolo sul germoglio), né per le loro interazioni. In particolare, l'analisi ha valutato se i grappoli provenienti da centri produttivi diversi, da nodi differenti e da posizioni diverse sul germoglio presentassero differenze significative nel contenuto di SST, senza tuttavia evidenziare variazioni rilevanti (Tab. 11). L'assenza di interazioni tra questi fattori il vigore indica inoltre che la variabilità intra-pianta è risultata invariata tra i diversi livelli di vigore, confermando che essa può essere considerata trascurabile. Questi risultati sono supportati anche dall'analisi dei modelli a effetti misti, secondo cui l'analisi della componente di varianza mostra che la variabilità nei valori di SST è principalmente

influenzata dal fattore pianta annidato nei livelli di vigore (Tab. 12). In particolare, il fattore "pianta (vigore)" spiega il 52.07% della varianza totale (varianza = 0.78); questo suggerisce che la variabilità nei valori SST osservata tra le piante non può essere spiegata solo dal vigore stesso, ma anche dalle differenze tra piante appartenenti allo stesso livello di vigore. Un valore elevato di questa varianza indica che, sebbene tutte le piante siano classificate in base ai livelli di vigore (alto, medio e basso), esistono differenze significative nei valori di SST anche all'interno dello stesso livello di vigore, indicando che queste non sono tutte simili tra loro e che mostrano una variabilità interna.

Gli altri fattori considerati nel modello, come il nodo e la posizione del grappolo, non mostrano significativi effetti sulla variabilità di SST (variabilità spiegata pari a zero). Il centro produttivo, anche esso non significativo ($p = 0.092$), manifesta il 5.91% della variabilità totale. Inoltre, il modello indica che una quota del 42.02% della variabilità totale è dovuta all'errore residuo, rappresentando la parte di variabilità che non può essere attribuita ai fattori random inclusi nel modello.

In sintesi, l'effetto principale sulla variabilità dei valori di SST è dovuto alle differenze tra le piante all'interno dei livelli di vigore, con una quota significativa di variabilità residua non spiegata dal modello.

Il test degli effetti fissi conferma che il vigore è un fattore decisivo nel determinare le differenze nei valori di SST (Tab. 13). Il test F ha prodotto un valore F elevato di 18,98 e un p-value molto basso (0,000), indicando che le differenze tra i livelli di vigore sono ampie rispetto alla variabilità residua e che l'effetto del vigore sui valori di SST è altamente significativo. Questi risultati sono supportati dal valore R^2 di 76,65%, che indica che il modello è in grado di spiegare più della metà della variabilità osservata nei valori di SST. Ulteriori conferme arrivano dal test di Levene il quale suggerisce che la variabilità del parametro SST differisce solo tra i gruppi di vigore, con varianze significativamente diverse tra i livelli di vigore (Fig. 35).

I risultati del 2023 sono in linea con quelli ottenuti nell'anno precedente. Anche in questo caso, il fattore vigore e il fattore pianta hanno mostrato un effetto significativo sul contenuto di SST ($p = 0.000$), mentre nessuno dei fattori legati alla variabilità intra-pianta ha evidenziato effetti significativi. Inoltre, non è stata rilevata alcuna interazione significativa tra questi fattori e il vigore, confermando che l'assenza di variabilità intra-pianta osservata nel 2022 si ripresenta costantemente in ciascuno dei tre livelli di vigore (Tab. 11).

L'analisi del modello a effetti misti indica che il fattore pianta, annidato nel vigore, spiega il 45.19% della varianza totale (varianza = 0.72) (Tab. 12). Il centro produttivo e il nodo contribuiscono rispettivamente per il 7.06% e il 7.92%, sebbene nessuno dei due risulti significativo. L'errore residuo rappresenta il 39.83% della variabilità totale. Il test degli effetti fissi conferma il ruolo determinante del vigore, con un livello di significatività pari a $p = 0.032$ (Tab. 13). Questi risultati sono ulteriormente supportati da un valore R^2 del 76.38%, indicando che il modello spiega oltre la metà della variabilità osservata nei valori di SST. Tuttavia, a differenza dell'anno precedente, il test di Levene ha dimostrato che nel 2023 i tre livelli di vigore non differiscono significativamente in termini di variabilità ($p = 0.182$) (Fig. 36). Per il 2024, si applicano le stesse considerazioni: il vigore e la pianta continuano a essere gli unici fattori significativi ($p = 0.000$), mentre i fattori relativi alla variabilità intra-pianta e le loro interazioni non risultano rilevanti. L'analisi della componente di varianza ha restituito valori ancora più elevati rispetto alle stagioni precedenti, rafforzando le evidenze raccolte. In particolare, il fattore pianta è risultato altamente significativo ($p = 0.000$) e spiega il 64.04% della varianza totale (varianza = 1.22). I fattori intra-pianta hanno mostrato valori esigui e non significativi (2.07% per il grappolo sul germoglio, 0.96% per il centro produttivo e 2.64% per il nodo), mentre la quota di errore residuo si attesta al 30.28%.

Il test per l'uguaglianza delle varianze (SST vs VIGORE), basato sugli intervalli di confidenza per la deviazione standard nei tre livelli di vigore (AV, BV, MV), ha evidenziato che la varianza di SST non è omogenea tra i livelli di vigore ($p = 0.000$, Fig. 37). Questo risultato è ulteriormente supportato dall'analisi delle deviazioni standard, da cui emerge chiaramente che il basso vigore presenta la maggiore variabilità.

Tabella 11. Contenuto di **solidi solubili totali** (SST, °Brix) in funzione del centro produttivo (C.P.), del nodo e della posizione del grappolo sul germoglio (G.S.G.) per le annate 2022, 2023 e 2024.

	2022		2023		2024	
C.P.						
1	21.73 ± 0.15	n.s.	20.34 ± 0.11	n.s.	21.65 ± 0.17	n.s.
2	21.44 ± 0.15		20.17 ± 0.10		21.33 ± 0.18	
3	21.52 ± 0.16		20.07 ± 0.12		21.68 ± 0.14	
Nodo						
1	21.56 ± 0.12	n.s.	20.13 ± 0.15	n.s.	21.50 ± 0.14	n.s.
2	21.57 ± 0.13		20.26 ± 0.17		21.60 ± 0.17	
G.S.G.						
A	21.74 ± 0.10	n.s.	20.15 ± 0.11	n.s.	20.88 ± 0.14	n.s.
B	21.50 ± 0.21		20.10 ± 0.15		20.81 ± 0.11	

I valori sono espressi come media ± errore standard. L'assenza di differenze significative tra i livelli di ciascun fattore è indicata da "n.s." (non significativo).

Tabella 12. Componenti di varianza e test di significatività per il modello a effetti misti applicato ai dati di SST (°Brix) nei tre anni di studio (2022-2024).

	2022		2023		2024	
Fattore	Varianza	p-value	Varianza	p-value	Varianza	p-value
G.S.G.	0.00 (0.0%)	*	0.00 (0.0%)	*	0.04 (2.1%)	0.294
Pianta (vigore)	0.78 (52.1%)	0.000	0.71 (44.2%)	0.001	1.22 (64.0%)	0.000
C.P. (vigore, pianta)	0.09 (5.9%)	0.092	0.11 (7.1%)	0.130	0.02 (1.0%)	0.443
Nodo (C.P., pianta, vigore)	0.00 (0.0%)	*	0.14 (8.9%)	0.101	0.05 (2.6%)	0.393
Errore residuo	0.63 (42.0%)	0.000	0.64 (39.8%)	0.000	0.58 (30.3%)	0.000
Varianza totale	1.50		1.61		1.90	

La tabella riporta la varianza stimata per ciascun fattore del modello, con la percentuale relativa tra parentesi rispetto alla varianza totale.

Tabella 13. Risultati del modello ad effetti misti per i fattori fissi relativi ai SST e per gli anni 2022, 2023 e 2024.

	R ² adj (%)	F-value	p-value
2022	76.49	18.98	0.000
2023	76.38	3.82	0.032
2024	81.59	8.02	0.002

I valori di R² aggiustato (%), F-value e p-value sono riportati per ciascun anno. L'R² aggiustato fornisce una stima della proporzione di variabilità nei dati spiegata dai fattori fissi, con valori superiori al 75% in tutti gli anni, indicando una buona capacità di adattamento del modello. Il p-value evidenzia la significatività statistica del modello per ogni anno, con valori inferiori a 0.05 che indicano una significativa spiegazione della variabilità nei dati. In particolare, l'anno 2024 mostra il miglior adattamento del modello, con un R² aggiustato del 81.59%

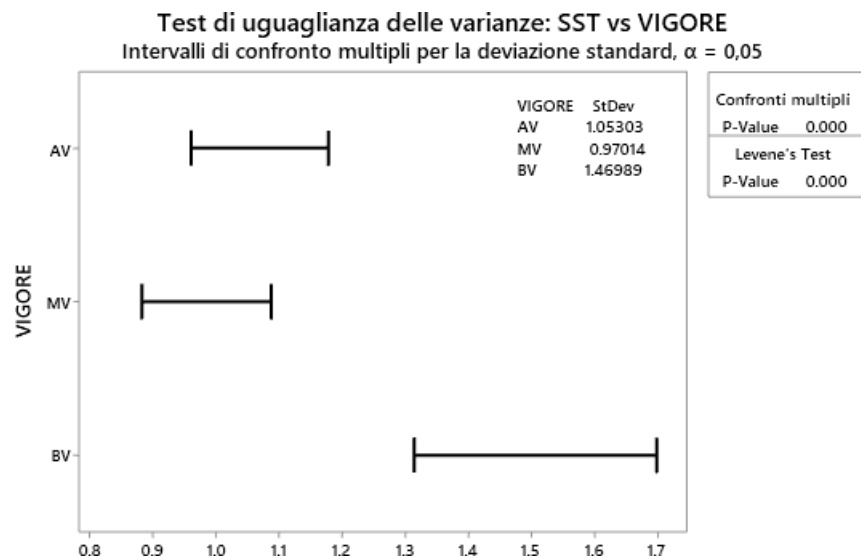


Figura 35. Confronti multipli degli intervalli per la deviazione standard nel test di uguaglianza delle varianze tra BRIX e VIGORE nel 2022 ($\alpha = 0.05$). Le barre di errore rappresentano gli intervalli di confidenza per le deviazioni standard delle categorie AV, MV e BV. Se gli intervalli non si sovrappongono, le deviazioni standard corrispondenti sono significativamente diverse. I valori p indicano i risultati del test di confronti multipli ($p = 0.000$) e del test di Levene ($p = 0.000$), suggerendo una differenza significativa tra le varianze.

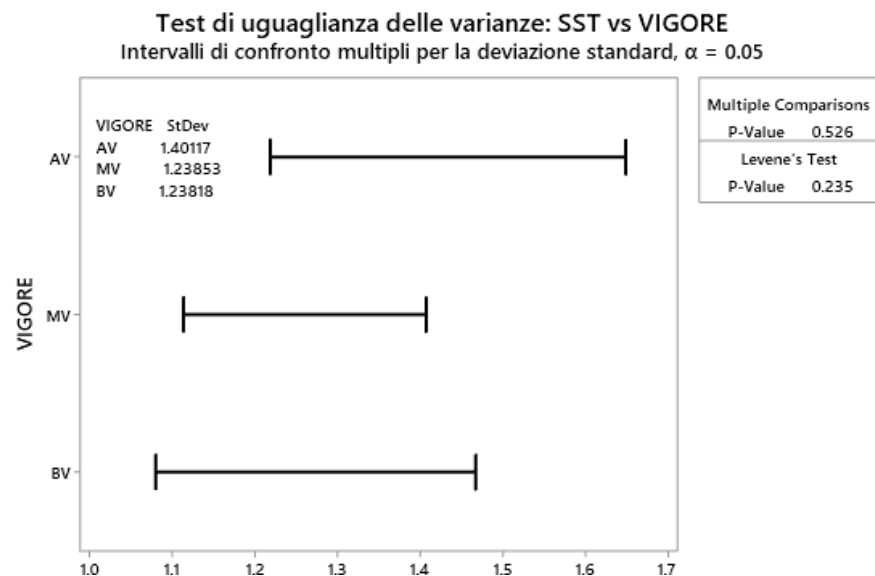


Figura 36. Confronti multipli degli intervalli per la deviazione standard nel test di uguaglianza delle varianze tra BRIX e VIGORE nel 2023 ($\alpha = 0.05$). Le barre di errore rappresentano gli intervalli di confidenza per le deviazioni standard delle categorie AV, MV e BV. Se gli intervalli non si sovrappongono, le deviazioni standard corrispondenti sono significativamente diverse. I valori p indicano i risultati del test di confronti multipli ($p = 0.526$) e del test di Levene ($p = 0.235$), suggerendo una differenza significativa tra le varianze.

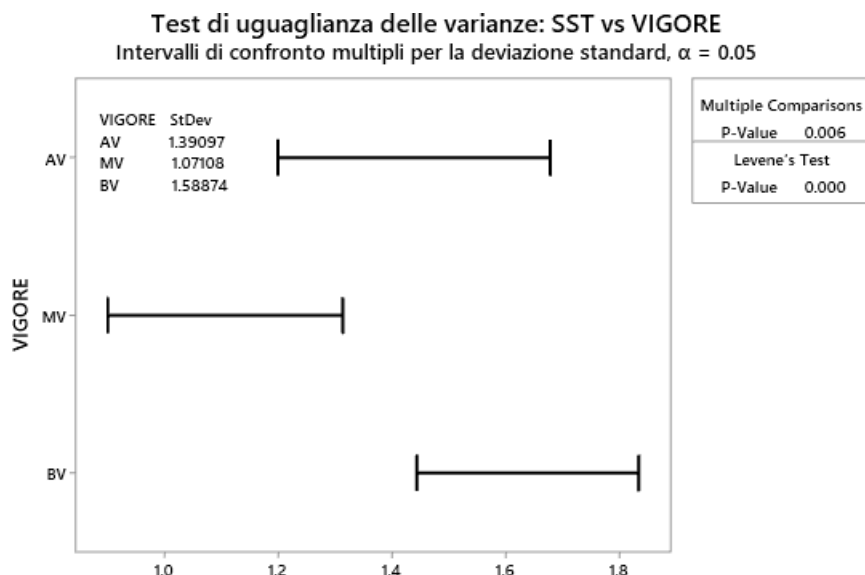


Figura 37. Confronti multipli degli intervalli per la deviazione standard nel test di uguaglianza delle varianze tra SST e VIGORE nel 2024 ($\alpha = 0.05$). Le barre di errore rappresentano gli intervalli di confidenza per le deviazioni standard delle categorie AV, MV e BV. Se gli intervalli non si sovrappongono, le deviazioni standard corrispondenti sono significativamente diverse. I valori p indicano i risultati del test di confronti multipli ($p = 0.006$) e del test di Levene ($p = 0.000$), suggerendo una differenza significativa tra le varianze.

3.3.5 pH e Acidità Titolabile (g/L)

L'analisi dei livelli di pH e AT nel 2022 evidenzia un effetto significativo del fattore vigore e della pianta, mentre i fattori associati alla variabilità intra-pianta non mostrano effetti rilevanti. Inoltre, nessuna interazione tra i fattori considerati risulta significativa. Questi risultati sono coerenti con quanto osservato per i SST, suggerendo che anche per pH e AT non si rileva una differenziazione tra i livelli dei fattori intra-pianta studiati.

Nel dettaglio, i dati riportati nelle Tabelle 14 e 15 mostrano che i valori medi di pH e AT tra i diversi C.P., nodi e G.S.G. sono sostanzialmente simili e non presentano differenze statisticamente significative.

L'analisi delle componenti di varianza attraverso il modello a effetti misti (Tabelle 16 e 17) conferma questi risultati. Nel 2022, nessuno dei fattori intra-pianta presenta livelli di varianza significativi, con percentuali di varianza spiegata prossime allo 0% e massimi del 5%, come nel caso del C.P. per il pH e del nodo per AT. Al contrario, il fattore pianta mostra livelli di varianza spiegata elevati, superiori al 40% per entrambi i parametri, suggerendo che la variabilità tra piante rappresenta una fonte significativa di differenze nei valori di pH e AT. Un aspetto rilevante riguarda l'errore residuo, che si attesta intorno al

50% per entrambi i parametri, indicando l'esistenza di una quota importante di variabilità non spiegata dai fattori considerati. Questo suggerisce che altri elementi, non inclusi nel modello, possano contribuire alla variabilità osservata.

L'efficacia dei fattori fissi nel descrivere la variabilità dei dati è espressa dall' R^2 aggiustato riportato nelle Tabelle 17 e 19. Nel 2022, il modello spiega il 62,84% della variabilità per il pH e il 58,76% per l'AT, con p-value di 0.007 e 0.064 rispettivamente. Ciò conferma un effetto significativo dei fattori fissi sul pH, mentre per l'AT il risultato si avvicina alla soglia di significatività.

In sintesi, i risultati evidenziano che la variabilità tra le piante è il principale fattore responsabile delle differenze nei livelli di pH e AT nel 2022, mentre i fattori intra-pianta (C.P., nodo e G.S.G.) non esercitano un'influenza significativa. Pertanto, è presumibile che la variabilità per i parametri di qualità considerati, sia principalmente determinata dal livello di vigore e dalla specificità della pianta piuttosto che da fattori intra-pianta.

Nel 2023, per il pH, la variabilità attribuibile ai fattori intra-pianta non ha raggiunto la soglia di significatività coerentemente con quanto osservato nel 2022. Il fattore vigore non ha mostrato un'influenza significativa; tuttavia, la variabilità tra le piante si è confermata come componente dominante ($p < 0.001$), suggerendo che le differenze individuali tra piante siano un elemento chiave nell'analisi dei parametri studiati. L'analisi del modello a effetti misti ha evidenziato che la varianza attribuibile alla pianta resta preponderante, mentre i fattori intra-pianta hanno un impatto limitato, coerentemente con la mancanza di differenze significative tra le medie. Nonostante ciò, resta presente una quota non indifferente di variabilità non spiegata (52.6%).

Per l'acidità titolabile nel 2023, la situazione è analoga: i fattori associati alla variabilità intra-pianta non risultano significativi, mentre il vigore mostra un impatto rilevante ($p < 0.001$). La variabilità tra le piante si conferma come il principale contributo alla spiegazione della variabilità complessiva. Tali considerazioni sono allineate con risultati relativi al modello a effetti misti, il quale indica che la pianta rappresenta la principale fonte di varianza (22.9%), mentre i fattori intra-pianta mantengono un apporto limitato. La tabella degli effetti fissi conferma che il vigore ha un effetto significativo.

Nel 2024, i risultati dell'ANOVA ad una via indicano che per il pH nessuno dei fattori considerati è risultato significativo, mentre per AT si evidenziano differenze solo per il fattore vigore e pianta, anche in questo caso, invece, C.P., nodo e G.S.G. sono dei fattori

per i quali non si riscontrano differenze. Dalla valutazione del modello a effetti misti emergono alcuni elementi che, a una prima valutazione, potrebbero apparire incongruenti, ma che trovano una spiegazione coerente attraverso un'analisi più approfondita. In particolare, per AT, il fattore G.S.G. presenta una variabilità spiegata pari a circa il 30%, pur non risultando significativo nell'ANOVA. Questo apparente contrasto trova una spiegazione nella struttura della variabilità intra-gruppo. L'analisi descrittiva mostra una elevata dispersione interna ai livelli del fattore: la deviazione standard per il grappolo A è pari a 1.173, mentre per il grappolo B è 1.269, indicando che le osservazioni all'interno di ciascun gruppo sono ampiamente disperse rispetto alla loro media. La varianza intra-gruppo, calcolata come media ponderata delle varianze dei due livelli ($\sigma^2 = \text{StDev}^2$), risulta pari a 1.486. Confrontando questa variabilità con la differenza tra le medie dei due livelli, che è di soli 0.26, si osserva che la dispersione interna ai gruppi è molto più elevata rispetto alla differenza tra le loro medie. Questo fenomeno incide direttamente sulla potenza statistica del test ANOVA: quando la varianza interna è elevata, anche un effetto reale potrebbe non essere rilevato come significativo. Nel nostro caso, il test ANOVA ha restituito un valore F pari a 1.25 con un p-value di 0.265, indicando l'assenza di significatività statistica.

Questa osservazione sottolinea l'importanza di considerare non solo i risultati dei test di significatività, ma anche la struttura della variabilità all'interno dei livelli dei fattori analizzati. L'analisi del modello a effetti misti per il 2024 conferma che la variabilità tra le piante rimane predominante, mentre i fattori intra-pianta, sebbene non sempre significativi, mostrano un contributo non trascurabile nella spiegazione dei dati. La tabella degli effetti fissi ribadisce l'influenza del vigore, mentre il ruolo dei fattori intra-pianta appare più complesso e dipendente dalla variabilità interna ai livelli analizzati. In generale, il 2024 conferma la tendenza già osservata negli anni precedenti, evidenziando come la variabilità intra-pianta, pur non risultando sempre significativa nei test statistici, possa comunque avere un ruolo rilevante nella spiegazione delle dinamiche osservate. Questo aspetto è cruciale nella definizione di strategie di campionamento future, poiché suggerisce che una maggiore attenzione alla variabilità intra-pianta potrebbe contribuire a migliorare la capacità di rilevare differenze significative nei parametri studiati.

Tabella 14. Livelli di **pH** in funzione del centro produttivo (C.P.), del nodo e della posizione del grappolo sul germoglio (G.S.G.) per le annate 2022, 2023 e 2024.

	2022		2023		2024	
C.P.						
1	3.46 ± 0.02	n.s.	3.55 ± 0.01	n.s.	3.16 ± 0.03	n.s.
2	3.46 ± 0.02		3.53 ± 0.02		3.15 ± 0.01	
3	3.47 ± 0.02		3.53 ± 0.02		3.15 ± 0.02	
Nodo						
1	3.48 ± 0.01	n.s.	3.55 ± 0.01	n.s.	3.16 ± 0.04	n.s.
2	3.45 ± 0.01		3.52 ± 0.01		3.13 ± 0.01	
G.S.G.						
A	3.43 ± 0.01	n.s.	3.53 ± 0.01	n.s.	3.13 ± 0.02	n.s.
B	3.42 ± 0.03		3.49 ± 0.02		3.06 ± 0.02	

I valori sono espressi come media ± errore standard. L'assenza di differenze significative tra i livelli di ciascun fattore è indicata da "n.s." (non significativo).

Tabella 15. Livelli di **Acidità Totale** (AT, g/L) in funzione del centro produttivo (C.P.), del nodo e della posizione del grappolo sul germoglio (G.S.G.) per le annate 2022, 2023 e 2024.

	2022		2023		2024	
C.P.						
1	6.70 ± 0.11	n.s.	5.02 ± 0.07	n.s.	5.55 ± 0.10	n.s.
2	6.60 ± 0.12		5.02 ± 0.07		5.74 ± 0.10	
3	6.89 ± 0.11		5.20 ± 0.11		5.69 ± 0.10	
Nodo						
1	6.68 ± 0.09	n.s.	5.20 ± 0.07	n.s.	5.71 ± 0.11	n.s.
2	6.78 ± 0.09		4.98 ± 0.06		5.61 ± 0.07	
G.S.G.						
A	6.83 ± 0.07	n.s.	5.13 ± 0.05	n.s.	5.86 ± 0.05	n.s.
B	7.09 ± 0.17		5.16 ± 0.12		5.80 ± 0.24	

I valori sono espressi come media ± errore standard. L'assenza di differenze significative tra i livelli di ciascun fattore è indicata da "n.s." (non significativo).

Tabella 16. Componenti di varianza e test di significatività per il modello a effetti misti applicato ai dati di **pH** nei tre anni di studio (2022-2024).

	2022		2023		2024	
Fattore	Varianza	p-value	Varianza	p-value	Varianza	p-value
G.S.G.	0.00 (0.0%)	*	0.00 (0.0%)	*	0.00 (0.0%)	*
Pianta (vigore)	0.011 (44.8%)	0.000	0.0078 (32.8%)	0.006	0.006 (11.5%)	0.066
C.P. (vigore, pianta)	0.000 (0.0%)	*	0.0035 (14.6%)	0.031	0.00 (0.0%)	*
Nodo (C.P., pianta, vigore)	0.0012 (5.1%)	0.151	0.00 (0.0%)	*	0.00 (0.0%)	*
Errore residuo	0.012 (50.0%)	0.000	0.013 (52.6%)	0.000	0.049 (88.5%)	0.000
Varianza totale	0.0233		0.0237		1.90	

La tabella riporta la varianza stimata per ciascun fattore del modello, con la percentuale relativa tra parentesi rispetto alla varianza totale.

Tabella 17. Risultati del modello ad effetti misti per i fattori fissi relativi al **pH** e per gli anni 2022, 2023 e 2024.

	R ² adj (%)	F-value	p-value
2022	62.84	5.85	0.007
2023	55.41	0.73	0.491
2024	15.75	0.25	0.778

I valori di R² aggiustato (%), F-value e p-value sono riportati per ciascun anno. L'R² aggiustato fornisce una stima della proporzione di variabilità nei dati spiegata dai fattori fissi.

Tabella 18. Componenti di varianza e test di significatività per il modello a effetti misti applicato ai dati di **Acidità Totale (AT)** nei tre anni di studio (2022-2024).

	2022		2023		2024	
Fattore	Varianza	p-value	Varianza	p-value	Varianza	p-value
G.S.G.	0.0017 (0.15%)	0.493	0.00 (0.0%)	*	0.19 (33.2%)	0.007
Pianta (vigore)	0.50 (42.7%)	0.001	0.12 (22.2%)	0.009	0.18 (31.2%)	0.006
C.P. (vigore, pianta)	0.064 (5.5%)	0.105	0.00 (0.0%)	*	0.024 (4.3%)	0.266
Nodo (C.P., pianta, vigore)	0.00 (0.0%)	*	0.038 (6.9%)	0.165	0.00 (0.0%)	*
Errore residuo	0.60 (52.0%)	0.000	0.39 (70.8%)	0.000	0.18 (31.3%)	0.000
Varianza totale	1.157		0.551		0.571	

La tabella riporta la varianza stimata per ciascun fattore del modello, con la percentuale relativa tra parentesi rispetto alla varianza totale.

Tabella 19. Risultati del modello ad effetti misti per i fattori fissi relativi all'**Acidità Totale (AT)** per gli anni 2022, 2023 e 2024.

	R ² adj (%)	F-value	p-value
2022	58.76	3.00	0.064
2023	40.62	3.29	0.052
2024	86.94	7.32	0.003

I valori di R² aggiustato (%), F-value e p-value sono riportati per ciascun anno. L'R² aggiustato fornisce una stima della proporzione di variabilità nei dati spiegata dai fattori fissi.

3.4 Discussione

La valutazione delle differenze qualitative tra i diversi livelli di variabilità della pianta ha evidenziato una marcata omogeneità di maturazione, probabilmente dovuta al contesto sperimentale. Le viti campione, allevate a controspalliera e patate a cordone speronato, un sistema che prevede una potatura corta e il mantenimento di almeno tre centri produttivi, contribuiscono a una crescita equilibrata dei germogli e riducono la disomogeneità nello sviluppo vegetativo (Tassie et al., 1992). Confrontando la potatura a cordone speronato con quella a Guyot, o Guyot doppio, emerge che quest'ultima tecnica tende a indurre una maggiore variabilità interna alla pianta, attribuibile al fenomeno dell'acrotonia che concentra il flusso di linfa nei nodi distali, generando un germogliamento disomogeneo (May et al., 1982).

Sebbene il sistema a cordone speronato garantisca una maggiore omogeneità qualitativa, la ripetuta potatura su una struttura permanente può causare danni nei vasi dello xilema, favorendo la formazione di tille. Questi danni, pur rappresentando un aspetto secondario nella valutazione della variabilità, potrebbero contribuire a una riduzione della capacità di trasporto di acqua e nutrienti, compromettendo la conduzione del flusso di linfa (Morton, 2000; Sun et al., 2006; Salleo et al., 2002).

Sebbene l'impatto diretto di tali fenomeni sulla crescita vegetativa e la maturazione dei grappoli possa non essere immediatamente evidente, la formazione di tille potrebbe ulteriormente influenzare la variabilità tra i centri produttivi, portando a differenze nelle prestazioni dei germogli e nelle infiorescenze. In sintesi, i risultati suggeriscono che il sistema a cordone speronato, grazie alla potatura corta, assicura un'omogeneità produttiva intrinseca, contrastando l'effetto dell'acrotonia tipico delle viti patate a Guyot.

Un'ulteriore fonte di variabilità considerata all'interno della pianta è la posizione del grappolo sul germoglio. I risultati del presente studio indicano che, ad eccezione del peso del grappolo, la posizione sul germoglio non influisce significativamente sui parametri qualitativi, espressi in termini di SST, pH e AT. Tuttavia, è emerso che la posizione del grappolo sul germoglio ha avuto un effetto significativo sul numero di fiori e acini per grappolo, con una riduzione progressiva di entrambi spostandosi dal grappolo basale a quello più apicale.

Questi risultati sono in accordo con quelli di Eltom et al. (2017), che in uno studio condotto su un vigneto di Sauvignon Blanc a Marlborough, Nuova Zelanda, utilizzando un sistema di potatura a "four-cane pruning system" (quattro capi a frutto da dieci gemme ciascuno), hanno osservato un gradiente acropeto nella struttura del grappolo. In particolare, hanno riscontrato una riduzione progressiva del numero di fiori e acini per grappolo dal secondo al quinto nodo del germoglio, associata a un aumento della percentuale di allegagione. Sebbene il sistema di potatura fosse diverso, i risultati mostrano una certa analogia con quanto riscontrato nel presente studio.

Inoltre, Eltom et al. (2017), hanno osservato che la fioritura nei grappoli situati ai nodi 2 e 3 avviene in modo simile, raggiungendo la fioritura completa in tempi quasi identici, mentre le differenze diventano più evidenti nei grappoli ai nodi successivi. Nel loro studio, questo fenomeno si riflette anche nell'accumulo di SST, che aumenta progressivamente dalla base all'apice del germoglio, con differenze statisticamente significative tra i grappoli ai nodi 2 e 5. Tuttavia, le differenze tra i grappoli ai nodi 2 e 3 risultano minime, come mostrato nella rappresentazione grafica dei dati.

Nel presente studio, non sono emerse differenze significative in termini di SST tra i grappoli dello stesso germoglio. Questa discrepanza rispetto ai risultati di Eltom et al. potrebbe essere attribuita a differenze agronomiche e varietali. Mentre il loro studio ha analizzato una varietà alloctona (Sauvignon Blanc) coltivata in un vigneto caratterizzato da un numero elevato di grappoli per germoglio, il nostro studio si è concentrato su una varietà autoctona siciliana coltivata in un vigneto con una fertilità potenziale più contenuta e presumibilmente un vigore inferiore. Inoltre, le differenze possono derivare dal diverso sistema di potatura utilizzato: nel vigneto dello studio di Eltom et al. è stata adottata una potatura lunga, mentre nel nostro studio è stata impiegata una potatura corta e povera. Questo aspetto strutturale potrebbe spiegare in parte le divergenze osservate.

I risultati suggeriscono che, in un vigneto a vigore contenuto con un numero ridotto di grappoli per germoglio e per pianta, la variabilità tra i grappoli si riduce, rendendo meno rilevante l'influenza della posizione sul germoglio nelle differenze di maturazione. Ciò sottolinea l'importanza di contestualizzare i risultati in base alle specifiche condizioni agronomiche e ambientali del vigneto in esame. Similmente, Lefort e Schaeffer (1979) riportano l'esistenza di una differenza nel livello di maturazione tra il primo e il secondo grappolo sul germoglio. Il loro studio, condotto su sei cultivar differenti, ha mostrato che i grappoli situati nei nodi più bassi tendevano ad avere livelli di zuccheri leggermente

superiori a quelli apicali. Tuttavia, va notato che il suddetto studio è stato realizzato in un contesto agronomico diverso e con un sistema di potatura differente rispetto a quello adottato nel presente lavoro. Pertanto, le divergenze nei risultati potrebbero derivare dalle differenti condizioni di gestione agronomica e di vigore, suggerendo che le osservazioni di Lefort et al. (1979), potrebbero non essere completamente trasferibili a vigneti con caratteristiche differenti.

Sebbene la posizione del grappolo sul germoglio non abbia mostrato effetti significativi sulla qualità, essa ha avuto un impatto sul peso del grappolo, con differenze evidenti tra il grappolo A e il grappolo B, a favore del primo.

I risultati suggeriscono che queste differenze sono principalmente imputabili al numero di fiori iniziali, maggiore per il grappolo A, e al numero di acini, anch'esso superiore nel grappolo A, nonostante la minore percentuale di allegagione. Questo aspetto è ampiamente documentato in letteratura, che evidenzia una correlazione negativa tra il numero di fiori e la percentuale di allegagione (Bessis, 1965; Huglin e Schneider, 1998; Keller et al., 2001; Lopez-Miranda e Yuste, 2004).

Tale conoscenza, poco utile nell'ambito del campionamento delle uve per il monitoraggio della qualità, può rappresentare una informazione determinante per l'accuratezza dei campionamenti relativi alle attività di stima della produzione. I metodi manuali, ancora ampiamente utilizzati, si basano sul conteggio dei grappoli e sul peso medio storico o sulla pesatura di campioni prima dell'invasatura (Victorino et al., 2022). Tuttavia, questi metodi presentano errori significativi (10-40%) e non considerano la variabilità lungo il germoglio.

Le tecniche automatiche, basate su visione artificiale e sensori, offrono una stima più efficiente e su larga scala, ma soffrono di limiti pratici, tra cui l'occultamento dei grappoli, la dipendenza dall'illuminazione e costi elevati (Barriguiha et al., 2021).

3.5 Conclusioni

Lo studio condotto ha permesso di approfondire la variabilità intra-pianta nella maturazione delle uve nelle viti potate a cordone speronato, evidenziando l'influenza di diversi fattori agronomici e fisiologici. I risultati ottenuti mostrano che la posizione del grappolo lungo il germoglio incide significativamente sul peso del grappolo, con valori mediamente superiori nei grappoli basali rispetto a quelli apicali. Tuttavia, tale differenza non si riflette nei principali parametri qualitativi dell'uva, quali il contenuto di solidi solubili totali, il pH e l'acidità titolabile, che non risultano influenzati in modo statisticamente significativo dalla loro collocazione lungo il germoglio.

L'analisi degli altri livelli intra-pianta ha rivelato che il centro produttivo lungo il cordone e il nodo dello sperone non determinano variazioni significative nei parametri qualitativi esaminati. I dati statistici indicano che la principale fonte di variabilità è attribuibile alle differenze tra le piante piuttosto che alle variazioni intra-pianta. Questo risultato è particolarmente rilevante, poiché suggerisce che, anche all'interno di uno stesso vigore, la variabilità inter-pianta rappresenta il fattore predominante nella definizione delle caratteristiche qualitative e quantitative dell'uva.

Un altro aspetto di rilievo emerso dall'analisi, oltre alla conferma del ruolo determinante del vigore, riguarda l'assenza di interazione tra quest'ultimo e i diversi fattori di variabilità intra-pianta considerati. Ciò indica che la distribuzione della variabilità all'interno della pianta segue dinamiche indipendenti dal livello di vigore, mantenendosi costante tra le diverse classi analizzate.

Dal punto di vista pratico, i risultati ottenuti forniscono indicazioni utili per la gestione del vigneto e l'ottimizzazione delle strategie di campionamento. La ridotta variabilità intra-pianta osservata nelle viti potate a cordone speronato suggerisce che la selezione dei grappoli destinati al monitoraggio qualitativo possa seguire criteri meno restrittivi rispetto ad altri sistemi di potatura che generano maggiori differenziazioni interne. Tuttavia, il vigore della pianta e il numero di piante campionate, elementi determinanti per spiegare la variabilità inter-pianta, devono essere considerati attentamente nei protocolli di campionamento, poiché influenzano significativamente le caratteristiche chimico-fisiche delle uve e potrebbero rappresentare una variabile critica nella determinazione della qualità finale del prodotto.

Un ulteriore aspetto di interesse riguarda le implicazioni per le metodologie di previsione della resa. La maggiore uniformità riscontrata nelle viti potate a cordone speronato potrebbe contribuire a ridurre le incertezze nella stima della produzione, migliorando la precisione dei modelli predittivi. Tuttavia, la consapevolezza che la posizione del grappolo sul germoglio influisce significativamente sul suo peso, rende fondamentale considerare questo parametro nelle pratiche di campionamento manuale, ancora ampiamente adottate in ambito vitivinicolo. Ignorare tale aspetto potrebbe portare a stime errate della resa e della distribuzione del peso dei grappoli all'interno della pianta. È fondamentale sottolineare che tali risultati sono strettamente legati alle specifiche condizioni agronomiche e ambientali in cui lo studio è stato condotto. Studi futuri potrebbero mirare a verificare la riproducibilità di questi risultati su viti potate a cordone speronato appartenenti a varietà differenti, caratterizzate da un vigore complessivo diverso e da livelli di fertilità potenziale superiori, al fine di comprendere meglio l'interazione tra vigore, produttività e qualità dell'uva in differenti contesti colturali. Inoltre, nonostante le evidenze riportate in letteratura da studi condotti su vitigni internazionali provenienti da regioni viticole del Vecchio Mondo (Francia, Italia) e del Nuovo Mondo (Australia, Nuova Zelanda), risulta ancora interessante esplorare ulteriormente la variabilità intra-pianta in vigneti potati a Guyot. In particolare, potrebbe essere utile indagare come cultivar caratterizzate da vigori complessivi elevati e una elevata fertilità potenziale rispondano in modo diverso rispetto a vigneti della stessa cultivar con vigore inferiore. Un'analisi futura potrebbe focalizzarsi sulle possibili variazioni nella risposta lungo il germoglio, e sulla distribuzione di queste lungo il capo a frutto, per comprendere se e come questi fattori influenzino la produttività e la qualità complessiva.

3.6 Riferimenti Bibliografici

Barriguiha, A., D e Castro Neto, M., and Gil, A. (2021). Vineyard Yield Estimation, Prediction, and Forecasting: A Systematic Literature Review. *Agronomy* 11, 1789. doi: 10.3390/agronomy11091789

Bessis, R.; 1965: Recherches sur la Fertilité et les Corrélations deCroissance entre Bourgeons chez la Vigne. Thèse Doctorat Sci.Natl. Univ. Dijon, France.

Eltom, M., Trought, M. C. T., Agnew, R., Parker, A., and Winefield, C. S. (2017). Pre-budburst temperature influences the inner and outer arm morphology, phenology, flower number, fruitset, TSS accumulation and variability of *Vitis vinifera* L. Sauvignon Blanc bunches: Temperature and inflorescence development. *Aust. J. Grape Wine Res.* 23, 280–286. doi: 10.1111/ajgw.12260

Eltom, M., Trought, M. C. T., and Winefield, C. S. (2014). The effect of pre-budbreak cane girdling on the physical and phenological development of the inner and outer arm in *Vitis vinifera* L. “Sauvignon blanc” inflorescence structures.

Huglin, P. and Schneider, Ch. (1998) Biologie et e´cologie de la vigne. Paris: Lavoisier Tec et Doc.

Keller, M., Kummer, M. and Vasconcelos, M.C. (2001). Reproductive growth of grapevines in response to nitrogen supply and rootstock. *Aust. J. Grape Wine Res.* 7, 12–18.

Lefort, P. L., and Schaeffer, A. (1979). Etude des variations de maturité des grappes de vigne selon leur position sur la souche Recherche d’une méthode d’échantillonnage.

López-Miranda, S., Yuste, J., & Lissarrague, J. R. (2004). Effects of bearing unit, spur or cane, on yield components and bud productivity. *VITIS-GEILWEILERHOF* 43(1), 47-48.

May, P., Clingeleffer, P. R., & Brien, C. J. (1982). Pruning of Sultana vines to long spurs. *Am. J. Enol. Vitic.* 33(4), 214-221.

May, P.(1987). *The grapevine as a perennial, plastic and productive plant*. Proceedings Sixth Australian Wine Industry Conference, Adelaide, Australia (Viticulural Publishing: Adelaide) pp. 40–49.

Morton, L. (2000). Viticulture and grapevine declines: lessons of black goo. *Phytopathol. Mediterr.* 39.

Srinivasan, C., and Mullins, M. G. (1981). Physiology of Flowering in the Grapevine — a Review. *Am. J. Enol. Vitic.* 32, 47–63. doi: 10.5344/ajev.1981.32.1.47

Sun, Q., Rost, T. L., and Matthews, M. A. (2006). Pruning-induced tylose development in stems of current-year shoots of *Vitis vinifera* (Vitaceae). *Am. J. Bot.* 93, 1567–1576. doi: 10.3732/ajb.93.11.1567

Swanepoel, J. J., & Archer, E. (1988). The ontogeny and development of *Vitis vinifera*.

Tarter, M. E., and Keuter, S. E. (2008). Shoot-Based Sampling of *Vitis vinifera* Clusters. *Am. J. Enol. Vitic.* 59, 55–60. doi: 10.5344/ajev.2008.59.1.55

Tassie, E. and Freeman, B.M. (1992). Pruning. B.G. Coombe and P.R. Dry, eds. *Viticulture. Vol. 2—Practices* (Winetitles: Adelaide, SA, Australia) pp. 66–84.

Trought, M.C.T. (1997). The New Zealand terroir: sources of variation in fruit composition in New Zealand vineyards. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Cool Climate Viticulture and Enology, Rochester, New York, USA, 16–20 July 1996*. Eds. T. Henick-Kling, T.E. Wolf and E.M. Harkness. pp. 23–27.

Victorino, G., Braga, R. P., Santos-Victor, J., and Lopes, C. M. (2022). Comparing a New Non-Invasive Vineyard Yield Estimation Approach Based on Image Analysis with Manual Sample-Based Methods. *Agronomy* 12, 1464. doi: 10.3390/agronomy12061464

4 Variabilità Intra-Grappolo

4.1 Introduzione

La composizione chimica dell'uva rappresenta il risultato di un complesso intreccio di fattori genetici, ambientali e agronomici, i quali influenzano in modo determinante la qualità del prodotto finale. Negli ultimi decenni, numerosi studi hanno approfondito la variabilità intra-grappolo, evidenziando come all'interno dello stesso grappolo possano manifestarsi differenze significative nella morfologia e nella composizione degli acini. Tale variabilità, spesso sottovalutata, può incidere sensibilmente sulla qualità dell'uva e, di conseguenza, sulle caratteristiche del vino.

Uno dei principali fattori che contribuiscono a questa eterogeneità è la struttura stessa del grappolo. Il numero di fiori e la percentuale di allegagione variano lungo il rachide, determinando una distribuzione irregolare degli acini, con tendenze dimensionali che generalmente decrescono dalla base verso la punta del grappolo (May, 1987; Pratt, 1971; Pisciotta et al., 2013). Questa disposizione non è casuale, ma risulta strettamente legata all'architettura dell'infiorescenza e ai processi ontogenetici che regolano la crescita degli acini (Coombe, 1995). Inoltre, le differenze nelle condizioni microambientali all'interno del grappolo, come l'esposizione alla luce solare e la ventilazione, influiscono ulteriormente sulla composizione chimica degli acini (Dokoozlian and Kliewer, 1996; Reshef et al., 2019). Studi su diverse varietà hanno evidenziato che gli acini più esposti alla radiazione solare accumulano livelli più elevati di zuccheri e antociani rispetto a quelli situati nelle porzioni interne del grappolo (Mabrouk and Sinoquet, 1998; Price et al., 1995; Tang et al., 2019). Nel caso di uno studio condotto con la cv. Chardonnay, ad esempio, gli acini esterni tendono a presentare concentrazioni zuccherine significativamente superiori rispetto a quelli meno esposti, specialmente nelle prime fasi della maturazione (Tang et al., 2019).

Diversi studi hanno dimostrato che gli acini situati nella porzione prossimale del grappolo tendono ad accumulare quantità superiori di zuccheri rispetto a quelli localizzati nelle zone distali, verosimilmente a causa di una maggiore efficienza nell'approvvigionamento di assimilati da parte della pianta (Ollat e Gaudillère, 1998). Analogamente, la posizione degli acini influisce anche sulla sintesi dei composti fenolici e aromatici. In alcune cultivar, come Cabernet Sauvignon e Vidal, la distribuzione dei metaboliti secondari varia in

funzione della posizione dell'acino nel grappolo e delle condizioni ambientali (Pagay e Cheng, 2010; Tarter e Keuter, 2005; Wolpert e Howell, 1984). Al contrario, in cultivar come Concord, tali differenze risultano meno pronunciate, con una variabilità compositiva più evidente solo nei composti aromatici (Noguerol-Pato et al., 2012).

Le differenze intra-grappolo non si limitano alla composizione zuccherina, ma coinvolgono anche la struttura fisica degli acini. Pisciotta et al. (2013) hanno evidenziato che gli acini situati nella porzione prossimale e centrale del grappolo tendono a essere più grandi e a contenere una maggiore quantità di zuccheri rispetto a quelli della parte distale. Questa variabilità morfologica ha importanti implicazioni sulla qualità dei vini, poiché gli acini di dimensioni minori, con un rapporto buccia/polpa più elevato, presentano una maggiore concentrazione di composti fenolici e aromatici (Roby et al., 2004). In tal senso, la differente dimensione degli acini può incidere non solo sulla qualità del vino, ma anche sulla gestione delle tecniche di vinificazione, influenzando estrazioni e processi fermentativi.

Nonostante i numerosi studi condotti, la caratterizzazione della variabilità intra-grappolo è stata tradizionalmente affrontata mediante approcci distruttivi, che limitano la possibilità di tracciare l'evoluzione della maturazione nel tempo. Recentemente, nuove metodologie basate su tecniche di imaging e deep learning hanno permesso di monitorare la crescita degli acini con elevata risoluzione temporale, rivelando una marcata asincronia nei processi di sviluppo e maturazione all'interno dello stesso grappolo (Daviet et al., 2023).

Questo ha evidenziato che le differenze osservate tra gli acini non sono semplicemente il risultato di gradienti statici, ma riflettono dinamiche fisiologiche più complesse, regolabili anche attraverso interventi agronomici.

Alla luce di queste considerazioni, il presente studio si propone di valutare se, in un vigneto di Catarratto Lucido potato a cordone speronato, la variabilità intra-grappolo tenda a ridursi o a mantenersi costante. Sebbene la letteratura abbia ampiamente documentato l'esistenza di differenze intra-grappolo nelle diverse condizioni colturali, resta ancora da chiarire se tale eterogeneità si manifesti con la stessa intensità in un sistema caratterizzato da una gestione più uniforme della chioma e del carico produttivo.

Tuttavia, non è noto se questa maggiore omogeneità a livello di pianta si rifletta anche su una minore variabilità intra-grappolo, o se invece tale eterogeneità sia determinata da fattori fisiologici intrinseci che non vengono influenzati dalle pratiche agronomiche

adottate. Inoltre, la risposta della variabilità intra-grappolo potrebbe non essere costante nel tempo, ma risentire delle fluttuazioni climatiche tra le diverse annate. L'analisi della sua evoluzione in più stagioni permette di comprendere se le condizioni ambientali possano amplificare o attenuare l'eterogeneità tra gli acini all'interno del grappolo, fornendo indicazioni utili per una gestione più efficace del vigneto.

Comprendere la dinamica di questa variabilità in tale contesto è essenziale per ottimizzare i protocolli nell'ottica di un campionamento per acino, al fine di garantire una maggiore coerenza nella qualità dell'uva destinata alla vinificazione. Lo studio si propone quindi di approfondire la comprensione della distribuzione delle caratteristiche morfologiche e compositive degli acini all'interno del grappolo, esplorando le possibili implicazioni di tale variabilità nel contesto del cordone speronato.

4.2 Materiali e Metodi

4.2.1 Caratterizzazione Climatica

La caratterizzazione macroclimatica è stata condotta utilizzando i dati di una stazione meteorologica automatizzata appartenente al Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS). In particolare, sono state analizzate le precipitazioni mensili registrate nel periodo 2001-2021, al fine di valutare in che misura le piogge registrate nei tre anni di sperimentazione (2022-2023-2024) si discostassero dalla media di lungo periodo. I dati meteorologici specifici per ciascun anno sperimentale sono stati invece ottenuti da una stazione meteorologica di proprietà della cantina ospitante, situata a circa due chilometri dal vigneto. Da quest'ultima fonte sono stati estratti non solo i dati relativi alle precipitazioni, ma anche quelli sulle temperature medie, massime e minime giornaliere.

4.2.2 Strategia di Campionamento e Analisi della Variabilità Produttiva

Lo studio della variabilità intra-grappolo è stato condotto nel corso di tre stagioni (2022-2024). La data di vendemmia è stata stabilita in base agli obiettivi enologici della cantina ospitante, raccogliendo tutti i grappoli delle 12 piante campione per ciascun livello di vigore, ad eccezione di quelli non derivanti dalle gemme degli speroni lasciati durante la potatura invernale. La dimensione del campione è stata modulata in funzione della fertilità potenziale e della resa media per pianta, variabile tra le annate. In ciascuna annata, i grappoli raccolti sono stati trasferiti in laboratorio, dove ne è stata misurata la lunghezza totale, dalla zona prossimale (iniziando dalla prima inserzione degli acini o ala nel rachide vicina al peduncolo) fino all'ultimo acino nella parte distale. La lunghezza è stata successivamente suddivisa in tre porzioni (prossimale, mediana e distale), da cui sono stati prelevati casualmente cinque acini, selezionati sia dalle zone interne sia da quelle esterne più esposte. Per ciascun acino è stato determinato il peso e il contenuto di solidi solubili totali (SST), espresso in °Brix. Quest'ultimo è stato misurato tramite il mosto ottenuto dalla pigiatura dell'acino, utilizzando un rifrattometro digitale (HI96811, Hanna Instruments, Padova, Italia).

4.2.3 Analisi Statistica

Lo studio della variabilità intra-grappolo è stato condotto considerando la posizione dell'acino all'interno del grappolo come unico fattore di analisi. Questo approccio ha

permesso di valutare l'effetto della posizione dell'acino (prossimale, mediana e distale) sui parametri misurati, ovvero peso dell'acino e contenuto di SST.

Per ciascun parametro, la distribuzione dei dati è stata preliminarmente verificata mediante il test di normalità di Anderson-Darling. Nel caso di distribuzioni non normali, sono state testate diverse trasformazioni dei dati (logaritmica, radice quadrata, Box-Cox) al fine di verificare se fosse possibile soddisfare i requisiti per l'applicazione di test parametrici.

In presenza di dati che rispettano l'assunzione di normalità, la metodologia prevista avrebbe contemplato l'analisi della varianza a una via (ANOVA) per valutare l'effetto della posizione dell'acino all'interno del grappolo, seguita dal test di Tukey per il confronto tra le medie ($p < 0.05$). Tuttavia, poiché nessuna delle trasformazioni applicate ha consentito di soddisfare i presupposti di normalità, è stato adottato un approccio interamente non parametrico, applicando il test di Kruskal-Wallis per il confronto tra gruppi. Questo metodo, basato sul concetto di ranking, è particolarmente indicato per confrontare più gruppi quando le distribuzioni dei dati non soddisfano i requisiti di normalità o presentano varianze eterogenee.

Il test di Kruskal-Wallis sostituisce i valori grezzi con ranghi, assegnando a ciascuna osservazione una posizione relativa all'interno dell'intero dataset. La media dei ranghi di ciascun gruppo rappresenta la sua collocazione rispetto agli altri: un gruppo con un ranking medio più elevato tende a presentare valori più alti della variabile analizzata, mentre un ranking medio inferiore indica una tendenza verso valori più bassi. Per quantificare lo scostamento di ciascun gruppo rispetto alla distribuzione complessiva, è stato calcolato un valore Z, che misura la deviazione della media dei ranghi del gruppo rispetto al valore atteso, fornendo un'indicazione della direzione e dell'entità della differenza rispetto agli altri gruppi. Il test ha inoltre restituito un p-value, utilizzato per valutare la significatività statistica delle differenze osservate: valori inferiori alla soglia convenzionale ($p < 0.05$) indicano la presenza di almeno un gruppo significativamente diverso dagli altri.

Nei casi in cui il test di Kruskal-Wallis ha evidenziato differenze significative, è stata eseguita un'analisi post hoc di Dunn, con correzione di Bonferroni, per identificare quali coppie di gruppi differissero significativamente tra loro.

Tutte le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il software Minitab 19 (State College, PA: Minitab, Inc.).

4.3 Risultati

4.3.1 Caratterizzazione Climatica

4.3.1.1 *Monitoraggio delle Temperature (°C)*

L'analisi delle temperature nell'area viticola in esame evidenzia una temperatura media annua relativamente stabile tra il 2022 (17.80 °C), il 2023 (17.53 °C) e il 2024 (17.35 °C). Tuttavia, questa stabilità complessiva non riflette le variazioni stagionali osservate, che hanno influenzato in modo differente il ciclo vegetativo.

Come dimostrato in figura 38, nei primi mesi del 2023, le temperature sono risultate generalmente inferiori rispetto al 2022, con una differenza particolarmente evidente a marzo, quando il valore medio mensile è stato superiore di 1.8 °C rispetto all'anno precedente. Il 2024 ha invece mostrato temperature invernali simili a quelle del 2023, con valori medi di 10.8 °C a gennaio, 11.3 °C a febbraio e 13.2 °C a marzo. Con l'avanzare della primavera, nel 2023 le temperature si sono mantenute inferiori rispetto al 2022, soprattutto nei mesi di maggio e giugno, quando le anomalie termiche hanno evidenziato valori medi inferiori di circa 4 °C. Nel 2024, invece, l'andamento termico è risultato intermedio tra le due annate precedenti, con temperature medie di 15.9 °C in aprile, 19.3 °C in maggio e 24.4 °C in giugno. L'estate ha evidenziato dinamiche differenti tra le tre annate. Nel 2023 si è osservato un marcato aumento termico a luglio, culminato in un'ondata di calore tra il 15 e il 25 del mese, con temperature massime che hanno raggiunto i 41 °C e minime attestare intorno ai 26 °C. Il 2024, invece, ha registrato temperature leggermente più contenute, con valori medi di 27.0 °C in luglio e 27.1 °C in agosto e massime rispettivamente di 33.8 °C e 33.6 °C. Nel periodo autunnale, il 2023 ha registrato temperature mediamente più elevate rispetto al 2022, con una differenza particolarmente marcata a ottobre (+2 °C). Il 2024 ha mostrato un andamento intermedio tra le due annate precedenti, con temperature medie di 22.5 °C a settembre, 19.5 °C a ottobre e 14.9 °C a novembre. Infine, nel mese di dicembre, il 2023 ha registrato temperature più basse rispetto al 2022, con una differenza di circa 1.7 °C nelle medie e di 1 °C nei valori minimi. Il 2024 ha proseguito questa tendenza, con una temperatura media di 12.5 °C, risultando l'anno più freddo del periodo analizzato.

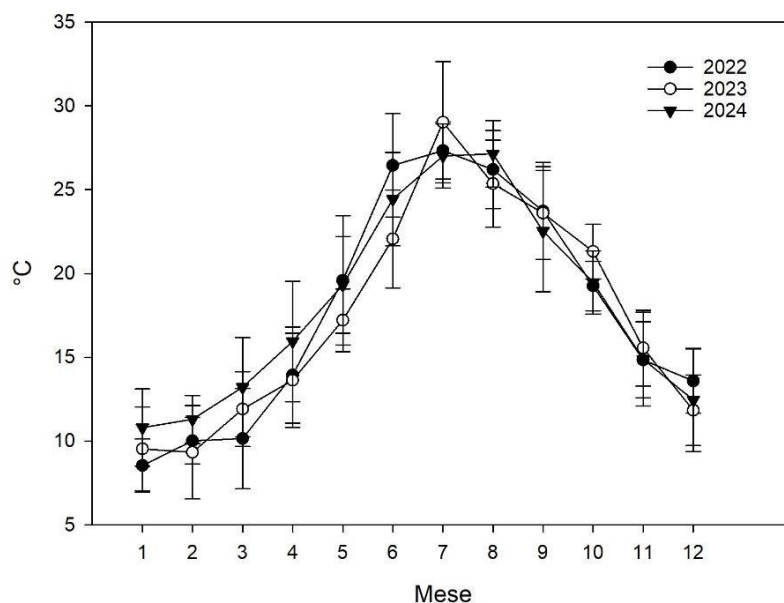


Figura 38. Temperature medie mensili ($\pm$ deviazione standard) rilevate negli anni 2022, 2023 e 2024.

4.3.1.2 *Analisi Pluviometrica*

L'analisi della distribuzione pluviometrica nei tre anni ha evidenziato differenze sostanziali rispetto alla media climatica storica 2001-2021 (Fig. 39). Il 2023 ha mostrato un inverno eccezionalmente secco, con accumuli quasi nulli nei primi tre mesi dell'anno (0.2 mm a gennaio e 3.2 mm a marzo), valori significativamente inferiori alla media ventennale, che per questi mesi oscilla generalmente tra 80 e 100 mm. Il 2022 ha invece mostrato un andamento più vicino al comportamento climatico tipico, con un totale di 123 mm nel primo trimestre. Nel 2024, le precipitazioni invernali sono state nettamente superiori rispetto agli anni precedenti (75 mm a gennaio, 91 mm a febbraio e 59.4 mm a marzo), ma senza discostarsi in modo rilevante dalla media climatica storica.

La primavera ha evidenziato ulteriori anomalie. Il 2023 ha registrato un picco pluviometrico a maggio (95.8 mm) e giugno (52.2 mm), con valori superiori alla media storica per questi mesi, che mostra solitamente un progressivo calo delle precipitazioni con l'avvicinarsi dell'estate. Nel 2024, invece, le precipitazioni primaverili sono risultate più contenute, con 50.4 mm a maggio e un valore molto basso a giugno (4.8 mm), indicando un rapido passaggio verso condizioni più aride.

Durante i mesi estivi, il regime pluviometrico è stato generalmente conforme alle caratteristiche climatiche della regione, con precipitazioni molto scarse. Tuttavia, il 2024

ha mostrato valori leggermente superiori rispetto agli anni precedenti, con 0.8 mm a luglio e 19.2 mm ad agosto, sebbene questi dati rimangano in linea con la tipica aridità estiva della zona.

Nel periodo autunnale, il confronto con la media storica evidenzia differenze significative. La media climatica ventennale indica un incremento delle precipitazioni a partire da settembre, con valori che si attestano intorno ai 100 mm per ottobre, novembre e dicembre. Il 2022 ha seguito parzialmente questa tendenza, con un aumento delle precipitazioni nei mesi autunnali, pur registrando anomalie nei mesi di ottobre e dicembre, caratterizzati da valori inferiori alla media. Il 2023, invece, ha mostrato una riduzione progressiva delle precipitazioni in questa fase, con un totale di circa 130 mm tra settembre e dicembre, valore nettamente inferiore alla media storica e al 2022 (250 mm).

Il 2024, al contrario, ha registrato un significativo incremento delle precipitazioni nei mesi finali dell'anno, con un totale di 274 mm tra settembre e dicembre, superando sia il 2023 che il 2022. In particolare, novembre e dicembre hanno mostrato valori elevati (88.4 mm e 81.2 mm, rispettivamente), contribuendo a ristabilire una disponibilità idrica superiore rispetto all'anno precedente. Tuttavia, il comportamento del 2024 si discosta comunque dalla media ventennale, che presenta una distribuzione delle precipitazioni più graduale lungo il periodo autunnale e invernale.

Queste variazioni climatiche hanno avuto un impatto diretto sullo sviluppo della vite, influenzando sia la variabilità intra-grappolo sia la resa produttiva. Le condizioni del 2023, caratterizzate da un inverno particolarmente siccitoso seguito da precipitazioni irregolari in primavera e da un autunno asciutto, hanno determinato condizioni di stress idrico che possono aver inciso sulla fertilità e sullo sviluppo dei grappoli. Nel 2024, invece, una maggiore disponibilità idrica nei mesi invernali e autunnali potrebbe aver favorito una dinamica di maturazione differente, con possibili ripercussioni sulla qualità della produzione.

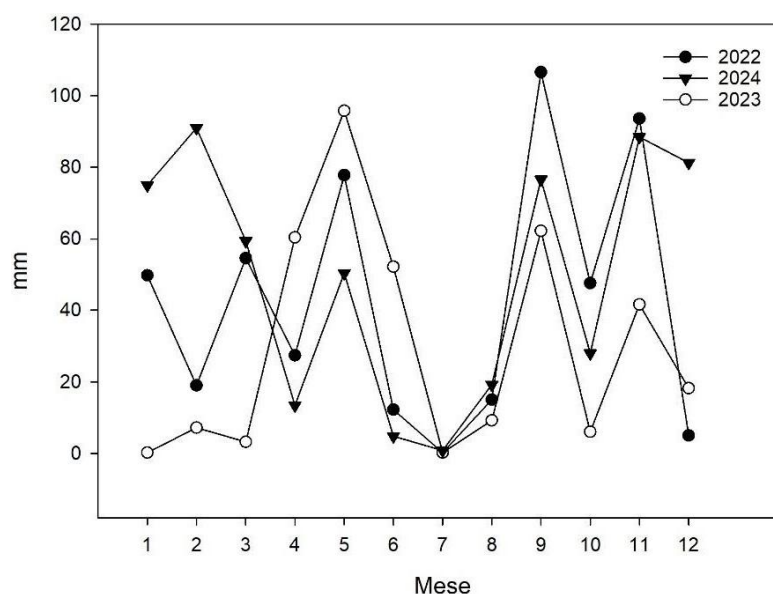


Figura 39. Piovosità mensile rilevata negli anni 2022, 2023 e 2024

4.3.2 Analisi della Normalità e della Distribuzione

4.3.2.1 Solidi Solubili Totali (°Brix)

Nel 2022, l'analisi della distribuzione dei valori di SST negli acini prelevati dalle diverse porzioni del grappolo (prossimali, mediani e distali) ha rivelato differenze significative nella struttura dei dati. Le distribuzioni evidenziano tendenze asimmetriche e variabilità che riflettono le caratteristiche fisiologiche e morfologiche degli acini nelle diverse porzioni.

Gli acini prossimali (prelevati dalla porzione vicina al peduncolo) presentano una distribuzione fortemente asimmetrica, con un valore di asimmetria pari a 0.606 (Fig. 40A). Questo valore indica una coda destra pronunciata, con una distribuzione che si estende verso valori più elevati di SST. Tuttavia, nonostante la presenza di acini con valori estremamente alti, il valore medio di SST (21.13) risulta relativamente contenuto. Questo fenomeno, apparentemente controintuitivo, è spiegato dalla maggiore densità di acini con valori più bassi che, pur non contribuendo alla coda destra, influenzano la media in misura maggiore rispetto agli acini estremi. La discrepanza tra media (21.13) e mediana (21.00) conferma l'effetto della coda destra, con i valori estremi che, pur essendo rari, spingono la media verso destra. Il boxplot evidenzia questa dispersione, mostrando una maggiore variabilità nei valori di SST e la concentrazione di valori più bassi nella parte inferiore della distribuzione.

Gli acini prelevati dalla porzione mediana del grappolo presentano una leggera asimmetria positiva, con un valore pari a 0.493; dunque, anche se la distribuzione appare simmetrica, manifesta una coda destra più lunga (Fig. 40B). La curtosi pari a 0.424 indica una distribuzione caratterizzata da una minore concentrazione di dati attorno alla media rispetto a una distribuzione normale. Il boxplot per gli acini mediani mostra alcuni outlier nella parte destra, indicando la presenza di acini con valori di SST particolarmente elevati. Il confronto tra la media (21.24) e la mediana (21.10) suggerisce che, pur essendo la distribuzione prevalentemente centrata attorno alla mediana, alcuni valori elevati spingono la media verso l'alto. La presenza di questi outlier è ulteriormente evidenziata nel boxplot. La distribuzione, pur non essendo perfettamente simmetrica, non mostra l'asimmetria estrema osservata nei prossimali, ma anche qui i dati sono più sparsi rispetto a quanto ci si aspetterebbe da una distribuzione normale.

Per gli acini distali, la distribuzione risulta relativamente simmetrica, con un valore medio di SST pari a 21.52 e una mediana di 21.40 (Fig. 40C). Il valore asimmetria vicino a zero (0.167) suggerisce una distribuzione equilibrata, con una coda destra poco pronunciata. Tuttavia, la curtosi pari a 0.550, inferiore rispetto a una distribuzione normale, indica una minore concentrazione di dati attorno alla media, con una dispersione più ampia. Il boxplot mostra una distribuzione con pochi outlier e una concentrazione dei valori nella parte centrale. Il confronto tra la media (21.52) e la mediana (21.40) suggerisce che non ci sono distorsioni significative causate da valori estremi. Tuttavia, l'assenza di una concentrazione stretta attorno alla media, come in una distribuzione normale, implica una maggiore dispersione dei dati. La Figura 41, che illustra la distribuzione percentuale degli acini in relazione alle classi di SST, conferma visivamente queste tendenze. Nel dettaglio, si osserva che nella porzione distale la percentuale di acini appartenenti alle classi di zuccheri più basse (da 15.25 a 18.25 °Brix) è relativamente ridotta, ma aumenta progressivamente passando alle classi con valori più elevati, raggiungendo un massimo nelle classi centrali-alte (21.25-22.25 °Brix). Al contrario, nelle porzioni prossimale e mediana, gli acini si distribuiscono in modo più equilibrato lungo l'intera gamma delle classi di zuccheri, con una percentuale relativamente più elevata nelle classi inferiori e intermedie rispetto agli acini della zona distale.

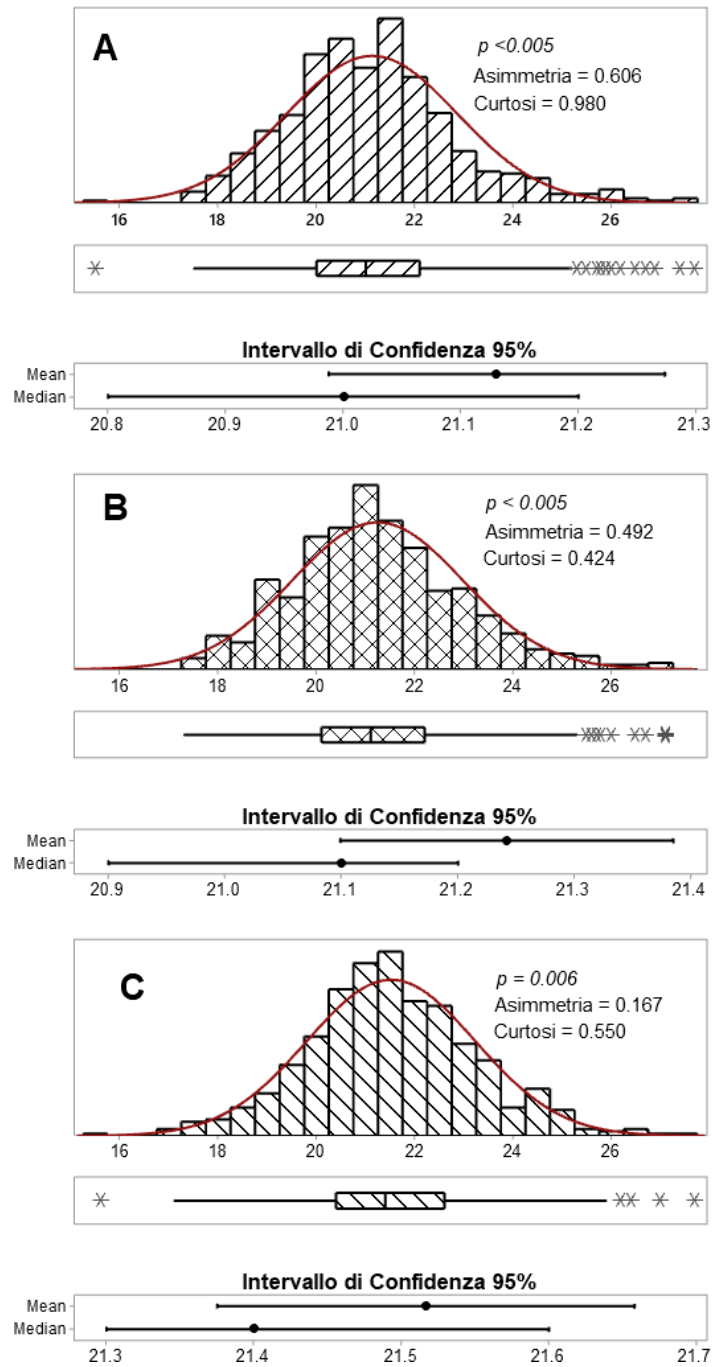


Figura 40. Distribuzione dei valori di solidi solubili totali (SST, °Brix) degli acini prelevati dalle porzioni prossimale (A), mediana (B) e distale (C) del grappolo nel 2022. Le curve rosse rappresentano la distribuzione normale teorica. Per ciascuna distribuzione sono indicati il valore di probabilità (p-value, test di Anderson-Darling), il coefficiente di asimmetria (skewness) e la curtosi. Nel boxplot sottostante ciascun istogramma sono riportati mediana, intervallo interquartile e valori estremi, mentre gli intervalli di confidenza (95%) mostrano la posizione relativa di media e mediana.

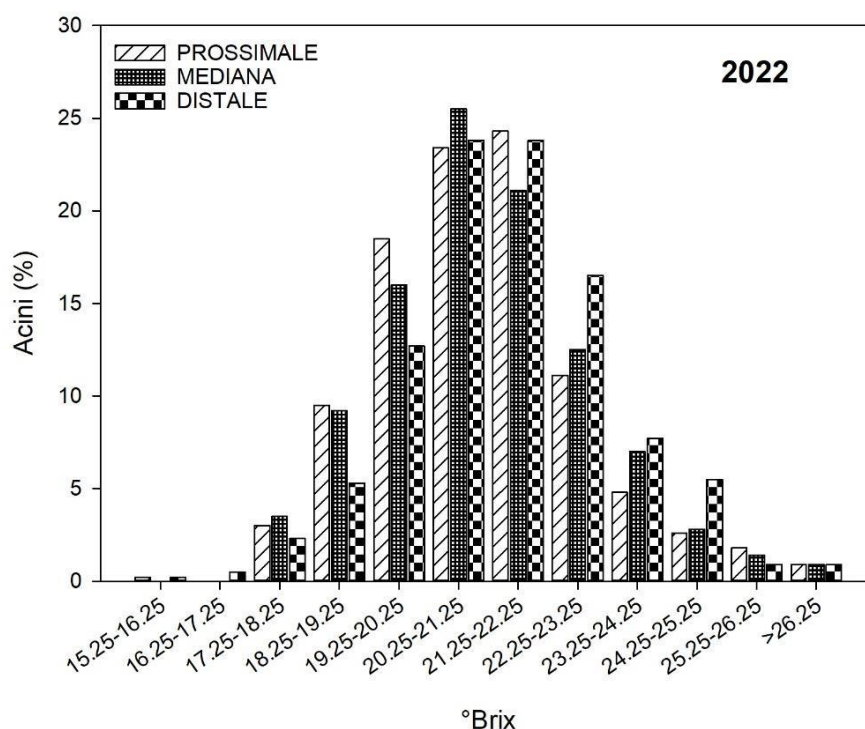


Figura 41. Distribuzione percentuale degli acini nelle diverse classi di solidi solubili totali (SST, °Brix) per le tre porzioni del grappolo (prossimale, mediana e distale) nel 2022.

Nel 2023, l'analisi della distribuzione dei valori di SST negli acini prelevati dalle diverse porzioni del grappolo ha mostrato differenze significative rispetto al 2022. Gli acini prossimali presentano una distribuzione estremamente simmetrica, come evidenziato dal valore di asimmetria (0,013), prossimo allo zero (Fig. 42A). Tuttavia, il test di Anderson-Darling indica che la distribuzione differisce significativamente dalla normalità ($p < 0,005$). Questo risultato è determinato dalla presenza di valori estremi, anche se poco frequenti, localizzati nelle code della distribuzione. Infatti, il valore positivo della curtosi (0,399) indica una distribuzione più appuntita, ossia caratterizzata da una maggiore concentrazione di valori intorno alla media rispetto alla distribuzione normale, ma contemporaneamente con code più pronunciate contenenti valori estremi che influenzano negativamente il test di normalità. Sebbene la media (19,76) e la mediana (19,80) siano vicine, riflettendo una sostanziale simmetria, i valori estremi presenti nelle code sono sufficienti a determinare una deviazione significativa dalla distribuzione normale. Tale caratteristica è visibile anche nel boxplot, che evidenzia alcuni outlier. La distribuzione degli acini mediani risulta statisticamente normale ($p = 0,076$; Fig. 42B), con un valore di simmetria (-0,039) che evidenzia una trascurabile asimmetria negativa. La curtosi è leggermente negativa (-0,180), indicando una forma di minore concentrazione attorno alla

media rispetto a una distribuzione perfettamente normale, ma ciò non influisce in modo significativo sulla normalità. Media (19,69) e mediana (19,70) sono praticamente sovrapponibili, e il boxplot conferma una distribuzione compatta con pochi valori estremi. Infine, la distribuzione degli acini distali risulta anch'essa statisticamente normale ($p = 0,114$; Fig. 42C). Con una simmetria prossima allo zero (-0,032) e una curtosi lievemente negativa (-0,131), questa distribuzione presenta caratteristiche estremamente simili a una normale. Anche in questo caso, media (19,84) e mediana (19,80) risultano concordanti, e il boxplot mostra una dispersione limitata, confermando la normalità complessiva. Pertanto, anche per i dati 2023, considerata la mancata normalità dei dati nella porzione prossimale, l'analisi comparativa tra le tre porzioni del grappolo è stata condotta utilizzando un test non parametrico (Kruskal-Wallis), che permette un confronto affidabile anche in presenza di distribuzioni asimmetriche e di valori estremi.

La tendenza osservata con le analisi della normalità trova ulteriore conferma nell'analisi grafica della distribuzione degli acini nelle classi di zuccheri (Fig. 43). Infatti, rispetto al 2022, la distribuzione appare più equilibrata, con tutte le porzioni prevalentemente concentrate nelle classi intermedie (da 19.25 a 21.25 °Brix). Tuttavia, è evidente che gli acini della porzione distale occupano con maggiore frequenza le classi superiori di SST (21.25-23.25 °Brix). Tale andamento potrebbe spiegare il valore medio complessivamente più elevato osservato negli acini distali, confermando una maturazione relativamente più avanzata in questa porzione del grappolo rispetto alle altre.

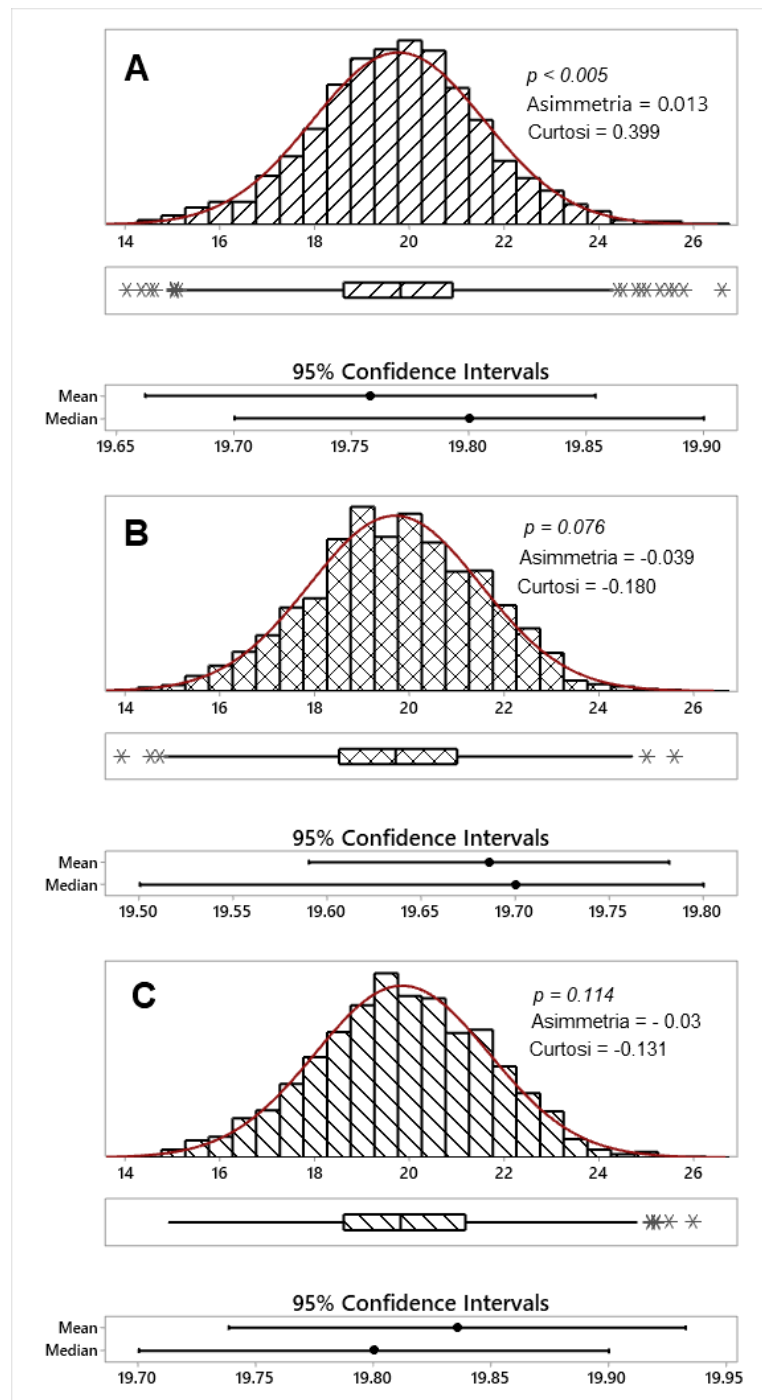


Figura 42. Distribuzione dei valori di solidi solubili totali (SST, °Brix) degli acini prelevati dalle porzioni prossimale (A), mediana (B) e distale (C) del grappolo nel 2023. Le curve rosse rappresentano la distribuzione normale teorica. Per ciascuna distribuzione sono indicati il valore di probabilità (p-value, test di Anderson-Darling), il coefficiente di asimmetria (skewness) e la curtosi. Nel boxplot sottostante ciascun istogramma sono riportati mediana, intervallo interquartile e valori estremi, mentre gli intervalli di confidenza (95%) mostrano la posizione relativa di media e mediana.

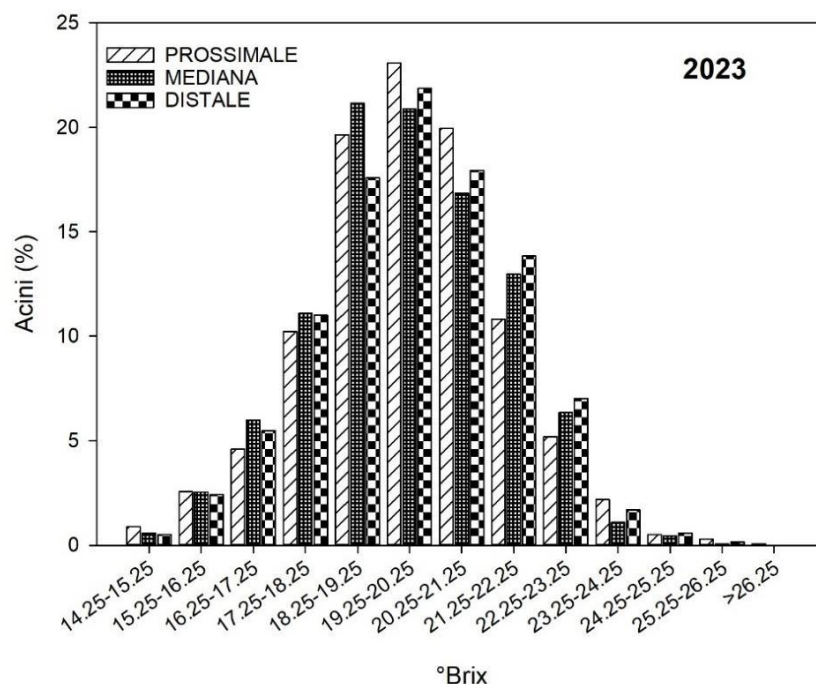


Figura 43. Distribuzione percentuale degli acini nelle diverse classi di solidi solubili totali (SST, °Brix) per le tre porzioni del grappolo (prossimale, mediana e distale) nel 2023.

Nel 2024, l'analisi della distribuzione dei valori di SST negli acini prelevati dalle diverse porzioni del grappolo ha evidenziato caratteristiche comuni a tutte e tre le porzioni, con deviazioni significative dalla distribuzione normale ($p < 0,005$ in tutti i casi). Gli acini prossimali presentano una distribuzione con una marcata asimmetria positiva (0,415, Fig. 44A), che indica una coda destra pronunciata, caratterizzata dalla presenza di valori estremi elevati. Tale coda destra influenza significativamente la distribuzione, contribuendo alla differenza osservata tra la media (21,30) e la mediana (21,10). La curtosi positiva (0,190), seppur modesta, indica una distribuzione con una maggiore presenza di valori estremi rispetto a una distribuzione normale. Il boxplot conferma chiaramente la presenza di questi valori estremi nella coda superiore della distribuzione, che influiscono significativamente sulla non normalità rilevata dal test statistico. La distribuzione degli acini mediani mostra caratteristiche simili a quella degli acini prossimali, con una significativa deviazione dalla normalità ($p < 0,005$, Fig. 44B). Anche in questo caso è presente una asimmetria positiva (0,445) che determina una coda destra pronunciata, confermando la presenza di acini con valori di SST estremamente alti, sebbene relativamente poco frequenti. La curtosi (0,523) indica la presenza di valori più concentrati vicino alla media rispetto a una distribuzione normale, ma con code più accentuate.

Questa struttura spiega la differenza tra il valore medio (21,27) e la mediana (21,10). Il boxplot riflette chiaramente questa presenza di valori estremi, confermando ulteriormente la deviazione dalla normalità. Infine, anche gli acini distali mostrano una significativa deviazione dalla normalità ($p < 0,005$, Fig. 44C). La distribuzione presenta l'asimmetria positiva più marcata tra le tre porzioni analizzate (0,525), indicando una coda destra ancora più evidente e la presenza di valori elevati che influenzano fortemente la media (21,27), spingendola verso destra rispetto alla mediana (21,10). In questo caso, la curtosi (0,686) è la più elevata tra le porzioni del grappolo, indicando una distribuzione fortemente caratterizzata da una più netta concentrazione di dati vicino al centro, accompagnata da una significativa presenza di valori estremi nelle code. Il boxplot conferma chiaramente questa distribuzione, evidenziando un numero maggiore di outlier nella parte superiore. Queste caratteristiche, evidenziate dall'analisi statistica della normalità, trovano conferma anche nella distribuzione percentuale degli acini appartenenti alle diverse classi di SST (Fig. 45). Infatti, nel 2024 si osserva una distribuzione sostanzialmente omogenea degli acini delle tre porzioni del grappolo nelle diverse classi di SST, con differenze limitate prevalentemente alle classi centrali (20.25–22.25 °Brix). In particolare, nella porzione distale si riscontra una lieve superiorità percentuale degli acini rispetto alle altre due porzioni nelle classi centrali, ma tale differenza risulta minima, coerentemente con la vicinanza dei valori medi riscontrati nelle tre porzioni. Pertanto, nonostante le distribuzioni evidenzino valori estremi responsabili delle deviazioni dalla normalità, la maturazione degli acini lungo il grappolo nel 2024 appare nel complesso più uniforme rispetto agli anni precedenti, con una limitata variabilità tra le diverse porzioni.

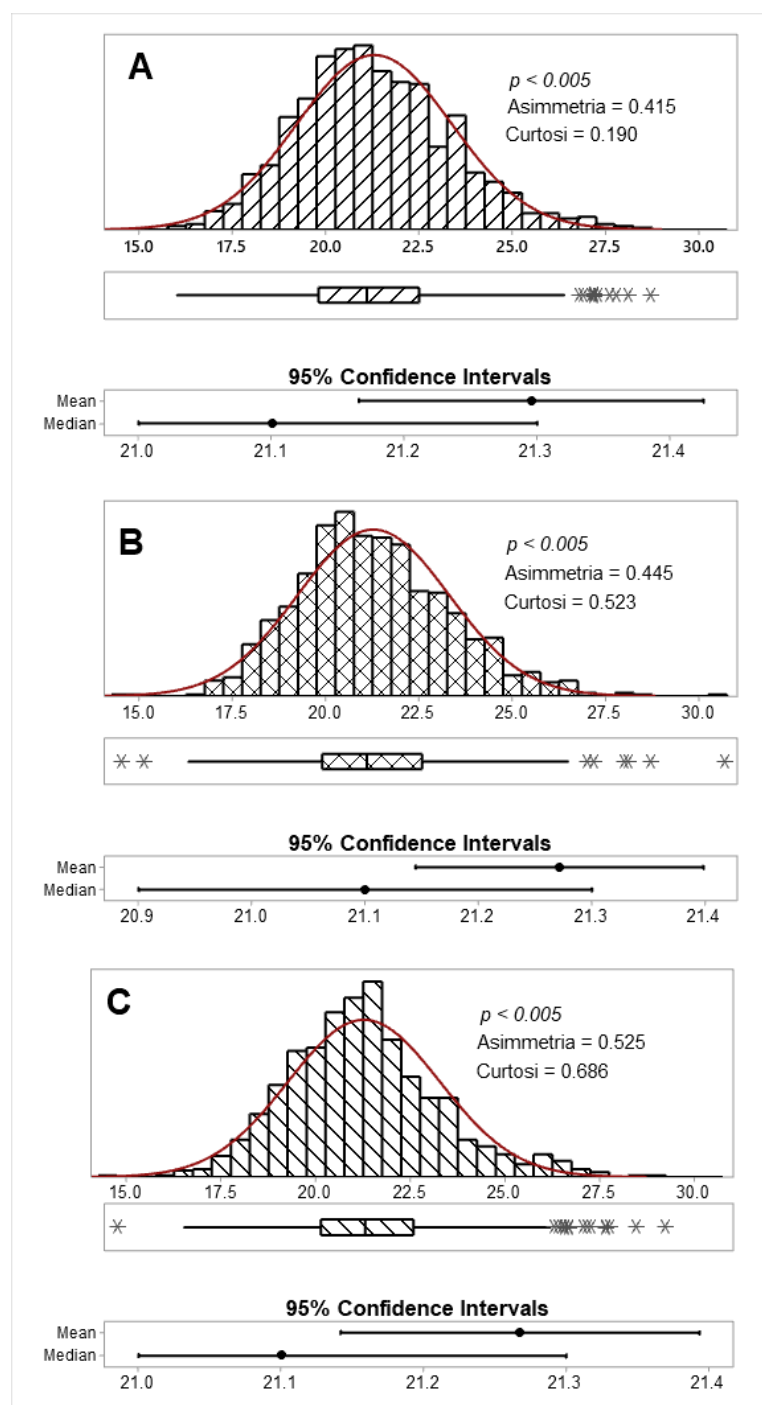


Figura 44. Distribuzione dei valori di solidi solubili totali (SST, °Brix) degli acini prelevati dalle porzioni prossimale (A), mediana (B) e distale (C) del grappolo nel 2024. Le curve rosse rappresentano la distribuzione normale teorica. Per ciascuna distribuzione sono indicati il valore di probabilità (p -value, test di Anderson-Darling), il coefficiente di asimmetria (skewness) e la curtosi. Nel boxplot sottostante ciascun istogramma sono riportati mediana, intervallo interquartile e valori estremi, mentre gli intervalli di confidenza (95%) mostrano la posizione relativa di media e mediana.

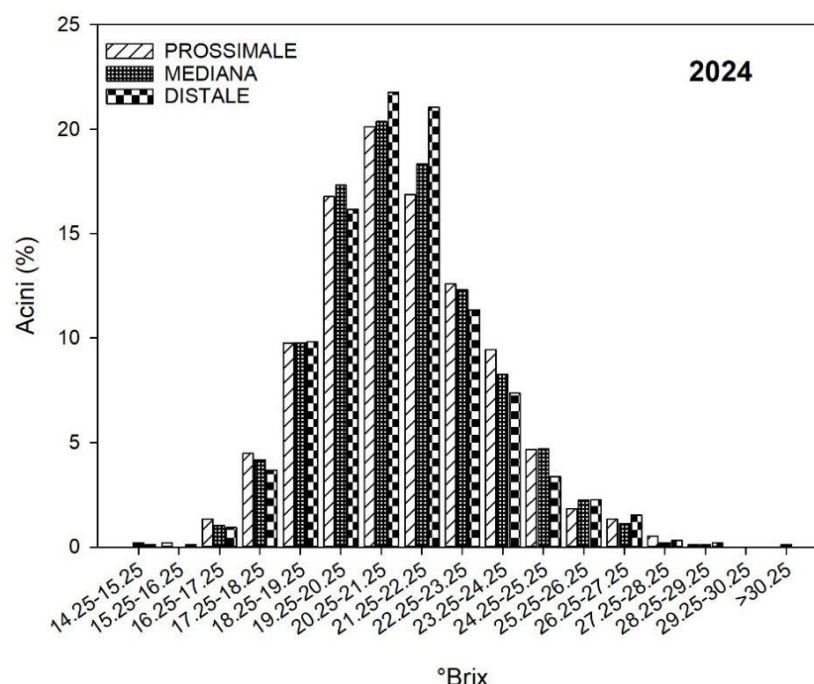


Figura 45. Distribuzione percentuale degli acini nelle diverse classi di solidi solubili totali (SST, °Brix) per le tre porzioni del grappolo (prossimale, mediana e distale) nel 2024.

4.3.2.2 *Peso dell'Acino (g)*

Nel 2022, l'analisi della distribuzione del peso degli acini nelle diverse porzioni del grappolo (prossimale, mediana e distale) ha evidenziato deviazioni significative dalla normalità ($p < 0,005$ in tutte le porzioni), sebbene con caratteristiche distributive distinte tra le tre porzioni. Gli acini prossimali mostrano una distribuzione moderatamente asimmetrica, con un valore di asimmetria pari a 0,369, indicativo di una coda destra relativamente pronunciata, determinata dalla presenza di acini con peso superiore alla media (1,42 g; Fig. 46A). La curtosi prossima allo zero (0,070) suggerisce una forma distributiva simile a quella normale, sebbene con un lieve eccesso di valori estremi nelle code. La ridotta differenza tra media (1,42 g) e mediana (1,40 g) conferma che tali valori estremi hanno un'influenza limitata sulla distribuzione complessiva, come evidenziato anche dal boxplot, che mostra una dispersione equilibrata con pochi outlier. La distribuzione degli acini mediani presenta caratteristiche analoghe alla porzione prossimale, con una lieve asimmetria positiva (0,225) e una curtosi leggermente negativa (-0,026), indicando una distribuzione appena più piatta rispetto a quella normale (Fig. 46B). Anche in questo caso, la media (1,44 g) e la mediana (1,40 g) risultano quasi coincidenti,

confermando un equilibrio complessivo. Tuttavia, il boxplot rivela una modesta presenza di valori estremi superiori, che contribuiscono alla deviazione dalla normalità. Gli acini distali, invece, mostrano un'asimmetria positiva simile (0,218), ma con una curtosi più marcata (0,483), segnale di una distribuzione più appuntita, caratterizzata da una maggiore concentrazione dei dati attorno alla media (1,29 g) e da una più evidente presenza di valori estremi nelle code (Fig. 46C). Anche in questo caso, la prossimità tra media e mediana (1,30 g) suggerisce una distribuzione relativamente simmetrica, sebbene il boxplot evidenzia una maggiore incidenza di valori anomali rispetto alle altre porzioni del grappolo, giustificando la significativa deviazione dalla normalità rilevata. L'analisi della distribuzione percentuale degli acini nelle diverse classi di peso conferma questa tendenza alla non-normalità. Nel 2022, tutte e tre le porzioni del grappolo hanno mostrato una marcata concentrazione in specifiche classi centrali, con code più o meno pronunciate, in linea con i valori di asimmetria e curtosi precedentemente descritti. Nello specifico, gli acini prossimali si distribuiscono prevalentemente nelle classi di peso intermedie (1,28–1,43 g, 17,4%; 1,58–1,73 g, 15,3%), con una presenza più limitata nelle classi estreme, che non superano il 7%. Gli acini mediani evidenziano una concentrazione ancora più accentuata nelle classi centrali (1,28–1,43 g, 20,8%; 1,58–1,73 g, 17,1%), accompagnata da una lieve dispersione verso le classi di peso più basse e più alte. Infine, gli acini distali si distribuiscono prevalentemente in classi centrali di peso inferiore rispetto alle altre porzioni (0,98–1,13 g, 23,4%; 1,28–1,43 g, 18,84%), con code meno pronunciate sia verso i valori minimi che massimi.

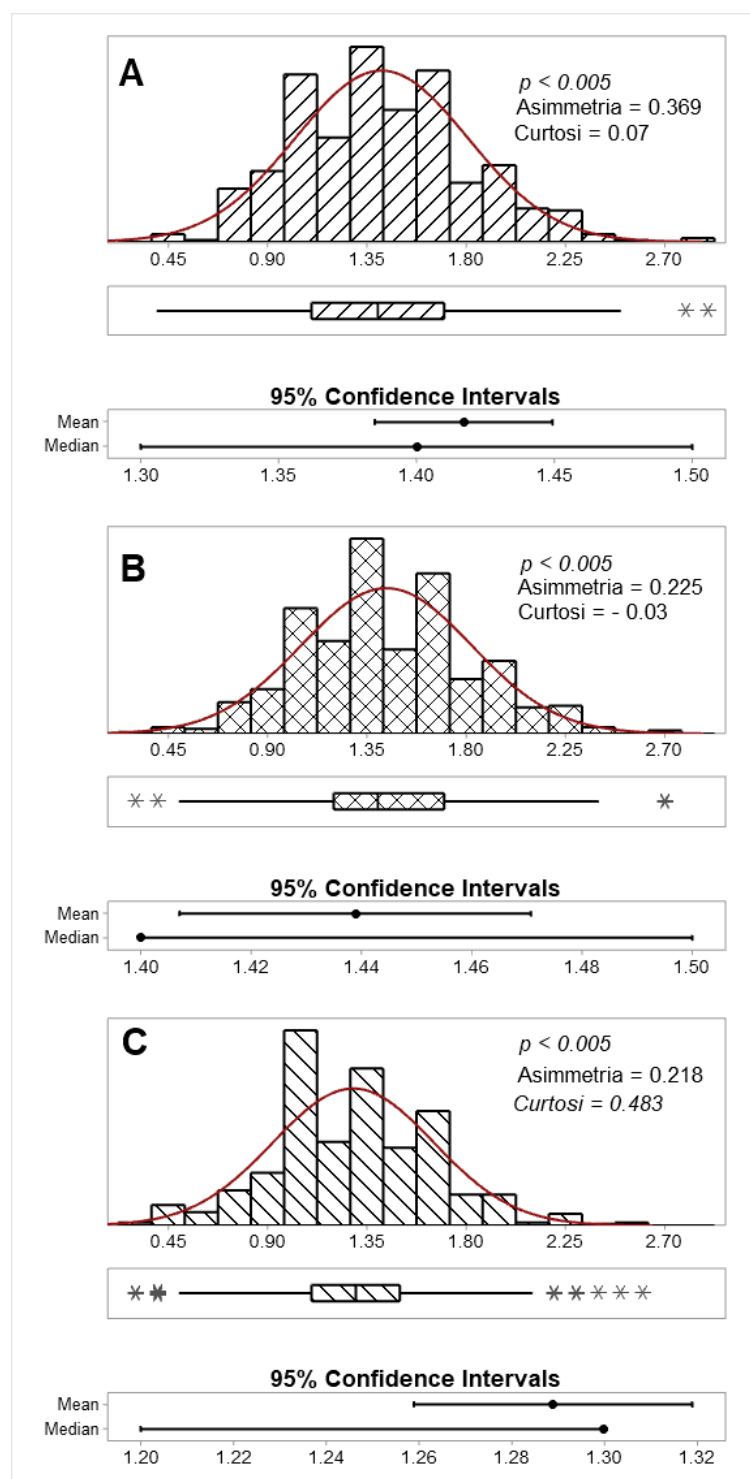


Figura 46. Distribuzione dei valori di peso degli acini (g) prelevati dalle porzioni prossimale (A), mediana (B) e distale (C) del grappolo nel 2022. Le curve rosse rappresentano la distribuzione normale teorica. Per ciascuna distribuzione sono indicati il valore di probabilità (p-value, test di Anderson-Darling), il coefficiente di asimmetria e la curtosi. Nel boxplot sottostante ciascun istogramma sono riportati mediana, intervallo interquartile e valori estremi, mentre gli intervalli di confidenza (95%) mostrano la posizione relativa di media e mediana.

Nel 2023, l'analisi della distribuzione del peso degli acini nelle diverse porzioni del grappolo ha confermato deviazioni significative dalla normalità ($p < 0,005$ in tutti i casi), evidenziando la presenza di valori estremi in ciascuna zona.

Gli acini prossimali mostrano una lieve asimmetria negativa (-0,148), suggerendo una distribuzione leggermente sbilanciata verso valori più elevati (Fig. 47A). La curtosi positiva (0,615) indica una distribuzione relativamente appuntita, con una maggiore concentrazione di dati attorno alla media (1,50 g) e una frequenza più elevata di valori estremi rispetto alla distribuzione normale. La coincidenza tra media e mediana (1,50 g) suggerisce un equilibrio complessivo, nonostante la presenza di outlier. Il boxplot conferma questa tendenza, evidenziando valori estremi sia inferiori che superiori, responsabili della significativa deviazione dalla normalità.

Gli acini mediani presentano caratteristiche simili, con una lieve asimmetria negativa più pronunciata (-0,306) e una curtosi positiva (0,631), indicativa di una distribuzione appuntita con una forte concentrazione dei dati attorno alla media (1,53 g; Fig. 47B). La minima differenza tra media (1,53 g) e mediana (1,54 g) riflette un andamento relativamente bilanciato, sebbene disturbato dalla presenza di valori estremi. Anche in questo caso, il boxplot evidenzia numerosi outlier sia superiori che inferiori, confermando la deviazione rilevata dal test di normalità. Gli acini distali mostrano una distribuzione lievemente più simmetrica rispetto alle altre due porzioni (-0,124; Fig. 47C). La curtosi positiva (0,222) indica comunque una distribuzione relativamente concentrata attorno alla media (1,46 g), con una moderata presenza di valori estremi. La prossimità tra media e mediana (1,49 g) conferma un andamento generalmente equilibrato, sebbene il boxplot riveli una presenza limitata ma significativa di outlier, che giustificano la deviazione dalla normalità.

L'analisi della distribuzione percentuale degli acini nelle diverse classi di peso evidenzia differenze marcate tra le tre porzioni del grappolo. Nel 2023, la porzione prossimale mostra una concentrazione del 47% degli acini nelle classi comprese tra 1,35 e 1,65 g, con code modeste sia verso le classi inferiori ($<1,05$ g, circa 11%) che superiori ($>1,85$ g, circa 10%). La porzione mediana presenta una distribuzione ancora più concentrata nelle classi centrali (1,35–1,65 g), che includono circa il 49% degli acini, con una minore dispersione verso le code rispetto alla porzione prossimale. Infine, gli acini distali mostrano una distribuzione più dispersa, con una minore concentrazione nelle classi centrali (41% tra

1,35 e 1,65 g) e una coda inferiore più pronunciata rispetto alle altre porzioni, con circa il 20% degli acini al di sotto di 1,05 g.

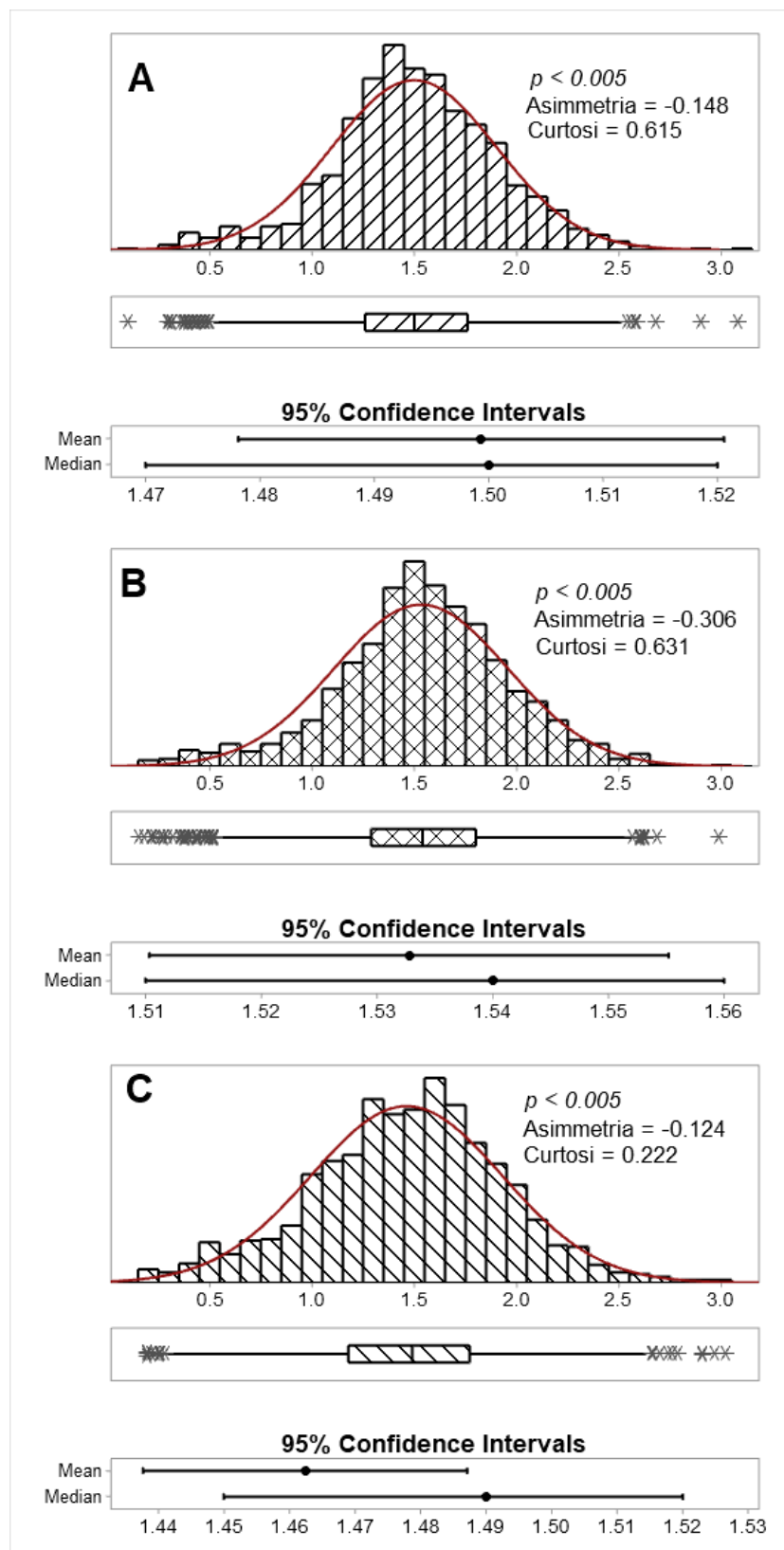


Figura 47. Distribuzione dei valori di peso degli acini (g) prelevati dalle porzioni prossimale (A), mediana (B) e distale (C) del grappolo nel 2023. Le curve rosse

rappresentano la distribuzione normale teorica. Per ciascuna distribuzione sono indicati il valore di probabilità (p-value, test di Anderson-Darling), il coefficiente di asimmetria e la curtosi. Nel boxplot sottostante ciascun istogramma sono riportati mediana, intervallo interquartile e valori estremi, mentre gli intervalli di confidenza (95%) mostrano la posizione relativa di media e mediana.

Le ultime considerazioni riguardano l'analisi sul peso degli acini condotta nel 2024. In quest'annata, tutte le distribuzioni esaminate mostrano deviazioni significative dalla normalità ($p < 0,005$ in tutti i casi) e si distinguono chiaramente per un'elevata concentrazione dei dati intorno al valore medio, come confermato dagli alti valori di curtosi.

In particolare, gli acini prossimali presentano una distribuzione moderatamente asimmetrica in positivo (0,397), caratterizzata da una prevalenza di valori relativamente bassi e dalla presenza, meno frequente ma statisticamente rilevante, di acini con peso elevato nella coda destra della distribuzione (Fig. 48A). L'alto valore di curtosi (1,382) indica una forte concentrazione dei dati intorno alla media (1,18 g), con una dispersione estremamente ridotta. Tuttavia, pochi valori particolarmente elevati, chiaramente visibili nel boxplot, risultano sufficienti a determinare la deviazione significativa dalla normalità.

Gli acini mediani mostrano una distribuzione eccezionalmente anomala rispetto agli altri anni e alle altre porzioni, con un valore di asimmetria estremamente elevato (10,41; Fig. 48B). Ciò riflette una netta prevalenza di acini con peso inferiore alla media (1,21 g), accompagnata dalla presenza, seppur rarissima, di acini con peso molto elevato. La curtosi particolarmente alta (223,04) indica una concentrazione quasi totale degli acini in un intervallo estremamente ristretto attorno alla media, con una dispersione minima e pochi valori eccezionalmente elevati, chiaramente evidenziati nel boxplot. Questa peculiare struttura distributiva giustifica pienamente la significativa deviazione dalla normalità osservata.

Gli acini distali presentano anch'essi una distribuzione fortemente concentrata, con una lieve asimmetria positiva (0,152), che suggerisce una leggera prevalenza di valori inferiori alla media (1,18 g; Fig. 48C). La curtosi prossima a 1 (0,992) conferma una distribuzione caratterizzata da scarsa dispersione e da una marcata concentrazione attorno al valore medio. Anche in questo caso, pochi valori estremi, visibili nel boxplot, sono sufficienti a determinare una significativa deviazione dalla normalità.

Nel complesso, l'analisi della normalità per il 2024 conferma una forte concentrazione dei dati attorno ai valori medi, con distribuzioni caratterizzate da curtosi elevata e deviazioni dalla normalità determinate dalla presenza di code ridotte e da una limitata variabilità interna. Questa tendenza trova ulteriore conferma nell'analisi della distribuzione percentuale del numero di acini nelle diverse classi di peso, che evidenzia una netta predominanza delle classi centrali e una presenza molto limitata di acini con pesi estremi in tutte le porzioni del grappolo.

Nella porzione prossimale, la maggior parte degli acini si distribuisce nelle classi 0,75–1,25 g (57,1%) e 1,25–1,75 g (33,1%), indicando una forte concentrazione in questo intervallo. La presenza di acini con peso inferiore a 0,75 g o superiore a 1,75 g è estremamente ridotta, con valori percentuali inferiori al 5%, suggerendo una distribuzione con code particolarmente limitate.

La porzione mediana mostra un andamento simile, con il 53,5% degli acini nella classe 0,75–1,25 g e il 37,9% nella classe 1,25–1,75 g. Rispetto alla porzione prossimale, si osserva una lieve tendenza verso pesi più elevati, senza tuttavia alterare in modo significativo la struttura generale della distribuzione. Anche in questo caso, le classi di peso estreme presentano percentuali minime, confermando la forte concentrazione attorno ai valori centrali.

Gli acini distali mostrano una distribuzione ancora più accentuata nelle classi centrali, con il 55,1% nella classe 0,75–1,25 g e il 34,8% nella classe 1,25–1,75 g. La percentuale di acini al di fuori di questo intervallo risulta ancora più ridotta rispetto alle altre due porzioni, con una presenza minima nelle code estreme.

Alla luce delle caratteristiche distributive osservate, che in tutti gli anni esaminati hanno mostrato deviazioni significative dalla normalità e una costante presenza di valori estremi, l'analisi delle differenze nei pesi degli acini tra le tre porzioni del grappolo è stata condotta mediante test statistici non parametrici, come il test di Kruskal-Wallis.

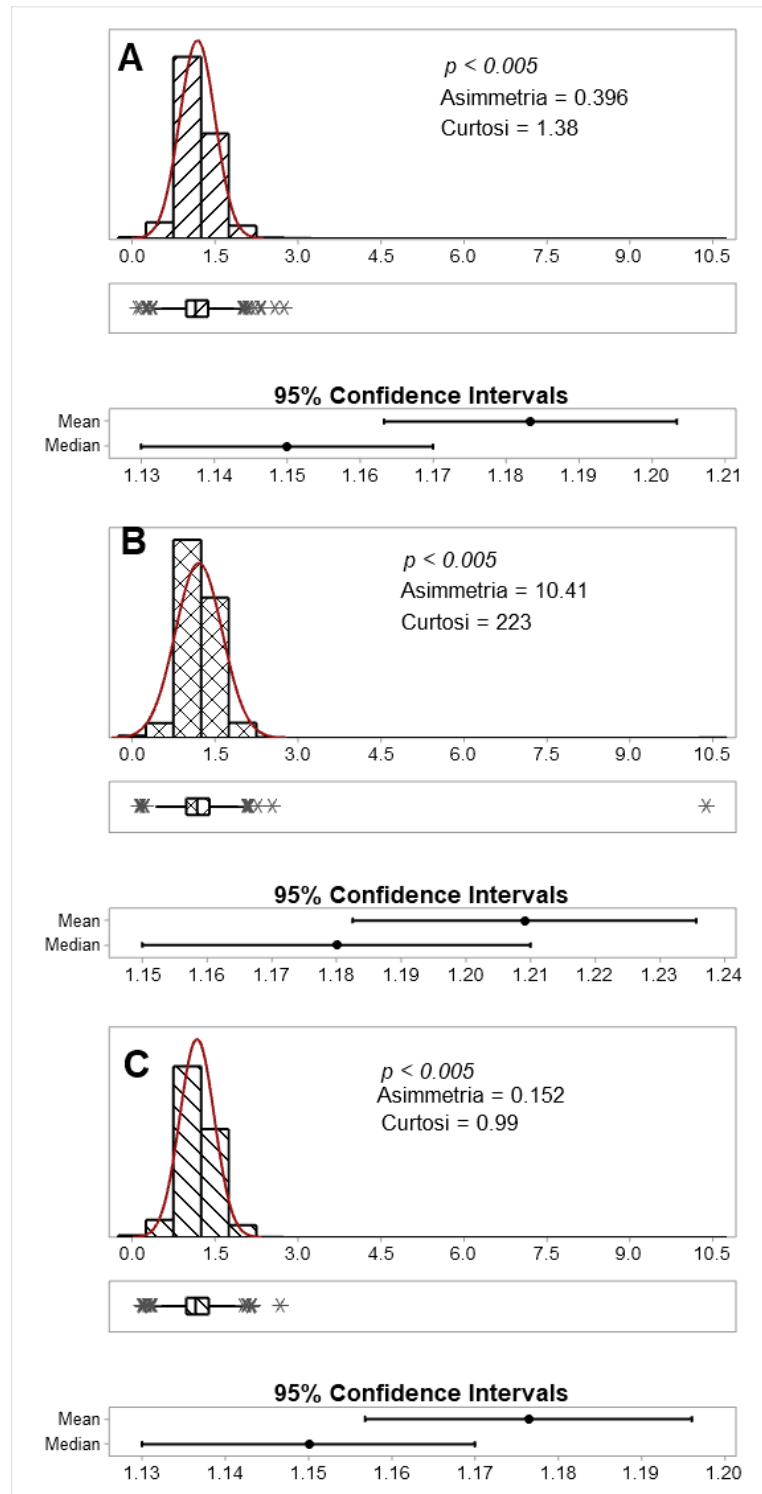


Figura 48. Distribuzione dei valori di peso degli acini (g) prelevati dalle porzioni prossimale (A), mediana (B) e distale (C) del grappolo nel 2024. Le curve rosse rappresentano la distribuzione normale teorica. Per ciascuna distribuzione sono indicati il valore di probabilità (p-value, test di Anderson-Darling), il coefficiente di asimmetria e la curtosi. Nel boxplot sottostante ciascun istogramma sono riportati mediana, intervallo interquartile e valori estremi, mentre gli intervalli di confidenza (95%) mostrano la posizione relativa di media e mediana.

4.3.3 Confronto tra le porzioni del grappolo: evidenze da test non parametrici

4.3.3.1 *Solidi Solubili Totali (°Brix)*

L'analisi non parametrica di Kruskal-Wallis ha evidenziato differenze statisticamente significative nella concentrazione zuccherina (°Brix) tra le diverse posizioni degli acini nel grappolo nel 2022 ($p < 0.001$), mentre nel 2023 ($p = 0.098$) e nel 2024 ($p = 0.951$) non sono state riscontrate differenze rilevanti (Tab. 20). Nel 2022, la media dei ranghi mostra un gradiente crescente di contenuto zuccherino lungo il grappolo, con valori più bassi nella porzione prossimale (797.6), intermedi nella porzione mediana (832.9) e più elevati nella porzione distale (927.0). Il valore Z, che quantifica lo scostamento della media dei ranghi rispetto alla distribuzione complessiva, conferma una differenza significativa tra gli acini prossimali e quelli distali ($Z = -3.26$ vs. $Z = 4.42$). L'analisi post hoc di Dunn, ha evidenziato che tali differenze sono attribuibili principalmente ai confronti prossimale vs. distale ($p < 0.001$) e mediana vs. distale ($p = 0.004$), mentre il confronto prossimale vs. mediana non ha mostrato differenze significative ($p = 0.680$). Nel 2023, sebbene il ranking medio abbia mostrato un andamento simile a quello dell'anno precedente, con valori più elevati negli acini distali (2110.1) rispetto ai mediani (2012.5) e prossimali (2055.9), il test di Kruskal-Wallis non ha rilevato differenze statisticamente significative ($p = 0.098$). Questo risultato suggerisce una distribuzione più uniforme del contenuto zuccherino all'interno del grappolo rispetto al 2022. Di conseguenza, l'analisi post hoc di Dunn non è stata applicata. Nel 2024, la distribuzione del contenuto zuccherino tra le diverse posizioni del grappolo è risultata ancora più omogenea, con ranking medi molto simili tra loro (Apicale = 1480.4, Mediana = 1470.7, Basale = 1469.3). Anche il valore Z è risultato prossimo allo zero per tutti i gruppi ($Z = 0.31, -0.13, -0.19$), indicando un'assenza di differenze significative tra le posizioni ($p = 0.951$). In questo caso, come per il 2023, non è stata necessaria l'analisi post hoc. Questi risultati indicano che l'effetto della posizione dell'acino nel grappolo sulla concentrazione zuccherina non è costante tra le annate, suggerendo una forte influenza delle condizioni climatiche stagionali. Il gradiente zuccherino osservato nel 2022 potrebbe riflettere un andamento climatico caratterizzato da condizioni più favorevoli a una maturazione differenziata all'interno del grappolo. Al contrario, l'assenza di differenze significative nel 2023 e 2024 potrebbe essere attribuibile a condizioni climatiche più estreme, caratterizzate da stress termici o idrici che hanno uniformato la maturazione degli acini, attenuando le differenze fisiologiche tra le diverse posizioni all'interno del grappolo.

Tabella 20. Solidi Solubili Totali (SST, °Brix) degli acini in relazione alla posizione nel grappolo nelle annate 2022, 2023 e 2024

2022					
	Prossimale	Mediana	Distale	Test di Dunn	
Media SST (°brix)	21.13	21.24	21.52	P vs. D	<0.001
Media dei Ranghi	797.6	832.9	927	P vs. M	0.680
Z - value	-3.26	-1.16	4.42	D vs. M	0.004
P- value	<0.001				
2023					
	Prossimale	Mediana	Distale	Test di Dunn	
Media SST (°brix)	19.76	19.69	19.83	P vs. D	N/A
Media dei Ranghi	2055.9	2012.5	2110.1	P vs. M	N/A
Z - value	-0.14	-1.79	1.93	D vs. M	N/A
P- value	0.098				
2024					
	Prossimale	Mediana	Distale	Test di Dunn	
Media SST (°brix)	21.30	21.27	21.27	P vs. D	N/A
Media dei Ranghi	1480.4	1470.7	1469.3	P vs. M	N/A
Z - value	0.31	-0.13	-0.19	D vs. M	N/A
P- value	0.951				

La tabella riporta la media del contenuto zuccherino (SST, °Brix), la media dei ranghi ottenuta tramite il test di Kruskal-Wallis e il valore Z per ciascuna posizione del grappolo (prossimale, mediana, distale). Il *p-value* del test di Kruskal-Wallis indica la significatività globale delle differenze tra le posizioni in ciascun anno. L'analisi post hoc di Dunn è stata applicata solo nei casi in cui Kruskal-Wallis ha evidenziato differenze significative ($p < 0.05$). I valori di *p* relativi ai confronti a coppie (**P vs. D** = prossimale vs. distale; **P vs. M** = prossimale vs. mediana; **D vs. M** = distale vs. mediana) sono stati corretti con il metodo di Bonferroni. N/A indica che l'analisi post hoc non è stata applicata in quanto il test di Kruskal-Wallis non ha rilevato differenze significative.

4.3.3.2 Peso dell'acino

Per il peso dell'acino, l'analisi ha evidenziato che quest'ultimo variava significativamente in funzione della posizione all'interno del grappolo nel 2022 ($p < 0.001$) e nel 2023 ($p < 0.001$), mentre nel 2024 le differenze non sono risultate significative ($p = 0.309$; Tab. 21).

Nel 2022, gli acini situati nella porzione prossimale e mediana del grappolo tendevano a essere più pesanti rispetto a quelli distali, con una media di 1.42 g e 1.44 g rispettivamente, contro 1.29 g nella parte distale. La distribuzione dei ranghi riflette questa tendenza, con valori più elevati per gli acini prossimali (892.7) e mediani (925.7), mentre quelli distali presentavano i valori più bassi (739.1). Il valore Z ha confermato questa differenziazione, evidenziando un netto scostamento negativo per la porzione distale ($Z = -6.72$), mentre le

altre due posizioni mostravano valori positivi ($Z = 2.38$ e $Z = 4.34$). Il test post hoc di Dunn ha indicato che la differenza più marcata era tra acini prossimali e distali ($p < 0.001$) e tra quelli mediani e distali ($p < 0.001$), mentre tra prossimale e mediana non si sono riscontrate differenze significative ($p = 0.77$).

Nel 2023, la situazione si è rivelata più complessa. Anche in questo caso, gli acini della porzione mediana hanno mostrato il peso medio più elevato (1.53 g), seguiti da quelli prossimali (1.50 g) e, infine, da quelli distali (1.46 g). Il ranking medio ha mostrato uno schema analogo, con valori più alti per la porzione mediana (2166.5), mentre prossimale (2049.9) e distale (1971) presentavano valori inferiori. Il valore Z ha confermato una differenziazione significativa tra la mediana e le altre due posizioni ($Z = 3.97$ per la mediana vs. $Z = -0.48$ e $Z = -3.49$ per prossimale e distale). Il test di Dunn ha mostrato che la differenza era più evidente tra gli acini mediani e distali ($p < 0.001$) e, in misura minore, tra quelli prossimali e mediani ($p = 0.031$), mentre il confronto tra prossimale e distale non ha rivelato differenze significative ($p = 0.250$).

Nel 2024, invece, il peso dell'acino è risultato più uniforme tra le diverse posizioni, con valori medi pressoché sovrapponibili (prossimale = 1.18 g, mediana = 1.21 g, distale = 1.17 g). Anche i ranghi medi risultavano molto simili (1458, 1509 e 1457.9 rispettivamente), e il valore Z era prossimo allo zero per tutti i gruppi ($Z = -0.77$, 1.53, -0.77), confermando l'assenza di una differenziazione significativa tra le posizioni ($p = 0.309$). Di conseguenza, il test di Dunn non è stato applicato.

Questi risultati suggeriscono che anche la distribuzione del peso dell'acino all'interno del grappolo non è un fenomeno costante, ma sembra risentire fortemente dell'andamento climatico stagionale. La mancanza di differenze significative osservate nel 2024 potrebbe essere conseguenza di condizioni climatiche più estreme o stressanti, che hanno uniformato la crescita degli acini, riducendo la variabilità interna al grappolo e limitando le differenze legate alla posizione.

Tabella 21. Peso degli acini (g) in relazione alla posizione nel grappolo nelle annate 2022, 2023 e 2024

2022					
	Prossimale	Mediana	Distale	Test di Dunn	
Peso medio (g)	1.42	1.44	1.29	P vs. D	<0.001
Media dei Ranghi	892.7	925.7	739.1	P vs. M	0.77
Z - value	2.38	4.34	-6.72	D vs. M	<0.001
P- value	<0.001				
2023					
	Prossimale	Mediana	Distale	Test di Dunn	
Peso medio (g)	1.50	1.53	1.46	P vs. D	0.250
Media dei Ranghi	2049.9	2166.5	1971	P vs. M	0.031
Z - value	-0.48	3.97	-3.49	D vs. M	<0.001
P- value	<0.001				
2024					
	Prossimale	Mediana	Distale	Test di Dunn	
Peso medio (g)	1.18	1.21	1.17	P vs. D	N/A
Media dei Ranghi	1458	1509	1458	P vs. M	N/A
Z - value	-0.77	1.53	-0.77	D vs. M	N/A
P- value	0.309				

La tabella riporta la media del peso degli acini, la media dei ranghi ottenuta tramite il test di Kruskal-Wallis e il valore Z per ciascuna posizione del grappolo (prossimale, mediana, distale). Il *p-value* del test di Kruskal-Wallis indica la significatività globale delle differenze tra le posizioni in ciascun anno. L'analisi post hoc di Dunn è stata applicata solo nei casi in cui Kruskal-Wallis ha evidenziato differenze significative ($p < 0.05$). I valori di *p* relativi ai confronti a coppie (**P vs. D** = prossimale vs. distale; **P vs. M** = prossimale vs. mediana; **D vs. M** = distale vs. mediana) sono stati corretti con il metodo di Bonferroni. N/A indica che l'analisi post hoc non è stata applicata in quanto il test di Kruskal-Wallis non ha rilevato differenze significative.

4.4 Discussioni

Il presente studio ha valutato l'effetto della posizione dell'acino all'interno del grappolo sulla composizione zuccherina e sul peso degli acini nel corso di tre stagioni vegetative consecutive. I risultati hanno evidenziato che, in una sola delle tre annate, si sono riscontrate differenze significative tra le porzioni del grappolo in termini di contenuto zuccherino, suggerendo un'influenza determinante delle condizioni climatiche specifiche di ciascun anno.

Nella stagione 2022, è stata osservata una variabilità intra-grappolo caratterizzata da un maggiore contenuto di zuccheri negli acini in posizione distale, mentre negli anni 2023 e 2024 tali differenze non sono emerse. Questa osservazione suggerisce che la variabilità intra-grappolo possa essere modulata sia da aspetti legati alla gestione agronomica sia da fattori ambientali. Nel dettaglio, i risultati del 2022 indicano che gli acini distali sono quelli caratterizzati dalla minore dimensione ma dal maggiore livello di SST. Tale risultato contrasta con diversi studi presenti in letteratura, che riportano generalmente un contenuto zuccherino minore negli acini distali. Ad esempio, Ollat e Gaudillère (1998), analizzando la variabilità intra-grappolo su viti di *Cabernet Sauvignon*, hanno osservato che gli acini prossimali, ovvero quelli situati vicino al peduncolo, tendevano ad avere una dimensione maggiore e un contenuto zuccherino più elevato rispetto agli acini distali. Questa differenza è stata attribuita a una distribuzione più efficiente degli assimilati verso la porzione prossimale del grappolo. Analogamente, Pisciotta et al. (2013) studiando la variabilità intra-grappolo nel *Syrah* potato a cordone speronato, hanno osservato che negli acini prossimali e mediani si registrano concentrazioni zuccherine più elevate rispetto a quelli distali, confermando una distribuzione fisiologica coerente con la direzionalità del trasporto di metaboliti. Un risultato simile è stato riportato anche da Pagay e Cheng (2010), i quali, analizzando la maturazione del *Cabernet Franc* e del *Concord* nei Finger Lakes, hanno osservato che complessivamente la variabilità all'interno del grappolo risulta maggiore di quella tra i grappoli a maturità e che in genere gli acini distali manifestano uno sviluppo più contenuto. Sebbene alcuni studi presenti in letteratura suggeriscano una correlazione positiva tra dimensione degli acini e accumulo di SST, altri studi indicano che acini di dimensione ridotta possano raggiungere concentrazioni zuccherine superiori per

effetto della concentrazione. Roby e Matthews (2004), analizzando grappoli di *Cabernet Sauvignon* potato a cordone bilaterale, hanno evidenziato che gli acini più piccoli avevano una maggiore proporzione di buccia rispetto alla polpa, il che può favorire un'elevata concentrazione di zuccheri e composti fenolici. Questo fenomeno è stato confermato anche da Barbagallo et al. (2008), i quali hanno dimostrato che, per la cultivar Syrah, la relazione tra dimensione e concentrazione zuccherina può essere inversa, con acini più piccoli che presentano valori più elevati di zuccheri solubili rispetto a quelli più grandi. In altri studi, i dati raccolti hanno mostrato che gli acini distali erano caratterizzati da dimensioni inferiori rispetto alle altre porzioni del grappolo, suggerendo che il fenomeno dell'effetto concentrazione degli zuccheri abbia giocato un ruolo chiave nella determinazione dei valori di Brix più elevati (López-Miranda e Yuste, 2004; Tang et al., 2019).

Oltre agli aspetti agronomici, i risultati ottenuti indicano che l'andamento climatico stagionale ha avuto un ruolo chiave nel determinare l'entità della variabilità intra-grappolo. Mentre nel 2022 sono state riscontrate differenze significative tra le porzioni del grappolo, negli anni successivi tali differenze non sono state rilevate. Il 2022 è stato caratterizzato da una distribuzione regolare delle precipitazioni lungo tutto il ciclo produttivo, tuttavia, tale differenza non è emersa nelle annate successive (2023 e 2024), suggerendo che il clima abbia giocato un ruolo determinante nel modulare la variabilità compositiva intra-grappolo.

In particolare, il 2023 è stato caratterizzato da condizioni climatiche estreme, con temperature elevate, ondate di calore prolungate e stress idrico marcato. Questo scenario sembra aver accelerato e uniformato il processo di maturazione, determinando una riduzione della variabilità intra-grappolo rispetto all'anno precedente.

L'effetto dell'annata sulla maturazione dell'uva è stato ampiamente documentato in letteratura. Jones et al. (2005; 2010) hanno dimostrato che il clima annuale incide in modo significativo sulla composizione dell'uva, evidenziando come annate climaticamente più complesse favoriscano una maturazione più uniforme. In particolare, temperature elevate accorciano il periodo tra invaiatura e maturazione tecnologica, accelerando il processo di accumulo degli zuccheri e rendendo più omogenea la composizione degli acini. Inoltre, nelle regioni caratterizzate da temperature elevate, la variabilità tra le annate tende a

ridursi, suggerendo che condizioni climatiche più calde possano determinare una maturazione più sincrona all'interno del vigneto.

Questa influenza del clima sulla qualità dell'uva è stata ulteriormente confermata da Drappier et al. (2019), i quali hanno evidenziato che il clima annuale rappresenta uno dei principali determinanti della qualità delle uve e del vino, spesso con un impatto superiore rispetto a fattori come il suolo e/o la varietà. Secondo gli autori, l'aumento delle temperature non solo modifica il metabolismo primario dell'uva, influenzando l'accumulo di zuccheri e la degradazione degli acidi organici, ma altera anche il profilo aromatico e la struttura fenolica. Un'accelerazione della maturazione in risposta a temperature più elevate potrebbe quindi contribuire a una minore differenziazione nella composizione degli acini tra le diverse porzioni del grappolo.

Allo stesso modo, Jones e Alves (2012) hanno osservato che un aumento delle temperature stagionali e una maggiore frequenza di eventi di calore possono portare a una maturazione più uniforme, riducendo le differenze di maturazione tra i grappoli. Un effetto simile è stato riportato da Ashenfelter e Storchmann (2016), secondo cui annate più calde tendono a produrre uve con un contenuto zuccherino più elevato e una minore acidità, elementi che potrebbero riflettersi in una riduzione della variabilità intra-grappolo.

Oltre alle temperature, anche la disponibilità idrica rappresenta un fattore chiave nella determinazione dell'omogeneità della maturazione. Leeuwen e Darriet (2016) hanno evidenziato che il deficit idrico accelera la maturazione dell'uva, favorendo una maggiore concentrazione zuccherina e una riduzione dell'acidità. Sebbene non venga affermato esplicitamente che una minore disponibilità idrica riduca la variabilità di maturazione, è plausibile che la combinazione tra temperature elevate e stress idrico favorisca una maturazione più omogenea degli acini.

Ulteriori studi hanno analizzato l'impatto delle condizioni climatiche estreme sulla durata della fase di maturazione. Parra et al. (2010) hanno osservato che il tempo tra invaiatura e maturazione tende a ridursi nelle annate più calde, un fenomeno che potrebbe contribuire a rendere omogenea la maturazione degli acini e, di conseguenza, a una minore variabilità intra-grappolo.

Queste evidenze supportano l'interpretazione secondo cui le condizioni climatiche dell'annata 2023, caratterizzata da alte temperature e limitata disponibilità idrica, abbiano favorito una maturazione più uniforme degli acini all'interno del grappolo. Sebbene non sia possibile trarre una conclusione definitiva sulla riduzione della variabilità intra-grappolo, i dati disponibili suggeriscono che l'accelerazione della maturazione osservata in annate calde e siccitose possa aver determinato un appiattimento delle differenze tra le diverse porzioni del grappolo.

L'influenza delle condizioni del 2023 non si è limitata a quell'annata, ma ha avuto ripercussioni significative sulla fertilità e sulla resa del 2024. Le alte temperature e lo stress idrico del 2023 hanno probabilmente inciso sulla differenziazione delle gemme a fiore, determinando una riduzione del numero di grappoli per pianta e, di conseguenza, una minore produzione nella stagione successiva. Questa diminuzione della resa potrebbe aver ulteriormente contribuito a rendere omogenea la maturazione nel 2024.

A tal proposito, la letteratura suggerisce che un carico produttivo contenuto possa favorire una maturazione più omogenea degli acini, riducendo le differenze intra-grappolo. Nuzzo e Matthews (2006) hanno evidenziato che un carico produttivo elevato tende a prolungare il periodo di maturazione, determinando un'accentuazione della variabilità compositiva tra gli acini. Analogamente, Guidoni et al. (2002) hanno dimostrato che il diradamento dei grappoli nel Nebbiolo riduce la disomogeneità nella maturazione, determinando un contenuto zuccherino più uniforme tra gli acini.

Nel presente studio, la combinazione tra l'effetto climatico del 2023 e la conseguente riduzione della resa nel 2024 ha plausibilmente determinato un livellamento della variabilità compositiva all'interno del grappolo. La gestione agronomica, in particolare la potatura a cordone speronato, caratterizzato da un carico produttivo relativamente contenuto, potrebbe aver amplificato questa tendenza, promuovendo una maturazione più sincronizzata degli acini. Questi risultati suggeriscono che l'interazione tra condizioni ambientali e carico produttivo non solo influenza la qualità delle uve, ma potrebbe anche generare delle implicazioni dirette sulle strategie di campionamento e sulla

gestione dell'epoca di vendemmia, elementi essenziali per garantire una produzione coerente con gli obiettivi enologici prefissati.

4.5 Conclusioni

Le evidenze emerse dal presente studio confermano che la variabilità intra-grappolo in termini di contenuto zuccherino e peso dell'acino è un fenomeno reale, la cui entità e distribuzione risultano fortemente influenzate dalle condizioni ambientali. L'analisi condotta su tre annate consecutive ha evidenziato come nel 2022 fosse presente un chiaro gradiente di maturazione lungo il grappolo, con acini distali caratterizzati da un maggior livello di SST rispetto a quelli prossimali e mediani. Tuttavia, tale differenziazione è risultata meno marcata o del tutto assente nelle annate successive (2023 e 2024), suggerendo che le condizioni climatiche e il carico produttivo abbiano svolto un ruolo chiave nel modulare la variabilità compositiva intra-grappolo.

L'analisi dell'andamento climatico ha evidenziato che il 2023 è stato caratterizzato da temperature particolarmente elevate, ondate di calore prolungate e stress idrico marcato, condizioni che hanno presumibilmente accelerato il processo di maturazione, rendendo simile la composizione zuccherina tra le diverse porzioni del grappolo. Sebbene il 2024 abbia presentato anch'esso condizioni climatiche sfavorevoli, le ripercussioni dell'annata precedente sulla fertilità potenziale e sulla resa per pianta hanno avuto un ulteriore impatto sulla variabilità intra-grappolo. La letteratura suggerisce infatti che una minore produzione per pianta possa favorire una maturazione più uniforme, riducendo la variabilità tra gli acini in termini di zuccheri.

Oltre agli aspetti climatici, la gestione agronomica, come la potatura a cordone speronato e il conseguente controllo del carico produttivo, ha probabilmente contribuito alla ridotta variabilità intra-grappolo osservata. Un equilibrio vegeto-produttivo adeguato potrebbe aver minimizzato le differenze tra gli acini, favorendo una maturazione più sincronizzata.

Questi risultati offrono indicazioni rilevanti nell'ottica delle strategie di campionamento per acino. In condizioni di forte stress climatico o in annate caratterizzate da una bassa resa per pianta, la ridotta variabilità intra-grappolo suggerisce che il campionamento possa essere condotto con criteri meno selettivi, data l'omogeneità compositiva degli acini. Al contrario, in annate caratterizzate da una maturazione più graduale e da una resa più elevata, potrebbe rendersi necessario un approccio più mirato per cogliere le differenze

intra-grappolo e ottimizzare la qualità della vendemmia.

Piuttosto che essere un elemento statico, la variabilità intra-grappolo si configura come un fenomeno dinamico, influenzato dall'interazione tra fattori climatici e pratiche agronomiche. Comprendere i meccanismi che regolano tale variabilità risulta essenziale per affinare le strategie di gestione del vigneto e ottimizzare i protocolli di campionamento, con l'obiettivo di garantire una produzione vitivinicola di alta qualità, coerente con gli obiettivi enologici e adattata alle specifiche condizioni di ciascuna annata.

4.6 Riferimenti Bibliografici

- Ashenfelter, O., and Storchmann, K. (2016). Climate Change and Wine: A Review of the Economic Implications. *J. Wine Econ. Economics* 11, 105–138. doi: 10.1017/jwe.2016.5
- Barbagallo, M. G., Guidoni, S., & Hunter, J. J. (2010). Dimensioni degli acini e caratteristiche qualitative della cv Shiraz. *Italus Hortus* 17, 512-519.
- Daviet, B., Fournier, C., Cabrera-Bosquet, L., Simonneau, T., Cafier, M., and Romieu, C. (2023). Ripening dynamics revisited: an automated method to track the development of asynchronous berries on time-lapse images. *Plant Methods* 19, 146. doi: 10.1186/s13007-023-01125-8
- Dokoozlian, N. K., and Kliewer, W. M. (1996). Influence of Light on Grape Berry Growth and Composition Varies during Fruit Development. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 121, 869–874. doi: 10.21273/JASHS.121.5.869
- Drappier, J., Thibon, C., Rabot, A., and Geny-Denis, L. (2019). Relationship between wine composition and temperature: Impact on Bordeaux wine typicity in the context of global warming—Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59, 14–30. doi: 10.1080/10408398.2017.1355776
- Guidoni, S., Allara, P., & Schubert, A. (2002). Effect of cluster thinning on berry skin anthocyanin composition of *Vitis vinifera* cv. Nebbiolo. *Am. J. Enol. Vitic.*, 53(3), 224-226.
- Jones, G. V., and Alves, F. (2012). Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal. *IJGW* 4, 383. doi: 10.1504/IJGW.2012.049448
- Jones, G. V., and Webb, L. B. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *J. Wine Res.* 21, 103–106. doi: 10.1080/09571264.2010.530091

- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., and Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Clim. Change* 73, 319–343. doi: 10.1007/s10584-005-4704-2
- Leeuwen, C. van, and Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *J. Wine Econ.* 11, 150–167. doi: 10.1017/jwe.2015.21
- Mabrouk, H., and Sinoquet, H. (1998). Indices of light microclimate and canopy structure of grapevines determined by 3D digitising and image analysis, and their relationship to grape quality. *Aust. J. Grape Wine Res.* 4, 2–13. doi: 10.1111/j.1755-0238.1998.tb00129.x
- May, P.(1987). The grapevine as a perennial, plastic and productive plant. Proceedings Sixth Australian Wine Industry Conference, Adelaide, Australia (Viticulural Publishing: Adelaide) pp. 40–49.
- Noguerol-Pato, R., González-Barreiro, C., Simal-Gándara, J., Martínez, M. C., Santiago, J. L., and Cancho-Grande, B. (2012). Active odorants in Mouratón grapes from shoulders and tips into the bunch. *Food Chem.* 133, 1362–1372. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.01.113
- Nuzzo, V., & Matthews, M. A. (2006). Response of fruit growth and ripening to crop level in dry-farmed Cabernet Sauvignon on four rootstocks. *Am. J. Enol. Vitic.* 57(3), 314-324.
- Ollat, N., & Gaudillere, J. P. (1998). The effect of limiting leaf area during stage I of berry growth on development and composition of berries of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. *Am. J. Enol. Vitic.* 49(3), 251-258.
- Pagay, V., & Cheng, L. (2010). Variability in berry maturation of Concord and Cabernet franc in a cool climate. *Am. J. Enol. Vitic.* 61(1), 61-67.
- Pisciotta, A., Di Lorenzo, R., Barbagallo, M. G., and Hunter, J. J. (2013). Berry Characterisation of cv Shiraz According to Position on the Rachis. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 34. doi: 10.21548/34-1-1085

- Pratt, C. (1971). Reproductive anatomy in cultivated grapes-a review. *Am. J. Enol. Vitic.* 22(2), 92-109.
- Price, S. F., Breen, P. J., Valladao, M., & Watson, B. T. (1995). Cluster sun exposure and quercetin in Pinot noir grapes and wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 46(2), 187-194.
- Reshef, N., Fait, A., and Agam, N. (2019). Grape berry position affects the diurnal dynamics of its metabolic profile. *Plant Cell Environ.* 42, 1897–1912. doi: 10.1111/pce.13522
- Roby, G., Harbertson, J. F., Adams, D. A., and Matthews, M. A. (2004). Berry size and vine water deficits as factors in winegrape composition: Anthocyanins and tannins. *Aust. J. Grape Wine Res.* 10, 100–107. doi: 10.1111/j.1755-0238.2004.tb00012.x
- Roby, G., and Matthews, M. A. (2004). Relative proportions of seed, skin and flesh, in ripe berries from Cabernet Sauvignon grapevines grown in a vineyard either well irrigated or under water deficit. *Aust. J. Grape Wine Res.* 10, 74–82. doi: 10.1111/j.1755-0238.2004.tb00009.x
- Salazar Parra, C., Aguirreolea, J., Sánchez-Díaz, M., Irigoyen, J. J., and Morales, F. (2010). Effects of climate change scenarios on Tempranillo grapevine (*Vitis vinifera* L.) ripening: response to a combination of elevated CO₂ and temperature, and moderate drought. *Plant Soil* 337, 179–191. doi: 10.1007/s11104-010-0514-z
- Tang, J., Petrie, P. R., and Whitty, M. (2019). Modelling relationships between visible winegrape berries and bunch maturity: Visible versus bunch maturity. *Aust. J. Grape Wine Res.* 25, 116–126. doi: 10.1111/ajgw.12374
- Tarter, M. E., & Keuter, S. E. (2005). Effect of rachis position on size and maturity of Cabernet Sauvignon berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 56(1), 86-89.

Wolpert, J. A., & Howell, G. S. (1984). Sampling Vidal Blanc grapes. II. Sampling for precise estimates of soluble solids and titratable acidity of juice. *Am. J. Enol. Vitic.* 35(4), 242-246.

5 Modalità di campionamento

5.1 Introduzione

La scelta del momento della vendemmia è un momento cruciale, poiché si deve individuare lo stadio di maturazione più idoneo agli obiettivi enologici pre-fissati. Ciò richiede la capacità di monitorare con precisione i cambiamenti fisiologici che accompagnano la maturazione dell'uva. Per ottenere previsioni affidabili della qualità dell'uva e quindi dei mosti, è fondamentale adottare schemi di campionamento non casuali, in grado di cogliere l'intera variabilità presente nel vigneto e restituire una rappresentazione più accurata.

La maggior parte della letteratura esistente, per lo più antecedente all'introduzione delle moderne tecnologie per l'analisi della variabilità spaziale, si è concentrata sul confronto tra strategie di campionamento a livello di pianta, grappolo e acino. Tuttavia, questi studi non hanno potuto beneficiare delle attuali conoscenze sul comportamento spaziale del vigneto e spesso non forniscono indicazioni operative esaustive per un campionamento efficace.

Già alla fine degli anni cinquanta, Amerine e Roessler (1958a), in uno studio condotto in California, hanno confrontato le tre suddette modalità di campionamento. Sebbene abbiano osservato che il campionamento per acino tendeva a restituire valori zuccherini più elevati, non veniva indicato chiaramente quale metodo fosse più efficiente nella stima del grado zuccherino alla vendemmia. Tali informazioni sono state poi approfondite in un successivo lavoro (Amerine e Roessler, 1958b), dal quale emerge che, per contenere l'errore di stima entro 1 °Brix, è necessario prelevare campioni costituiti da 200 acini, 40 grappoli o 11 viti intere ogni 1000 piante. In un'ulteriore indagine (Roessler e Amerine, 1962), gli autori hanno nuovamente confrontato i tre metodi, utilizzando 100–200 acini e 10–20 grappoli prelevati da un numero imprecisato di viti, mentre per il campionamento a livello di pianta è stata effettuata la vendemmia completa di una singola vite. I risultati hanno evidenziato una maggiore variabilità nel campionamento per pianta rispetto agli altri due metodi (più simili in termini di precisione). Il campionamento per acino è risultato più semplice e rapido da eseguire rispetto alla raccolta di grappoli interi o di una pianta intera. Va tuttavia considerato che tale semplicità operativa potrebbe essere legata alla ridotta superficie (circa 0,13 ettari) su cui è stata realizzata la prova. In condizioni operative diverse, su

superfici più estese, gli stessi autori raccomandano di aumentare a 300 il numero di acini campionati, distribuendoli in modo uniforme. Tuttavia, non vengono fornite indicazioni specifiche sul numero di piante da includere, né sulla distribuzione spaziale dei prelievi, aspetti che potrebbero compromettere la rappresentatività dei risultati. I risultati su esposti sono coerenti con quanto osservato da Rankine et al. (1962), i quali hanno evidenziato che la variabilità compositiva tra le piante è maggiore rispetto a quella tra i grappoli di una stessa pianta. Sulla base di tale evidenza, il campionamento considerato più efficiente per rappresentare un appezzamento è quello che prevede un prelievo minimo per ogni pianta, come un singolo grappolo nel caso del campionamento a grappolo. Il campionamento a livello di singolo acino ha inoltre fornito stime comparabili del contenuto zuccherino medio ed è stato ritenuto particolarmente utile per valutazioni rapide della maturità in campo, grazie alla limitata quantità di frutti necessaria per il prelievo. Tuttavia, i risultati ottenuti con questo metodo non trovano conferma nello studio di Lolonis (1962), il quale ha osservato una tendenza alla sovrastima della maturità complessiva del vigneto. Ciò sarebbe attribuibile alla selezione preferenziale degli acini più accessibili, spesso più grandi e maturi della media. Questa osservazione è confermata anche da Kasimatis e Vilas (1985), che hanno indagato l'affidabilità del campionamento per acino e per grappolo, definendo le dimensioni ottimali del campione per la misurazione degli zuccheri. Uno degli aspetti più interessanti riguarda la relazione tra la dimensione del campione e la riduzione della varianza: gli autori mostrano che l'aumento del numero di acini comporta una riduzione significativa della varianza fino a un limite oltre il quale i benefici si stabilizzano. Inoltre, evidenziano che, a parità di numero di acini, l'errore tende ad aumentare se il prelievo è distribuito su un numero maggiore di piante, a causa della loro maggiore eterogeneità. Questo risultato mette in luce l'impatto della variabilità tra piante sulla stima complessiva e sottolinea l'importanza di bilanciare la dimensione del campione con un disegno sperimentale coerente. Indicazioni di segno opposto emergono dallo studio di Di Lorenzo et al. (2007), che propongono un confronto diretto tra campionamento per porzioni di grappolo, grappoli interi e piante intere. In questo caso, gli autori evidenziano che la distribuzione del campione su un numero maggiore di piante, se ben pianificata, permette di ridurre in modo più efficace l'errore, specialmente per parametri soggetti a forte variabilità spaziale come gli antociani e i flavonoidi. Lo studio fornisce anche

indicazioni pratiche sulle soglie minime di campionamento in funzione del parametro analizzato, mettendo in evidenza come l'accuratezza dipenda non solo dal numero di unità raccolte, ma anche dalla capacità del campione di rappresentare la variabilità presente nel vigneto. Ulteriori evidenze sono fornite dallo studio di Peynaud et al. (1970), i quali hanno dimostrato che un campione composto da 100 acini selezionati casualmente, uno per pianta, non è sufficiente a rappresentare in modo adeguato la variabilità di un intero vigneto. Gli autori hanno osservato che, alla vendemmia, il 20% degli acini presentava un contenuto zuccherino inferiore del 33% rispetto alla media del campione. Questa marcata disomogeneità ha comportato una sottostima del valore medio di circa il 10%, sottolineando l'insufficienza di tale campione per stimare accuratamente la maturità complessiva. Tali risultati mettono in discussione quanto sostenuto da altri studi, secondo cui 100 acini sarebbero sufficienti per rappresentare il grado di maturazione del vigneto, e suggeriscono invece la necessità di definire con maggiore rigore la dimensione del campione per garantirne la rappresentatività. Hagiwara et al. (1987) hanno confrontato diversi metodi di campionamento per stimare il contenuto medio di zuccheri nel vigneto. Tra questi: il campionamento per acini (200 acini distribuiti casualmente, oppure 30 acini da 30 piante, una per pianta), il campionamento per grappolo (grappoli interi raccolti casualmente, senza specifiche indicazioni sulla selezione o distribuzione spaziale delle piante), e il campionamento per pianta (vendemmia completa di tre piante selezionate a caso). La precisione dei metodi è stata valutata in base alla deviazione standard del contenuto zuccherino medio. Il campionamento di 30 acini da 30 piante è risultato il più preciso, grazie alla maggiore distribuzione spaziale e alla minore variabilità interna. Tuttavia, questo metodo presenta un limite importante: non è stato effettuato un confronto diretto con il valore medio reale del vigneto, rendendo incerta la sua effettiva rappresentatività. Il concetto di precisione utilizzato si basa esclusivamente sulla variabilità interna del campione, senza tenere conto di eventuali errori sistematici, come sovrastime o sottostime rispetto alla media reale. Questa riflessione sulla variabilità interna solleva una questione più ampia: *qual è la relazione tra variabilità e qualità delle uve?* Sebbene il concetto di qualità sia strettamente legato agli obiettivi enologici, è interessante considerare come il grado di uniformità del raccolto, spesso espresso attraverso i valori di Solidi Solubili Totali, possa influenzare le caratteristiche finali del vino. La relazione tra

variabilità e qualità non è univoca. Una minore variabilità sembrerebbe comunemente associata a una maggiore coerenza nelle caratteristiche dei frutti, favorendo lo sviluppo di qualità desiderabili e contribuendo alla produzione di vini di maggiore valore (Travanic-Fuentes et al., 2024). Tuttavia, in alcuni contesti, la variabilità delle uve non ha impedito il raggiungimento di elevati livelli zuccherini per acino, suggerendo che una certa eterogeneità non si traduce necessariamente in una qualità inferiore (Calderon-Orellana et al., 2014). La variabilità rappresenta un elemento cruciale, ma al tempo stesso complesso, nella determinazione della qualità del prodotto finale. In particolare, la variabilità spaziale del vigneto incide sia sulla composizione degli acini sia sulla possibilità di ottenere campioni rappresentativi dello stato reale di maturazione. L'eterogeneità nella maturazione può infatti generare campioni contenenti acini sovra- o sotto-maturi, diluendo le caratteristiche dei frutti completamente maturi. Ciò limita il potenziale enologico, riducendo la possibilità di ottenere vini di alta qualità, e compromette la rappresentatività del campione. Già alla fine degli anni trenta, alcuni statistici avevano intuito che nei vigneti commerciali esisteva una variabilità spaziale non rilevabile tramite protocolli casuali (Student, 1938). Tuttavia, solo con lo sviluppo dell'agricoltura di precisione e l'introduzione di strumenti adeguati è stato possibile quantificare tale variabilità e sfruttarla anche in funzione del campionamento. Negli ultimi due decenni, la viticoltura di precisione ha compiuto importanti progressi nella caratterizzazione e gestione della variabilità spaziale. Tecnologie come l'indice di vegetazione normalizzato (NDVI) hanno consentito la produzione di mappe ad alta risoluzione, utili per ottimizzare le pratiche agronomiche e analizzare la qualità dell'uva (Tisseyre, 2008; Trought e Bramley, 2011). Questa variabilità è spesso associata a fattori stabili nel tempo, come le caratteristiche pedologiche del suolo, che influenzano vigore, resa e composizione dell'uva (Ferrer et al., 2020). Di conseguenza, è possibile suddividere il vigneto in zone con differenti livelli di vigore, ciascuna potenzialmente associata a una diversa qualità delle uve. Per rappresentare in modo adeguato tale diversità, il campionamento deve essere allineato alla variabilità spaziale del vigneto. In questa direzione si colloca lo studio di Arnò et al. (2012), che ha indagato come resa e qualità delle uve varino tra le diverse zone del vigneto, utilizzando un approccio georeferenziato con punti di campionamento distribuiti su griglie regolari. Mediante tecniche statistiche avanzate, quali regressione logistica e analisi delle componenti

principali, è stato possibile evidenziare l'influenza di fattori pedologici (come tessitura e profondità del suolo) e nutrizionali sulla variabilità osservata in termini di resa e qualità. Sebbene lo studio abbia fornito una base per la costruzione di mappe di zonazione, non ha definito un protocollo operativo dettagliato in merito al numero di grappoli o acini da campionare. Tuttavia, rappresenta un esempio concreto di come le tecnologie di precisione possano essere impiegate per comprendere e gestire la complessità del vigneto, offrendo spunti per la futura standardizzazione del campionamento. In tal senso, altri studi hanno dimostrato la possibilità di realizzare mappe di zonazione della qualità, utili per identificare aree omogenee all'interno del vigneto (Tagarakis et al., 2014; Gatti et al., 2017; Gatti et al., 2022). Tali mappe possono essere adottate dai viticoltori per ottimizzare strategie come la raccolta selettiva o la gestione differenziata.

Contestualmente allo studio della variabilità spaziale del vigneto, studi come quello di Meyers et al. (2011) hanno evidenziato come le potenzialità offerte dall'agricoltura di precisione permettano di ridurre le dimensioni del campione fino al 60% rispetto al campionamento casuale. Lo studio ha adattato un modello di ottimizzazione spaziale alle immagini NDVI di blocchi completi, dimostrando che è possibile migliorare l'efficienza del campionamento mantenendo un'elevata rappresentatività, a condizione di disporre di una strumentazione adeguata all'applicazione nei vigneti commerciali. Un ulteriore avanzamento in questo ambito è rappresentato dal lavoro di Meyers et al. (2020), che propone un'ottimizzazione del campionamento basata su immagini NDVI acquisite nel mese di agosto. Il vigneto è stato suddiviso in una griglia di pixel, ciascuno di 900 m² (30 × 30 m), con un valore NDVI associato a ogni pixel, indicativo del vigore vegetativo locale. Lo studio ha confrontato tre modalità di campionamento, tutte con lo stesso numero di grappoli raccolti per blocco (20 grappoli), ma differenziate per criterio spaziale. Nel metodo di campionamento casuale (R20), vengono selezionati casualmente 20 pixel all'interno del blocco, ciascuno esplorando 900 m², per una superficie totale campionata di 1,8 ettari. Nel metodo "maturità commerciale" (CM8), il blocco è suddiviso in 4 quadranti, con grappoli raccolti da 2 pixel consecutivi in ciascuna posizione; in questo caso, la superficie esplorata è 0,72 ettari (8 pixel × 900 m²). Infine, il metodo basato sulla variabilità NDVI (NDVI3) identifica 3 pixel consecutivi rappresentativi dei tre livelli

principali di vigore (basso, medio e alto) all'interno del blocco. Lo studio non specifica come siano stati distribuiti i 20 grappoli lungo i 90 metri di fila che attraversano questi pixel, ma si presume che siano stati raccolti uniformemente lungo questa distanza. Il risultato principale è che il metodo NDVI3, pur coprendo una superficie inferiore, garantisce una rappresentatività superiore rispetto agli altri due metodi. Il vantaggio deriva dall'associazione diretta tra campionamento e variabilità vegetativa, che consente di esplorare l'intero spettro delle condizioni presenti nel vigneto. Al contrario, i metodi R20 e CM8 non tengono conto in modo esplicito della distribuzione del vigore, e pertanto forniscono una rappresentazione meno efficace della complessità spaziale del vigneto. Tuttavia, emergono alcuni aspetti che meritano ulteriori approfondimenti. Ad esempio, non viene analizzato l'effetto della variazione della dimensione del campione sul grado di rappresentatività. Inoltre, il metodo NDVI3 non adotta un approccio ponderato, trattando i tre livelli di vigore come equivalenti, indipendentemente dalla loro estensione nel vigneto. Un possibile miglioramento metodologico consisterebbe nell'assegnare un numero di campioni proporzionale alla superficie occupata da ciascun livello di vigore. Ad esempio, in un vigneto in cui l'alto vigore copre il 50% della superficie, la metà dei campioni dovrebbe provenire da quell'area. Un altro aspetto cruciale riguarda il momento dell'acquisizione dei dati NDVI per definire i livelli di vigore. Sebbene l'invasatura sia tradizionalmente considerata il momento ideale, poiché segna il completamento dello sviluppo vegetativo e l'inizio della maturazione (Bramley et al., 2005; Acevedo-Opazo et al., 2008), l'uso di dati raccolti in fasi fenologiche precedenti, come l'allegagione completa o lo stadio "grano di pepe", potrebbe consentire una pianificazione più tempestiva, migliorando l'efficienza operativa. Questo approccio anticipato permetterebbe di definire con maggiore anticipo la distribuzione dei livelli di vigore, ottimizzando così la logistica delle operazioni successive.

Lo scopo del presente lavoro propone di analizzare, in un contesto operativo specifico, il comportamento dei tre principali metodi di campionamento, a livello di pianta, grappolo e acino, per verificare in che misura ciascuno di essi riesca a rappresentare le caratteristiche compositive dell'uva in prossimità della vendemmia.

A partire dai dati raccolti, si intende inoltre esplorare quale possa essere, per ciascun metodo, una soglia minima di campionamento che consenta di ottenere stime sufficientemente attendibili, ripetibili e trasferibile, tenendo conto della dimensione del vigneto e delle condizioni operative in cui si inserisce la raccolta (sperimentale e/o commerciale). Pur nella consapevolezza dei limiti legati alla scala del vigneto e alla numerosità dei campioni, l'analisi intende offrire spunti utili per affinare le scelte di campionamento in contesti reali, contribuendo alla definizione di approcci più mirati e consapevoli.

5.2 Materiali e Metodi

5.2.1 Campionamento alla Vendemmia e Analisi di Laboratorio

In ciascuna delle tre annate considerate (2022, 2023 e 2024), i grappoli delle 36 piante campione sono stati raccolti integralmente alla data della vendemmia commerciale, stabilita secondo le indicazioni operative della cantina ospitante. Tutti i grappoli erano stati etichettati prima della fioritura (BBCH 57), con indicazione del numero della pianta (da 1 a 12) e del relativo livello di vigore (AV, MV, BV), al fine di garantirne la completa tracciabilità fino al momento dell'analisi.

Durante la raccolta, sono stati esclusi i grappoli provenienti da germogli secondari, laterali o sviluppatisi da gemme latenti. L'operazione è stata condotta in concomitanza con la vendemmia dell'intero vigneto, per assicurare che i campioni riflettessero lo stato reale di maturazione al momento della raccolta aziendale.

I grappoli raccolti sono stati immediatamente trasferiti in laboratorio, dove sono stati sottoposti ad analisi secondo un protocollo standardizzato, volto a minimizzare gli errori metodologici. Ogni grappolo è stato pesato singolarmente e la sua lunghezza è stata misurata dalla base del rachide fino all'apice. Tale misurazione ha permesso di suddividerlo in tre porzioni distinte: apicale, mediana e basale. Da ciascuna porzione sono stati prelevati casualmente due acini, per un totale di sei acini per grappolo, includendo anche acini dalle zone interne per rappresentare adeguatamente la variabilità morfologica e compositiva.

Ogni acino è stato pesato singolarmente e spremuto per ottenere tra 0,5 e 1 ml di mosto, in funzione della dimensione. Il mosto è stato analizzato con rifrattometro digitale (modello HI96811, Hanna Instruments, Padova, Italia) per determinarne il contenuto di solidi solubili totali (SST) espressi in °Brix. In seguito, ciascun grappolo è stato spremuto interamente per misurare il contenuto zuccherino medio a livello di grappolo. Infine, il mosto di tutti i grappoli appartenenti alla stessa pianta è stato unito in un'unica soluzione, da cui è stato calcolato il contenuto medio di SST a livello di pianta.

Questa metodologia ha permesso di ottenere dati completi e strutturati su tre livelli: pianta, grappolo e acino. I dati raccolti rappresentano la base per le simulazioni a posteriori, in cui sono stati rielaborati secondo diverse configurazioni, al fine di confrontare e valutare l'efficacia delle principali strategie di campionamento. Il valore medio di riferimento dell'intero vigneto è stato calcolato separatamente, come media aritmetica dei gradi zuccherini rilevati sull'uva raccolta meccanicamente alla data prestabilita dall'azienda ed effettuata su una superficie complessiva di circa otto ettari.

5.2.2 Obiettivo delle Simulazioni

A partire dai dati sperimentali ottenuti sulle 36 piante campione, per ciascuna delle tre annate analizzate, sono state sviluppate simulazioni che riproducono numerose possibili combinazioni di campionamento. Le misurazioni originali, effettuate a livello di pianta, grappolo e acino, sono state utilizzate come base per costruire campioni simulati di diversa composizione. Le simulazioni sono state realizzate mediante il software MATLAB (versione R2024b, The MathWorks Inc., Natick, MA, USA), attraverso script sviluppati appositamente per questo scopo. Tali script hanno generato combinazioni diverse di unità campionarie e calcolato per ciascuna il valore medio di gradi °Brix, consentendo un confronto sistematico tra le configurazioni ipotizzate e il valore di riferimento.

Per configurazione di campionamento si intende la composizione di ciascun campione simulato, espressa come numero di piante selezionate, e, nei metodi in cui previsto, numero di grappoli per pianta e di acini per grappolo. Ad esempio, nel campionamento per pianta, una configurazione “3” indica il prelievo dell'intera produzione di tre piante; nel campionamento per grappolo, “1x3” indica un grappolo per pianta da tre piante; nel campionamento per acino, “3x2x6” indica tre acini da due grappoli ciascuno, per sei piante complessive.

Ogni combinazione può essere interpretata come un ritorno virtuale in vigneto, in cui si ipotizza di ripetere il campionamento selezionando ogni volta piante, grappoli o acini diversi tra quelli del set di dati determinato. Questa logica ha permesso di valutare migliaia di scenari differenti per ogni configurazione. Il numero teorico di combinazioni possibili è

stato calcolato direttamente negli script, in funzione del numero di unità disponibili per ciascun livello di vigore e del numero richiesto per la configurazione, secondo la formula:

$$(n, k) = \frac{n!}{k! (n - k)!}$$

dove n rappresenta il numero totale di elementi disponibili (ad esempio le piante appartenenti a un determinato livello di vigore), e k il numero di elementi da selezionare. Il simbolo “!” indica il fattoriale, cioè il prodotto di tutti gli interi positivi fino a quel numero. La formula consente di calcolare in quanti modi distinti è possibile scegliere k elementi da un insieme di n elementi, senza ripetizioni e senza considerare l’ordine.

In presenza di un numero inferiore a 5000 combinazioni distinte, queste sono state tutte incluse nella simulazione. Quando invece le combinazioni possibili superavano questa soglia, lo script ne selezionava 5000 in modo casuale.

In ciascun caso, il confronto è stato effettuato rispetto al valore reale del vigneto, calcolato come media aritmetica dei gradi °Brix rilevati dalla vendemmiatrice durante la raccolta aziendale condotta sull’intera superficie, pari a circa otto ettari. Questo approccio ha permesso di confrontare in modo oggettivo l’accuratezza delle diverse strategie di campionamento, simulando con coerenza operativa le condizioni reali di un potenziale ritorno in campo.

Nel campionamento per pianta, sono state simulate configurazioni con 3, 6, 12, 18, 24 e 30 piante. In ogni combinazione, il valore medio di °Brix è stato calcolato utilizzando i dati medi precedentemente ottenuti per ciascuna pianta, sulla base del mosto complessivo dei grappoli raccolti. Nel campionamento per grappolo, le configurazioni variavano sia per numero di grappoli per pianta (1, 2 o 3), sia per numero complessivo di piante (3, 6, 12, 18, 24 o 30), con un massimo di 90 grappoli totali. Ad esempio, una configurazione “2x6” prevedeva il prelievo di due grappoli per ciascuna di sei piante. La selezione dei grappoli all’interno di ciascuna pianta avveniva in modo del tutto casuale tra quelli disponibili, senza criteri preordinati, in quanto, come emerso dalle analisi condotte nel Capitolo 2,

nessuno dei fattori esplorati per descrivere la variabilità intra-pianta è risultato significativamente associato alle variazioni nei parametri compositivi. In questo caso, la media di °Brix era calcolata a partire dal valore di ciascun grappolo, ottenuto dalla spremitura integrale.

Infine, nel campionamento per acino, sono stati combinati diversi livelli di dettaglio, prevedendo 6 acini per grappolo, da 1, 2 o 3 grappoli per pianta, su 3, 6, 12, 18, 24 o 30 piante totali.

5.3 Risultati

5.3.1 Confronto tra i Metodi di Campionamento

5.3.1.1 *Pianta*

La scelta di simulare campioni distribuiti nei tre livelli di vigore trova fondamento nei risultati emersi nel Capitolo 1, dove è stata chiaramente evidenziata un'elevata variabilità intra-parcellare. Tale variabilità, ben distinguibile tra le zone a diverso vigore, giustifica l'adozione di un campionamento stratificato, che preveda l'inclusione di piante appartenenti a ciascun livello di vigore per garantire maggiore rappresentatività. Tuttavia, una volta accertata la necessità di distribuire i campioni tra le classi di vigore, diventa essenziale determinare quante piante siano effettivamente necessarie per ottenere stime attendibili. Per i risultati relativi all'annata 2022, emerge con chiarezza come la configurazione con sole 3 piante campionate su otto ettari di vigneto, pur uniformemente suddivise tra alto, medio e basso vigore, non offra una garanzia sufficiente di rappresentatività. In tal senso, la figura 49 mostra, infatti, che questa configurazione è associata a una distribuzione ampia delle stime, con la comparsa, anche se in percentuali ridotte, di errori marcati. Nello 0.06% dei casi (1 simulazione su 1728), il campionamento ha portato a una sottostima di quasi 1.7 °Brix rispetto alla media reale del vigneto, restituendo un valore di 19.62 °Brix a fronte dei 21.28 misurati sulla produzione totale. In un altro caso isolato, la sovrastima ha raggiunto +1.27 °Brix, con un valore campionario di 22.55°. Oltre agli scostamenti estremi, i risultati relativi alla configurazione con 3 piante mostrano come anche le fasce di errore intermedio siano ben rappresentate, confermando la forte instabilità di questa soluzione. Nonostante la maggior parte delle simulazioni si distribuisca entro un errore compreso tra -0.50 e +0.50 °Brix, si osserva una presenza non trascurabile di campioni associati a scostamenti superiori a ± 1.00 °Brix. In particolare, sovrastime tra +1.00 e +1.25 °Brix si verificano in quasi il 3% dei casi, mentre sottostime tra -1.00 e -0.75 °Brix si attestano poco sotto il 4%. Questi valori, pur non elevatissimi in termini percentuali, evidenziano la possibilità concreta di ottenere stime notevolmente distorte anche quando la strategia di campionamento rispetta una distribuzione bilanciata tra i livelli di vigore. In altre parole, se la ripartizione del campione appare teoricamente

adeguata, è la dimensione troppo contenuta del campione a compromettere la precisione della stima. Questa instabilità si riflette anche nei risultati più prossimi alla media reale. La classe di errore compresa tra 0 e $+0.25$ °Brix, pur rappresentando la fascia con la frequenza più alta, raccoglie solo il 19% delle simulazioni, a cui si aggiunge un ulteriore 18% nella fascia immediatamente superiore ($+0.25$ / $+0.50$). L'ampio ventaglio di situazioni osservato nella configurazione 3 piante subisce una netta contrazione al crescere del numero di piante campionate. Tale riduzione della variabilità diventa più evidente nella configurazione con 18 piante, per la quale non si registrano più, nemmeno in percentuali marginali, errori estremi come quelli descritti in precedenza. Al contrario, l'errore si concentra in fasce molto più contenute, perlopiù comprese tra -0.50 e $+0.50$ °Brix. In particolare, oltre il 55% delle simulazioni condotte con 18 piante ha restituito stime con un errore inferiore a ± 0.25 °Brix rispetto al valore medio complessivo del vigneto. La media dei valori stimati all'interno di questa fascia di errore minimo si attesta intorno a 21.40 °Brix, con uno scarto contenuto di 0.12 rispetto al valore medio complessivo del vigneto nel 2022. Le due configurazioni successive, con 24 e 30 piante, confermano e rafforzano ulteriormente il trend di miglioramento osservato con l'aumento della numerosità campionaria. Con 24 piante, il $\sim 69\%$ delle simulazioni ha prodotto stime comprese nella fascia di errore più contenuta, ovvero tra 0.00 e $+0.25$ °Brix, mentre solo una minima parte ha superato la soglia di ± 0.50 °Brix. La media complessiva delle simulazioni per questa configurazione si attesta a 21.31 °Brix, con uno scarto di soli 0.03 °Brix rispetto alla media reale del vigneto (21.28 °Brix), indicando un'elevata attendibilità delle stime. Nella configurazione massima con 30 piante, la precisione raggiunge livelli ancora più elevati: l'86% delle simulazioni ricade tra 0.00 e $+0.25$ °Brix e circa il 13% presente nella classe $-0.25/0.00$, mentre le restanti si distribuiscono quasi esclusivamente nella fascia compresa tra $+0.25$ e $+0.50$ °Brix. Non si osservano casi di errore superiore a ± 0.50 °Brix. La media generale delle simulazioni è pari a 21.35 °Brix, con una differenza di appena 0.07 °Brix rispetto al valore reale. Questo risultato evidenzia chiaramente come l'incremento del numero di piante selezionate porti a una drastica riduzione della variabilità nelle stime e a una maggiore concentrazione attorno alla media attesa, riducendo in modo significativo il rischio di errore sistematico. Tali risultati consentono di affermare che la configurazione con 30 piante può essere considerata la più efficiente tra quelle

testate nel 2022. Essa garantisce il più alto grado di precisione, con quasi il 100% delle simulazioni comprese nella fascia di errore ± 0.25 °Brix e la completa assenza di stime superiori a ± 0.50 °Brix. La media delle simulazioni, pari a 21.35 °Brix, presenta uno scarto minimo rispetto al valore reale del vigneto (21.28 °Brix), pari a soli 0.07 °Brix.

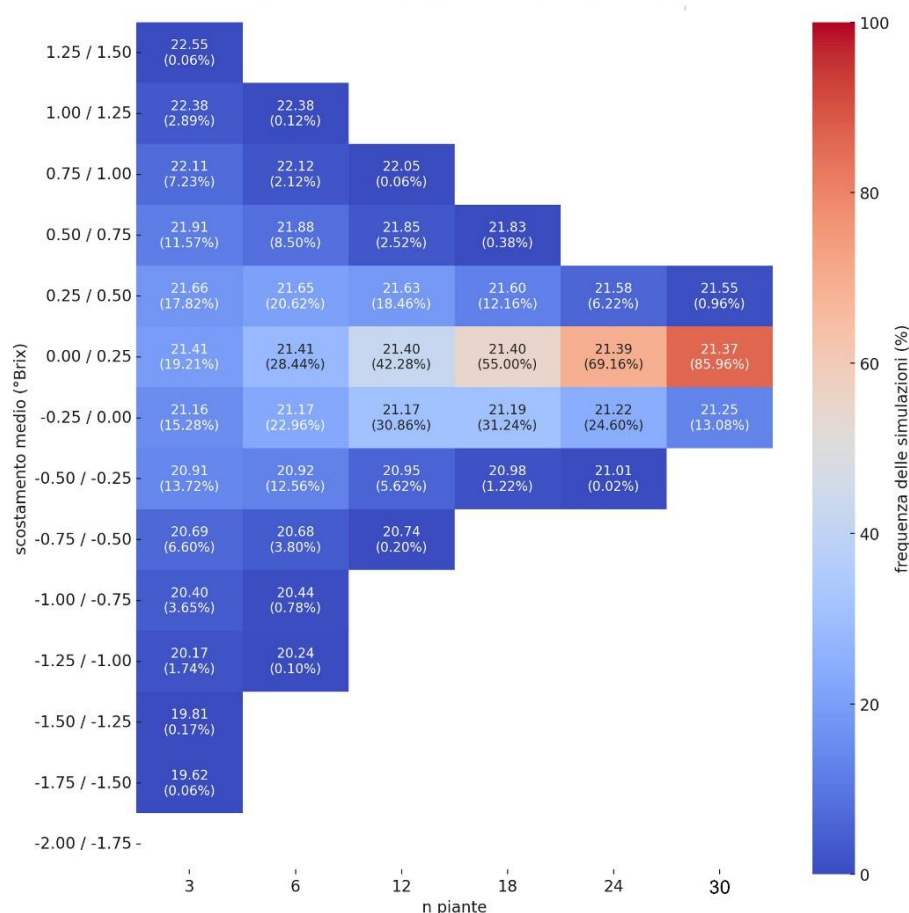


Figura 49. Risultati delle simulazioni di campionamento per pianta nei tre livelli di vigore, anno **2022**. Ogni colonna rappresenta una configurazione distinta, identificata dal numero totale di piante selezionate (da 3 a 30). Le righe indicano le classi di errore, definite come intervalli di scostamento tra la media del campione e il valore medio complessivo del vigneto (21.28 °Brix), espresse in intervalli di 0.25 °Brix. All'interno di ciascuna cella sono riportati due valori: la percentuale di simulazioni che ricadono in quella specifica configurazione e classe di errore, e il valore medio di contenuto zuccherino (°Brix) calcolato sulle sole simulazioni appartenenti a quella classe.

Nel 2023, con un valore medio complessivo del vigneto pari a 19.25 °Brix, l'analisi delle simulazioni condotte mostra che, al crescere del numero di piante campionate, la distribuzione degli errori tende a concentrarsi progressivamente in classi più ristrette, riducendo la variabilità delle stime (Fig. 50). Con la configurazione minima di 3 piante, si osserva una forte dispersione, con errori che spaziano da sottostime superiori a -0.75 °Brix fino a sovrastime oltre i +2.00 °Brix. Questo ampio intervallo evidenzia l'elevata instabilità del campione, compromettendo l'affidabilità della stima. Già a partire da 12 piante si osserva un primo miglioramento nella concentrazione dell'errore, ma è a partire dalle 18 piante che si ottiene una riduzione più consistente della variabilità. In questo caso, il 71.45% delle simulazioni si concentra nella classe di errore compresa tra +0.50 e +1.00 °Brix, con un valore medio di 19.84 °Brix. Tuttavia, le due configurazioni successive, con 24 e 30 piante, offrono prestazioni ancora più stabili. Con 24 piante, il 75.64% delle simulazioni si colloca nella medesima fascia di errore, e con 30 piante la percentuale raggiunge il 79.91%. Inoltre, entrambe le configurazioni mostrano una drastica riduzione della dispersione residua nelle fasce adiacenti, con meno del 14% di simulazioni collocate fuori dall'intervallo +0.50 / +1.00 °Brix. Il valore medio associato alla classe prevalente è pari a 19.86 °Brix con 24 piante e 19.88 °Brix con 30 piante, evidenziando un'elevata stabilità e una vicinanza al valore reale. Questo indica che, nel contesto specifico del 2023, l'incremento della numerosità campionaria oltre le 18 piante contribuisce in modo significativo a migliorare la ripetibilità della stima, pur senza alterare in modo sostanziale lo scostamento medio. Nel complesso, le configurazioni con 24 e 30 piante si dimostrano le più affidabili, garantendo un'elevata concentrazione della sovrastima in una fascia ristretta (+0.50 / +1.00 °Brix) e una notevole coerenza tra le simulazioni. Tra queste, la configurazione con 30 piante rappresenta la soluzione più precisa, con il 59.22% delle simulazioni che ricadono nella classe prevalente e una dispersione minima. Tale configurazione consente di ottenere stime altamente stabili e ripetibili, risultando particolarmente adatta per applicazioni in vigneti a bassa variabilità compositiva, dove la riduzione degli errori sistematici è un obiettivo prioritario.

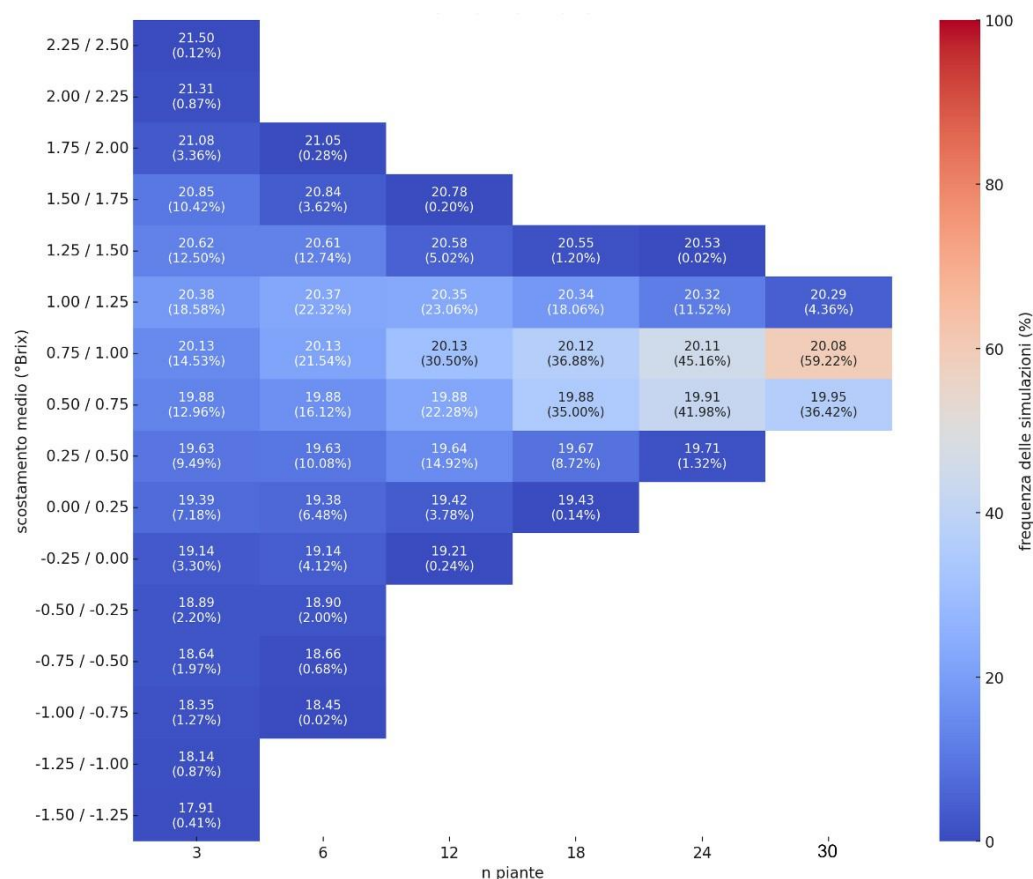


Figura 50. Risultati delle simulazioni di campionamento per pianta nei tre livelli di vigore, anno 2023. Ogni colonna rappresenta una configurazione distinta, identificata dal numero totale di piante selezionate (da 3 a 30). Le righe indicano le classi di errore, definite come intervalli di scostamento tra la media del campione e il valore medio complessivo del vigneto (19.25 °Brix), espresse in intervalli di 0.25 °Brix. All'interno di ciascuna cella sono riportati due valori: la percentuale di simulazioni che ricadono in quella specifica configurazione e classe di errore, e il valore medio di contenuto zuccherino (°Brix) calcolato sulle sole simulazioni appartenenti a quella classe.

Nel caso del 2024, l'analisi delle simulazioni conferma nuovamente quanto la dimensione del campione influenzi la precisione delle stime. La figura 51 mostra chiaramente che, quando il numero di piante è contenuto, si osserva una notevole dispersione degli errori, con la comparsa di sovrastime e sottostime anche molto marcate rispetto al valore medio complessivo del vigneto, pari a 22.35 °Brix.

Con 3 piante campionate, gli errori si distribuiscono su un ampio ventaglio di classi, che va da -2.75 a +1.50 °Brix, e più della metà delle simulazioni si colloca nelle fasce inferiori a -

1.25 °Brix, con valori medi di stima anche inferiori a 20.00 °Brix. Anche con 6 e 12 piante la situazione non cambia radicalmente: permane una consistente incidenza di sottostime, e le classi più rappresentative restano sempre quelle comprese tra -1.50 e -1.00 °Brix. In particolare, per 12 piante, il 45.74% delle simulazioni si concentra nella classe tra -1.25 e -1.00 °Brix, con una media di 21.22 °Brix.

L'incremento a 18 piante produce un effetto contenuto ma visibile: si assiste a una progressiva esclusione delle classi più estreme e a una maggiore concentrazione delle simulazioni tra -1.25 e -0.75 °Brix. In particolare, oltre il 25% delle simulazioni ricade nella classe di errore -1.50/-1.25 evidenziando una probabilità ancora elevata di incorrere in sottostime significative. A questa si aggiunge un ulteriore 40.10% nella fascia immediatamente superiore, tra -1.25 e -1.00 °Brix, portando il totale delle simulazioni con un errore superiore a 1 °Brix a oltre il 65%. A partire da 24 piante, la riduzione dell'errore si fa più evidente. La classe tra -1.25 e -1.00 °Brix raccoglie il 66.42% dei casi, con una media ancora ferma a 21.22 °Brix. Si evidenzia quindi una notevole stabilità del campione, pur in presenza di una stima sistematicamente inferiore al valore medio del vigneto.

La configurazione da 30 piante porta questa tendenza all'estremo: tutte le simulazioni (100%) rientrano nella classe -1.25 / -1.00 °Brix, restituendo un valore medio costante di 21.20 °Brix. Questo risultato, pur segnalando un'eccellente coerenza interna, mette in luce un limite importante: l'errore medio persiste, e la sottostima non viene corretta nemmeno con il massimo numero di piante disponibile.

Nel complesso, la configurazione con 24 piante sembra rappresentare il miglior compromesso tra ampiezza del campione e riduzione delle classi di errore. Tuttavia, l'intero andamento evidenzia che, per questa annata, il campionamento uniforme tende sistematicamente a sottovalutare il contenuto zuccherino medio, suggerendo la necessità di considerare anche altri fattori o approcci per migliorare l'accuratezza delle stime.

È interessante notare che, con l'aumento del numero di piante campionate, non si assiste a una progressiva concentrazione delle simulazioni attorno alle classi prossime allo zero, bensì a un raggruppamento stabile in una fascia di sottostima compresa tra -1.25 e -1.00 °Brix. A partire da 18 piante, e in maniera ancora più netta con 24 e 30, le simulazioni si

allineano in modo sempre più marcato su questa classe, che tuttavia si discosta sensibilmente dal valore medio complessivo del vigneto.

Questa dinamica suggerisce che la maggiore dimensione del campione riduce la variabilità ma non l'errore sistematico, il quale si consolida anziché attenuarsi. In questo contesto, è lecito interrogarsi se la configurazione da 30 piante, pur garantendo la massima coerenza interna, sia effettivamente la più efficace. Le configurazioni intermedie, come quella da 18 piante, pur mostrando ancora una certa dispersione nelle classi, includono una quota non trascurabile di simulazioni con errori più contenuti, ad esempio tra -1.00 e -0.75 °Brix (22.66%) e tra -0.75 e -0.50 °Brix (2.94%), con medie di 21.44 e 21.67 °Brix rispettivamente. Questi risultati, sebbene meno stabili, si avvicinano maggiormente al valore di riferimento e potrebbero rappresentare un miglior compromesso tra precisione, costo operativo e realismo applicativo.

Di conseguenza, la configurazione da 18 piante emerge come un'opzione da considerare attentamente: non solo riduce le classi di errore più estreme, ma mantiene una certa elasticità che consente di ottenere anche stime più vicine al valore atteso. In sintesi, non sempre il massimo numero di piante corrisponde alla soluzione più accurata, e il bilanciamento tra dimensione del campione e qualità della stima richiede un'attenta valutazione anche in funzione della natura sistematica degli errori osservati.

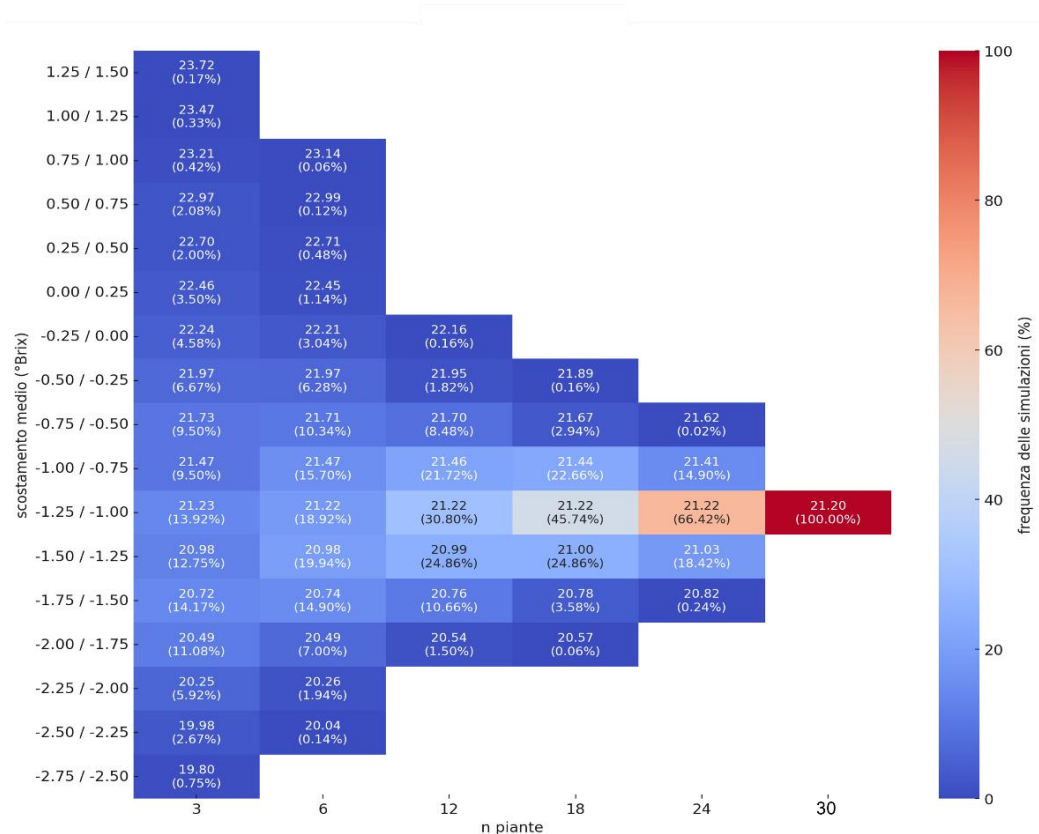


Figura 51. Risultati delle simulazioni di campionamento per pianta nei tre livelli di vigore, anno 2024. Ogni colonna rappresenta una configurazione distinta, identificata dal numero totale di piante selezionate (da 3 a 30). Le righe indicano le classi di errore, definite come intervalli di scostamento tra la media del campione e il valore medio complessivo del vigneto (22.35 °Brix), espresse in intervalli di 0.25 °Brix. All'interno di ciascuna cella sono riportati due valori: la percentuale di simulazioni che ricadono in quella specifica configurazione e classe di errore, e il valore medio di contenuto zuccherino (°Brix) calcolato sulle sole simulazioni appartenenti a quella classe.

Nel complesso, l'analisi delle tre annate mostra che l'aumento del numero di piante campionate riduce la variabilità delle stime, ma non sempre migliora la precisione rispetto al valore medio reale del vigneto. Nel 2022, la configurazione con 30 piante ha fornito i risultati migliori, con stime concentrate attorno alla media reale (21.28 °Brix) e assenza di errori estremi. Nel 2023, le configurazioni con 24 e 30 piante hanno garantito una maggiore stabilità, con una forte concentrazione delle simulazioni in una fascia ristretta (+0.50 / +1.00 °Brix), mentre la configurazione da 18 piante, pur meno ampia, ha mostrato maggiore variabilità. Nel 2024, invece, solo la configurazione da 30 piante ha assicurato

una coerenza interna elevata, con il 100% delle simulazioni concentrate in un'unica fascia di errore ($-1.25 / -1.00$ °Brix), pur mantenendo un errore sistematico non trascurabile.

5.3.1.2 *Grappolo*

Alla luce dei risultati emersi nelle simulazioni relative al campionamento per pianta, l'analisi dei dati per il campionamento a livello di grappolo è stata condotta escludendo dal confronto tutte le configurazioni con un numero di piante inferiore a 18. Tale scelta metodologica è stata adottata coerentemente con quanto osservato nella fase precedente, in cui un numero ridotto di piante aveva evidenziato una minore capacità di rappresentare la variabilità presente nell'impianto. In questo contesto, i risultati ottenuti per il campionamento a grappolo nel 2022, condotto secondo una distribuzione uniforme delle piante nei tre livelli di vigore, hanno mostrato stime complessivamente stabili, anche nelle configurazioni con un numero limitato di unità campionarie (Fig. 52). La configurazione minima, costituita da un solo grappolo per ciascuna di 18 piante (1×18), mostra una concentrazione dell'errore in un intervallo relativamente ristretto: oltre il 68% delle simulazioni si distribuisce tra le fasce di errore comprese tra -0.25 e $+0.50$ °Brix. In particolare, la classe di scostamento compresa tra 0.00 e $+0.25$ °Brix raccoglie da sola il 40.66% delle simulazioni, mentre le classi adiacenti, $-0.25/0.00$ e $+0.25/+0.50$, rappresentano rispettivamente il 27.50% e il 20.80%. Le stime estreme, sia in eccesso che in difetto, risultano fortemente contenute: la somma delle simulazioni che presentano errori superiori a ± 0.50 °Brix è inferiore all'8%, con una presenza marginale di sovrastime oltre $+0.75$ °Brix (0.12%) e di sottostime inferiori a -0.50 °Brix (7.1%).

All'aumentare del numero di grappoli campionati, incrementando il numero di piante, si osserva un miglioramento progressivo della stabilità interna, con una netta concentrazione delle simulazioni nelle classi di errore minore. La configurazione massima (3×30), che prevede 90 grappoli distribuiti su 30 piante, mostra infatti il 67.88% delle simulazioni nella fascia $0.00/+0.25$ °Brix e il restante 23.58% in quella immediatamente superiore ($+0.25/+0.50$), senza alcuna presenza di errori superiori a ± 0.50 °Brix. Tuttavia, se confrontato con quanto osservato per il campionamento a livello di pianta, il miglioramento ottenuto con l'incremento del numero di grappoli risulta meno marcato. Già

con configurazioni più contenute, come 1×24 o 2×18 (24 o 36 grappoli totali), la distribuzione degli errori tende a stabilizzarsi, con oltre il 48% delle simulazioni collocate nella fascia centrale ($0.00/+0.25$ °Brix) e una forte riduzione delle stime estreme.

Questa dinamica suggerisce che, nel campionamento per grappolo, l'accuratezza della stima non dipende tanto dalla numerosità assoluta dei grappoli, quanto piuttosto dall'adeguata distribuzione delle unità campionarie tra le piante. Tali risultati, dunque, indicano che aumentare il numero di grappoli per pianta contribuisce alla stabilità del campione, ma produce effetti più limitati rispetto a quanto osservato per il campionamento a livello di pianta, dove la numerosità era risultata un fattore cruciale per il contenimento della variabilità. In questo caso, la variabilità intrapianta appare meno incisiva e può essere mediata in modo efficace anche con un numero ridotto di grappoli, purché ben distribuiti tra le piante.

Inoltre, la presenza sistematica di una leggera sovrastima nelle simulazioni, con valori medi compresi tra 21.40 e 21.41 °Brix rispetto ai 21.28 °Brix del vigneto, indica un piccolo bias positivo costante, che potrebbe riflettere un effetto legato alla selezione casuale dei grappoli o alla composizione media dei grappoli campionati rispetto alla popolazione complessiva.

Nel complesso, i risultati del 2022 indicano che il campionamento per grappolo si conferma una soluzione efficace per stimare il contenuto zuccherino dell'uva con un buon livello di precisione, anche in condizioni operative estensive. In particolare, una configurazione composta da 54 grappoli prelevati da 27 piante (2 grappoli per pianta), distribuite uniformemente su un vigneto di 8 ettari, consente di ottenere stime stabili e contenute entro ± 0.25 °Brix nel 71.84% dei casi. Questo livello di accuratezza risulta particolarmente interessante dal punto di vista applicativo, in quanto rappresenta un buon compromesso tra copertura spaziale, costi operativi e affidabilità della stima.

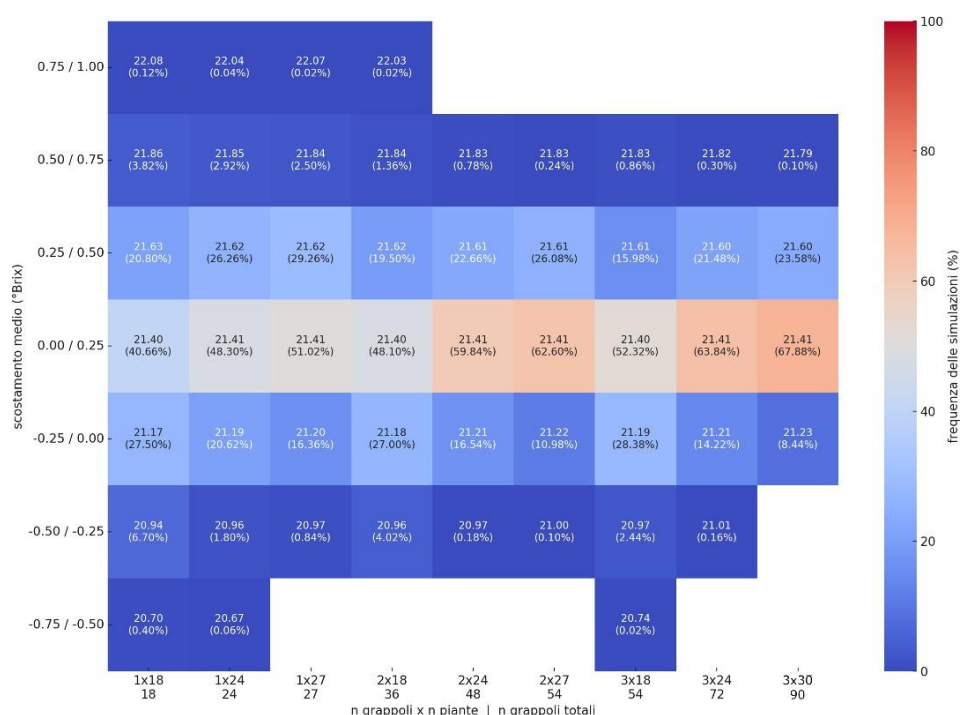


Figura 52. Distribuzione dell'errore di stima dei Solidi Solubili Totali (°Brix) per ciascuna configurazione di campionamento per grappolo nell'anno 2022. Le configurazioni sono indicate sull'asse X come numero di grappoli per pianta × numero di piante. Le classi riportate sull'asse Y rappresentano gli intervalli di scostamento tra il valore medio stimato e il valore medio complessivo del vigneto (22.35 °Brix), espresse in intervalli di 0.25 °Brix. Il colore di ciascuna cella indica la frequenza relativa delle simulazioni, secondo la scala cromatica laterale (da 0% a 100%). All'interno di ciascuna cella si riportano: la quota di simulazioni (%) che ricadono nella specifica combinazione di configurazione e classe di errore, in °Brix il contenuto zuccherino medio stimato, calcolato esclusivamente sulle simulazioni appartenenti a quella stessa combinazione.

Nel 2023, le simulazioni a livello di grappolo hanno evidenziato una distribuzione dell'errore sistematicamente spostata verso valori superiori al dato reale di riferimento (19.25 °Brix). In tutte le configurazioni analizzate, comprese quelle con un'elevata numerosità campionaria, le simulazioni si sono concentrate prevalentemente nelle classi di sovrastima più marcate (Fig. 53). Nella configurazione minima (1×18), il 37.78% delle simulazioni rientra nella fascia di errore compresa tra +0.75 e +1.00 °Brix, mentre solo l'1.36% si colloca nella fascia più prossima al valore reale (0.00/+0.25 °Brix). L'incremento del numero di grappoli campionati, ottenuto sia aumentando il numero di

piante sia il numero di grappoli per pianta, determina una progressiva riduzione della variabilità interna, con un'evidente concentrazione delle simulazioni nella fascia $+0.75/+1.00$ °Brix, che raggiunge il 69.42% nella configurazione massima (3×30). Il valore medio stimato all'interno di questa classe si mantiene stabile intorno a $20.10\text{--}20.12$ °Brix, suggerendo la presenza di una sovrastima sistematica pari a circa $+0.85$ °Brix. Tali risultati indicano che, nel contesto osservato, l'aumento della numerosità del campione non determina un miglioramento dell'accuratezza, ma piuttosto una maggiore ripetibilità dell'errore. Anche le configurazioni intermedie, come 2×27 (54 grappoli su 27 piante), mostrano una distribuzione dell'errore analoga a quella delle configurazioni più ampie, con il 56.16% delle simulazioni concentrate nella fascia $+0.75/+1.00$ °Brix e una quota marginale nelle classi prossime al valore reale. Di conseguenza, nessuna delle configurazioni testate nel 2023 consente di contenere in modo soddisfacente l'errore entro ± 0.25 °Brix, evidenziando una ridotta efficacia del campionamento per grappolo, eseguito secondo uno schema uniforme, nel restituire stime affidabili in condizioni di bassa variabilità compositiva.

Tuttavia, tra le opzioni analizzate, la configurazione 2×27 rappresenta il miglior compromesso tra precisione relativa e praticabilità. Pur non correggendo l'errore di sovrastima, essa consente di mantenere gli errori più marcati entro limiti accettabili: è infatti l'unica configurazione tra quelle più estese in cui la frequenza delle simulazioni con errore superiore a $+1.00$ °Brix si mantiene al di sotto dell'8%. A ciò si aggiunge una buona coerenza interna, con valori medi stabili intorno a 20.11 °Brix. Questi elementi ne fanno la configurazione più equilibrata nel contesto specifico dell'annata, in termini di affidabilità e contenimento delle deviazioni estreme.

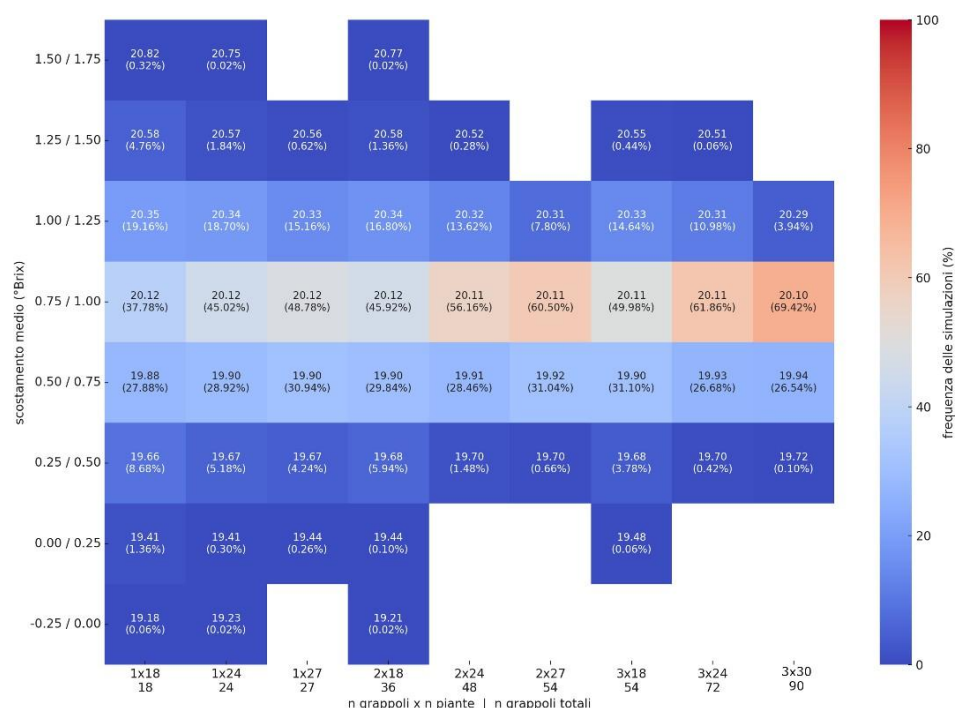


Figura 53. Distribuzione dell'errore di stima dei Solidi Solubili Totali (°Brix) per ciascuna configurazione di campionamento per grappolo nell'anno 2023. Le configurazioni sono indicate sull'asse X come numero di grappoli per pianta × numero di piante. Le classi riportate sull'asse Y rappresentano gli intervalli di scostamento tra il valore medio stimato e il valore medio complessivo del vigneto (22.35 °Brix), espresse in intervalli di 0.25 °Brix. Il colore di ciascuna cella indica la frequenza relativa delle simulazioni, secondo la scala cromatica laterale (da 0% a 100%). All'interno di ciascuna cella si riportano: la quota di simulazioni (%) che ricadono nella specifica combinazione di configurazione e classe di errore, in °Brix il contenuto zuccherino medio stimato, calcolato esclusivamente sulle simulazioni appartenenti a quella stessa combinazione.

I risultati del 2024 indicano una sottostima sistematica del contenuto zuccherino dell'uva rispetto al valore medio reale del vigneto (22.35 °Brix). Tale tendenza si osserva in modo trasversale a tutte le configurazioni analizzate, indipendentemente dalla numerosità del campione, e si manifesta con particolare evidenza nelle fasce di errore comprese tra -1.25 e -0.75 °Brix (Fig. 54). Già nella configurazione minima (1×18), composta da un solo grappolo per ciascuna di 18 piante, oltre il 68% delle simulazioni si concentra nelle due fasce comprese tra -1.25 e -0.75 °Brix, con una predominanza nella classe -1.00 / -0.75 (40.10%). L'aumento moderato della numerosità, come nelle configurazioni 1×24 o 1×27, produce un leggero incremento della coerenza interna, con una maggiore concentrazione

nella stessa fascia centrale, ma non modifica sostanzialmente il valore medio della stima, che resta compreso tra 21.22 e 21.23 °Brix. Le configurazioni intermedie, quali 2×18 (36 grappoli) e 2×24 (48 grappoli), confermano questo andamento, evidenziando una progressiva riduzione della dispersione tra classi, accompagnata da una sostanziale stabilità del valore medio stimato. In particolare, la configurazione 2×27 (54 grappoli), che rappresenta un punto di equilibrio tra ampiezza e distribuzione spaziale del campione, mostra una forte concentrazione dell'errore nella fascia -1.00 / -0.75 °Brix (65.06%), con una quota marginale nelle fasce superiori e inferiori. Questo comportamento si accentua ulteriormente nella configurazione massima (3×30), in cui il 75.88% delle simulazioni rientra nella stessa fascia, confermando una tendenza alla convergenza su valori stabili ma sistematicamente sottostimati. Il valore medio stimato nelle classi dominanti resta pressoché invariato, oscillando tra 21.22 e 21.24 °Brix, a fronte di un valore reale di 22.35 °Brix, con una sottostima media pari a circa -1.1 °Brix. Anche le configurazioni più ampie, come 3×24 e 3×18, non introducono elementi di discontinuità nella distribuzione dell'errore, suggerendo che l'ampliamento della numerosità non influisce in modo apprezzabile sulla qualità della stima.

Nel complesso, tra le configurazioni esaminate, anche in questo caso la 2×27 può essere considerata la più efficiente, pur in presenza di un errore sistematico generalizzato. Essa mostra la maggiore concentrazione delle simulazioni nella fascia -1.00 / -0.75 °Brix (65.06%), accompagnata da una contenuta presenza nelle classi di errore più marcato: solo l'8.28% delle simulazioni rientra nella fascia -1.25 / -1.00, mentre nelle classi inferiori l'incidenza si riduce ulteriormente, con appena l'1.74% nella fascia -1.75 / -1.50 e lo 0.04% in quella -2.00 / -1.75. Questo andamento suggerisce una buona capacità della configurazione 2×27 di contenere gli scostamenti più elevati, restituendo una stima coerente, ripetibile e relativamente meno influenzata dalle deviazioni più estreme.

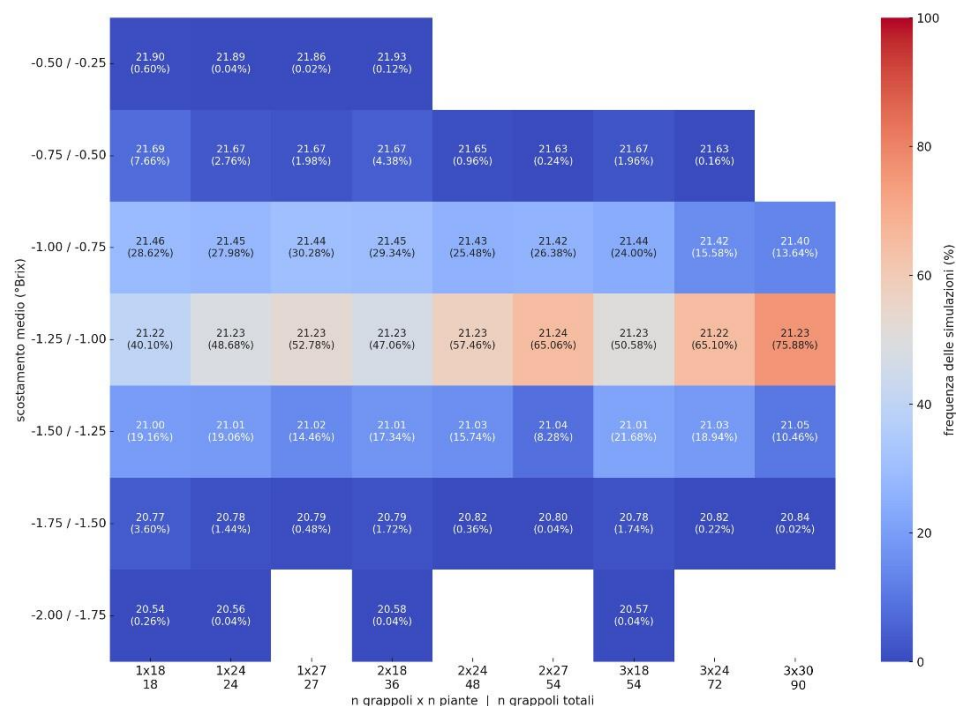


Figura 54. Distribuzione dell'errore di stima dei Solidi Solubili Totali (°Brix) per ciascuna configurazione di campionamento per grappolo nell'anno 2024. Le configurazioni sono indicate sull'asse X come numero di grappoli per pianta × numero di piante. Le classi riportate sull'asse Y rappresentano gli intervalli di scostamento tra il valore medio stimato e il valore medio complessivo del vigneto (22.35 °Brix), espresse in intervalli di 0.25 °Brix. Il colore di ciascuna cella indica la frequenza relativa delle simulazioni, secondo la scala cromatica laterale (da 0% a 100%). All'interno di ciascuna cella si riportano: la quota di simulazioni (%) che ricadono nella specifica combinazione di configurazione e classe di errore, in °Brix il contenuto zuccherino medio stimato, calcolato esclusivamente sulle simulazioni appartenenti a quella stessa combinazione.

5.3.1.3 Acino

Le simulazioni relative al campionamento per acino sono state impostate seguendo un criterio stratificato, con il prelievo di acini specificamente distribuiti lungo le tre porzioni del grappolo (apicale, mediana e basale). Questa scelta metodologica riflette l'interpretazione generale secondo cui, per rappresentare in modo adeguato la composizione dell'uva, il campionamento per acino debba tener conto della posizione all'interno del grappolo. Tuttavia, come emerso dall'analisi della variabilità intra-grappolo

descritta nel Capitolo 3, solo nell'annata 2022 il fattore "posizione dell'acino" ha mostrato effetti significativi sui parametri analizzati. Per questo motivo, la valutazione delle simulazioni stratificate è stata limitata esclusivamente ai dati raccolti nel 2022, unici a giustificare l'applicazione di tale approccio. In tale contesto, il campionamento per acino è stato condotto secondo uno schema stratificato, con il prelievo di due acini per ciascuna porzione del grappolo. I risultati ottenuti per questa annata mostrano una buona affidabilità del metodo già a partire da configurazioni intermedie, con errori complessivi contenuti e stime mediamente vicine al valore reale del vigneto (Fig. 55). Nella configurazione 6x1x18, che prevede il campionamento di 6 acini da un solo grappolo per pianta, su 18 piante, per un totale di 108 acini, l'errore complessivo si distribuisce tra -0.50 e +0.50 °Brix. In particolare, il 43.88% delle simulazioni ricade nella classe 0.00 / +0.25 e il 32.64% nella fascia -0.25 / 0.00. Complessivamente, oltre il 76% delle simulazioni presenta un errore inferiore a più o meno 0.25 °Brix. I valori medi stimati all'interno di queste classi risultano molto prossimi al valore reale del vigneto, compresi tra 21.18 e 21.35 °Brix. Solo una piccola parte delle simulazioni supera la soglia di più o meno 0.50 gradi, segnalando una buona contenibilità dell'errore anche con un numero ridotto di acini. Con l'aumento della numerosità campionaria, si osserva una progressiva contrazione della variabilità. La configurazione 6x2x18, pari a 216 acini totali, porta a una maggiore concentrazione nelle fasce centrali, con il 53.24% delle simulazioni tra 0.00 e +0.25 gradi e il 36.81% tra -0.25 e 0.00, riducendo ulteriormente la presenza di stime più estreme. L'intervallo di errore complessivo in questo caso si restringe a -0.25 / +0.50 °Brix, con valori medi sempre vicini a quello reale.

La configurazione 6x2x30, che prevede due grappoli per pianta su 30 piante (360 acini totali), rappresenta la situazione più stabile. Qui l'errore complessivo si riduce ulteriormente, concentrandosi per oltre il 90% delle simulazioni tra -0.25 e +0.25 °Brix. Il 60.18% delle simulazioni si colloca nella classe 0.00 / +0.25, mentre il 34.90% rientra in quella -0.25 / 0.00. Le fasce più estreme risultano pressoché assenti, e non si registrano simulazioni oltre più o meno 0.50 gradi. I valori medi all'interno delle classi centrali restano costanti, rispettivamente 21.38 e 21.21 °Brix. Questa configurazione garantisce quindi una stima molto precisa e ripetibile, riducendo al minimo l'incertezza. Configurazioni più ampie, come la 6x3x30 (540 acini), non offrono miglioramenti

significativi. L'intervallo di errore resta invariato e la distribuzione tra le classi centrali si stabilizza, suggerendo che oltre una certa soglia la maggiore intensità campionaria non si traduce in benefici aggiuntivi sul piano dell'accuratezza.

Nel complesso, la configurazione 6x2x30 emerge come la più equilibrata. Con un numero di acini gestibile in campo e una distribuzione spaziale adeguata, consente di ottenere stime affidabili, vicine al valore reale e contenute entro un margine di errore molto ridotto. Questa soluzione appare pertanto efficace nel rappresentare la composizione media dell'uva in contesti in cui la variabilità intra-grappolo risulta significativa.

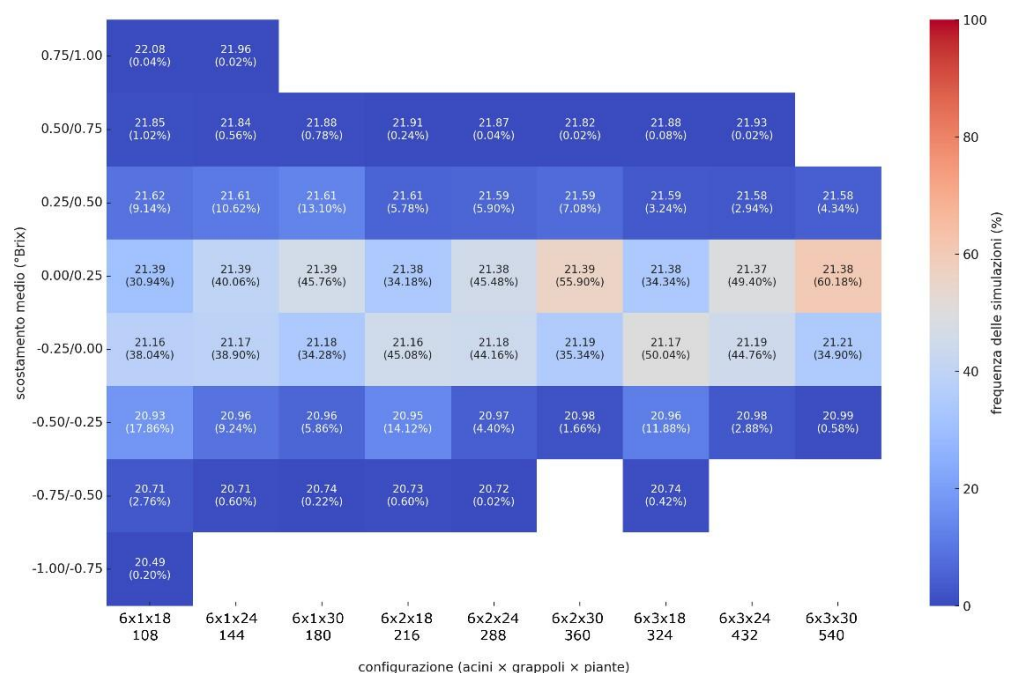


Figura 55. Risultati delle simulazioni di campionamento per acino stratificato, eseguito nel 2022 con prelievo di due acini per ciascuna porzione del grappolo (basale, mediana, apicale). Ogni colonna rappresenta una configurazione di campionamento, indicata dal numero totale di acini prelevati, risultato del prodotto tra acini per grappolo, grappoli per pianta e numero di piante. Le righe corrispondono alle diverse classi di errore, espresse come scostamento medio in gradi Brix rispetto al valore reale del vigneto (21.28 °Brix). In ciascuna cella sono riportati il valore medio di Brix calcolato per le simulazioni appartenenti a quella combinazione specifica di configurazione e classe di errore, seguito tra parentesi dalla percentuale di simulazioni che ricadono in tale fascia. La scala cromatica rappresenta la frequenza relativa delle simulazioni, con tonalità più calde associate a frequenze maggiori.

5.3.1.4 *Confronto fra i Tre Metodi*

Il confronto tra gli errori medi assoluti ottenuti dai tre metodi di campionamento ha restituito valori molto simili (Fig. 56). Questo risultato indica che è possibile stimare con precisione i SST delle uve utilizzando diversi metodi di campionamento. Tuttavia, ciascun metodo richiede un diverso impegno in termini di tempo, risorse e quantità di campione da gestire. Nel caso del campionamento per pianta, nel 2022, la configurazione ottimale è risultata quella basata su 30 piante, uniformemente distribuite tra i tre livelli di vigore. Questa ha consentito di ottenere una stima estremamente accurata, con circa il 99% delle simulazioni comprese nell'intervallo di errore ± 0.25 °Brix e una media di 21.35 °Brix, in prossimità del valore medio complessivo del vigneto (21.28 °Brix). Tuttavia, tale configurazione implicherebbe, in ambito operativo, la selezione e raccolta manuale di 10 piante per ciascuna classe di vigore (alto, medio, basso), con conseguente movimentazione e gestione di un campione considerevole. Pur trattandosi, in termini assoluti, di un numero esiguo di piante rispetto alle circa 40.000 potenzialmente presenti in un vigneto di otto ettari con sesto d'impianto 0.90×2.20 m, la quantità di uva da gestire risulterebbe tutt'altro che trascurabile. Il campionamento per grappolo, invece, ha evidenziato una maggiore efficienza operativa. Nel 2022, la configurazione che prevedeva il prelievo di 2 grappoli per pianta da 8 piante per livello di vigore, per un totale di 48 grappoli, ha permesso di ottenere il 74% delle simulazioni nella classe di errore più contenuta (± 0.25 °Brix). A fronte di un numero di unità campionarie nettamente inferiore rispetto al metodo per pianta, si ottiene un'accuratezza comparabile, sebbene con una riduzione di circa il 25% nella quota di simulazioni appartenenti alle classi di errore più precise. Tale differenza, tuttavia, potrebbe essere considerata accettabile da parte di molti operatori viticoli, in virtù della maggiore rapidità ed economicità del prelievo e della gestione del campione su larga scala.

Per lo stesso anno, i risultati ottenuti mediante il campionamento per acino confermano ulteriormente il potenziale di questo approccio. Le simulazioni condotte secondo la configurazione con 30 piante (10 per livello di vigore), 2 grappoli per pianta e 6 acini per

grappolo (2 per porzione di grappolo) indicano che, con un totale di 360 acini, è possibile ottenere nel 90% dei casi una stima dei SST compresa nell'intervallo ± 0.25 °Brix.

Tali considerazioni dimostrano che i tre metodi di campionamento simulati hanno determinato livelli di precisione comparabili; tuttavia, il raggiungimento di tale precisione avviene con quantitativi di campione molto diversi in funzione del metodo adottato. Considerando una produzione media di 1.7 kg per pianta, il campionamento per pianta comporterebbe la gestione di circa 50 kg di uva, equivalenti a circa 327 grappoli. Al contrario, nel metodo per grappolo, la configurazione più efficace richiederebbe il prelievo di 48 grappoli, che, a fronte di un peso medio di 156 g per grappolo, corrisponderebbero a circa 8 kg complessivi, ovvero un campione inferiore dell'85% rispetto al metodo per pianta. Ancora più contenuta risulterebbe la quantità necessaria nel caso del campionamento per acino: i 360 acini selezionati secondo la configurazione 2x24 (2 grappoli da ciascuna di 24 piante) comporterebbero un campione totale di circa 500 g, considerando un peso medio dell'acino pari a 1.36 g.

Considerazioni analoghe trovano conferma anche per la stagione 2023. In tale annata, le simulazioni relative al campionamento per pianta indicano nuovamente che la configurazione più efficace per stimare il contenuto di SST consiste nel prelievo di 30 piante equamente distribuite tra i tre livelli di vigore. Secondo i dati ottenuti, solo nel 4% delle simulazioni l'errore di stima ricade nella classe compresa tra +1.00 e +1.25 °Brix, mentre nel restante 96% i valori simulati si collocano tra +0.50 e +1.00 °Brix rispetto al valore reale. La media risultante, pari a 20.02 °Brix, risulta superiore di 0.77 °Brix rispetto alla media complessiva del vigneto per il 2023 (19.25 °Brix).

Anche il metodo per grappolo ha mostrato buoni livelli di precisione nella stessa annata. In particolare, il campionamento di 54 grappoli rappresenta la configurazione con il miglior equilibrio tra accuratezza e sforzo operativo: solo nell'8% dei casi si osservano sovrastime comprese tra +1.00 e +1.25 °Brix, una percentuale inferiore rispetto a tutte le altre configurazioni analizzate, ad eccezione della 3x30 (90 grappoli), che presenta un errore ancora più contenuto ma a fronte di un impegno nettamente maggiore.

Questi risultati confermano che, anche nel 2023, la precisione stimata dal campionamento per pianta è ottenuta a fronte di un'ingente quantità di campione: considerando una produzione media di 1.8 kg per pianta, il prelievo da 30 piante comporterebbe la gestione di circa 54 kg di uva, equivalenti a circa 390 grappoli. Al contrario, il campionamento per grappolo, nella configurazione 54, garantirebbe una precisione comparabile con un impegno decisamente inferiore, richiedendo solo circa 7.5 kg di uva.

I risultati ottenuti per la stagione 2024 confermano ulteriormente le evidenze già emerse nelle due annate precedenti. Queste differenze, costanti nelle tre annate analizzate, rappresentano un elemento centrale per orientare la scelta del metodo in funzione delle condizioni di campo, delle risorse disponibili e degli obiettivi della stima.

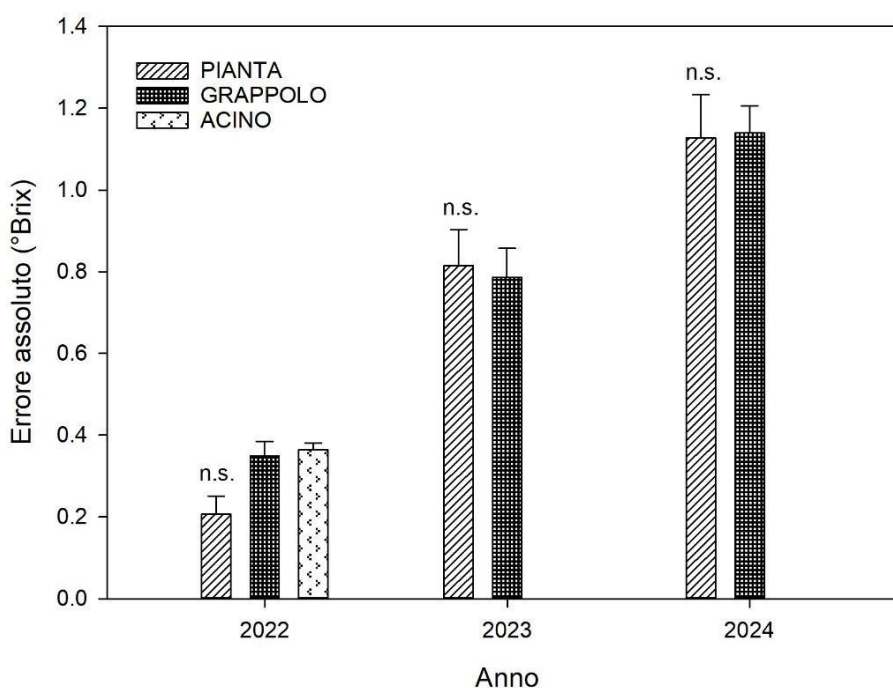


Figura 56. Errore assoluto (in °Brix) associato ai metodi di campionamento per pianta, grappolo e acino nelle tre annate di studio (2022, 2023, 2024), espresso come media $\pm$ errore standard. Il metodo per acino è stato considerato solo per il 2022, unico anno in cui la variabilità intra-grappolo è risultata significativa. Le differenze tra metodi sono state analizzate tramite ANOVA e test di Tukey per confronti multipli ($p < 0.05$); “n.s.” indica differenze non significative.

5.4 Discussione

I risultati emersi dalle simulazioni condotte in questo studio confermano che ciascuno dei tre metodi di campionamento analizzati, è in grado di restituire stime affidabili del contenuto zuccherino, a condizione che vengano rispettati criteri rigorosi di rappresentatività spaziale del vigneto, proporzionati alla dimensione del campione. L'importanza di garantire un'adeguata estensione e distribuzione del campione era già stata riconosciuta da Amerine e Roessler (1958b), che sottolineavano la necessità di individuare soglie minime per ottenere stime con livelli di precisione accettabili.

L'analisi dei dati raccolti evidenzia una variabilità interannuale significativa nell'accuratezza delle stime, indipendentemente dal metodo di campionamento adottato. Nel 2022, tutte le configurazioni, se opportunamente calibrate, hanno restituito valori prossimi alla media reale del vigneto. Tuttavia, nel 2024, le stime si sono rivelate sistematicamente superiori, in alcuni casi di oltre 1.00 gradi Brix rispetto al valore osservato. Tale comportamento suggerisce che fattori ambientali e fisiologici, variabili di anno in anno, possano interferire con la capacità predittiva dei metodi considerati. L'evidenza di una maggiore incidenza di errori sistematici nel 2024 richiama quanto già osservato da Lolonis (1962), secondo cui una selezione non controllata degli acini, in presenza di forte eterogeneità, può indurre una sovrastima sistematica del contenuto zuccherino.

Un secondo elemento cruciale emerso dallo studio riguarda l'impatto della dimensione del campione sulla precisione delle stime. Le simulazioni mostrano con coerenza che l'incremento del numero di unità campionate, a prescindere dal metodo adottato, determina un miglioramento della precisione. Tuttavia, tale miglioramento risulta più marcato all'aumentare del numero di piante coinvolte rispetto all'incremento del numero di grappoli prelevati per singola pianta. Questo effetto può essere ricondotto a due motivazioni principali. Innanzitutto, l'estensione del campione a un numero maggiore di piante consente di intercettare un range di variabilità più ampio, rappresentativo dell'eterogeneità intra-vigneto. In questa prospettiva, si può ipotizzare che un maggior numero di piante campionate permetta anche di cogliere parte di quella variabilità intra-vigneto che, come discusso nel Capitolo 1, tende a essere in parte trascurata quando l'NDVI

viene semplificato in classi di vigore. In secondo luogo, la ripetizione del prelievo sulla stessa pianta, pur fornendo un maggior numero di dati, tende a saturare l'informazione utile, in quanto introduce ridondanza piuttosto che incrementare la rappresentatività spaziale. In tal senso, la distribuzione del campione su più piante, si configura come una strategia decisamente più efficace per la riduzione dell'errore. Questo risultato è in linea con quanto riportato da Rankine et al. (1962), i quali dimostrarono che la variabilità tra le piante è sensibilmente maggiore rispetto a quella riscontrata tra grappoli della stessa pianta, evidenziando l'importanza di un'adeguata numerosità di piante nel campione per garantire rappresentatività. In questo contesto, il metodo per pianta ha richiesto il campionamento di almeno 30 piante per raggiungere un livello di accuratezza comparabile a quello ottenuto con quantità significativamente inferiori nei metodi per grappolo e per acino. Questo risultato può essere attribuito al fatto che, nel metodo per pianta, l'intera informazione disponibile deriva dalla medesima vite, e di conseguenza, pur aumentando il numero di grappoli o acini raccolti da ciascuna pianta, la capacità del campione di rappresentare la variabilità dell'intero vigneto rimane limitata se non si amplia il numero di piante considerate.

Questa osservazione trova riscontro anche nei risultati di Di Lorenzo et al. (2007), i quali hanno dimostrato che, a parità di numero complessivo di unità campionate, la distribuzione del prelievo su un numero maggiore di piante consente una più efficace riduzione dell'errore rispetto al campionamento concentrato su poche piante. Il loro confronto tra diverse strategie di prelievo (porzioni di grappolo, grappoli interi, piante intere) ha evidenziato che, per ottenere stime attendibili soprattutto di parametri ad alta variabilità come gli antociani e i flavonoidi, è preferibile privilegiare l'estensione spaziale del campione piuttosto che il numero di elementi raccolti per singola pianta. Tali evidenze sperimentali confermano quanto emerso nelle simulazioni condotte nel presente studio, ovvero che la riduzione dell'errore è fortemente legata alla capacità del campione di intercettare l'eterogeneità del vigneto, più che alla sua sola dimensione numerica.

Nel caso del campionamento per grappolo, l'aumento del numero di grappoli prelevati da ciascuna pianta, da uno a tre, non ha prodotto miglioramenti apprezzabili nella precisione. Al contrario, la distribuzione dei grappoli su un numero maggiore di piante ha determinato

una riduzione sostanziale dell'errore. Questa osservazione è coerente con quanto affermato da Hagiwara et al. (1987), secondo cui la distribuzione spaziale del campione è un fattore determinante nella riduzione dell'errore di stima.

5.5 Conclusioni

I risultati ottenuti confermano che, in vigneti contraddistinti da significativa eterogeneità spaziale, i tre metodi di campionamento analizzati sono in grado di restituire stime attendibili del livello di Solidi Solubili Totali dell'uva, a condizione che la progettazione del disegno sperimentale garantisca un'adeguata copertura della variabilità presente all'interno del vigneto. L'accuratezza della stima non è strettamente correlata alla quantità assoluta di materiale biologico raccolto, bensì alla distribuzione spaziale delle unità campionarie e al numero di individui indipendenti inclusi nel campione.

Le simulazioni hanno evidenziato che il campionamento per pianta richiede una quantità di campione significativamente superiore rispetto agli altri metodi. Per ottenere stime confrontabili in termini di errore medio assoluto, è necessario gestire masse di uva nettamente più elevate rispetto al campionamento per grappolo o per acino, che risultano più efficienti sul piano operativo. Le simulazioni condotte sul campionamento per acino, relative all'annata 2022, hanno evidenziato un'elevata efficienza, permettendo di ottenere stime molto vicine al valore medio del vigneto calcolato sull'intera superficie di 8 ettari, pur a fronte di una massa campionaria estremamente ridotta. Tali risultati, tuttavia, devono essere considerati con cautela, poiché basati su considerazioni derivanti da una singola annata. Sarà pertanto necessario verificare la riproducibilità del metodo in condizioni pedoclimatiche e stagionali differenti.

Alla luce delle considerazioni emerse, risulta opportuno approfondire alcuni aspetti metodologici che non sono stati oggetto diretto del presente studio, ma che potrebbero influenzare in modo sostanziale l'efficacia del campionamento.

Nel presente studio è stato adottato un criterio di campionamento uniforme, con pari numerosità di unità per ciascun livello di vigore. Un possibile sviluppo metodologico potrebbe consistere nel confrontare questo approccio con una strategia di tipo ponderato, in cui la distribuzione delle unità campionarie rispecchi la rappresentatività effettiva delle diverse classi di vigore all'interno del vigneto, come desumibile da indici di vegetazione quali l'NDVI. Un confronto sistematico tra i due metodi potrebbe contribuire a definire strategie di campionamento più aderenti alla struttura reale dell'impianto.

Un secondo ambito da approfondire riguarda la definizione del momento ottimale per la classificazione del vigore nel metodo ponderato. In particolare, si propone di valutare se l'utilizzo di indici NDVI acquisiti in epoche precoci, come la fase di allegagione o lo stadio di grano di pepe, possa offrire una base informativa sufficiente per pianificare il campionamento, consentendo di anticipare le operazioni e ottimizzare la logistica aziendale.

Infine, con riferimento al campionamento per acino, si suggerisce di esplorare la possibilità di un prelievo casuale lungo il grappolo, mantenendo una selezione stratificata delle piante in base al vigore. Tale strategia potrebbe semplificare la fase di raccolta, riducendo l'onere operativo senza compromettere la qualità della stima. Nel complesso, i risultati ottenuti forniscono indicazioni utili per riflettere sulle condizioni che possono favorire una maggiore rappresentatività del campione in vigneti caratterizzati da elevata variabilità, e possono costituire un punto di partenza per l'eventuale definizione di strategie di campionamento più efficienti.

5.6 Riferimenti Bibliografici

- Acevedo-Opazo, C., Tisseyre, B., Guillaume, S., & Ojeda, H. (2008). The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precis. Agric.*, 9, 285–302. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9073-1>
- Amerine, M. A., & Roessler, E. B. (1958a). Field testing of grape maturity. *Hilgardia*, 28, 93–113. <https://doi.org/10.3733/hilg.v28n04p093>
- Amerine, M. A., & Roessler, E. B. (1958b). Methods of determining field maturity of grapes. *Am. J. Enol. Vitic.*, 9, 37–40.
- Arnó, J., Rosell, J. R., Blanco, R., Ramos, M. C., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2012). Spatial variability in grape yield and quality influenced by soil and crop nutrition characteristics. *Precis. Agric.*, 13, 393–410. <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9254-1>
- Bramley, R. G. V. (2005). Understanding variability in winegrape production systems 2. Within vineyard variation in quality over several vintages. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 11, 33–42. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00277.x>
- Calderon-Orellana, A., Matthews, M. A., Drayton, W. M., & Shackel, K. A. (2014). Uniformity of ripeness and size in Cabernet Sauvignon berries from vineyards with contrasting crop price. *Am. J. Enol. Vitic.*, 65, 81–88. <https://doi.org/10.5344/ajev.2013.13084>
- Di Lorenzo, R., Barbera, M., Costanza, P., Pisciotto, A., Santangelo, T., & Barbagallo, M. G. (2007). Sampling strategy and minimum sample size to judge correct determination of grape maturity. In H.-R. Schultz & A. Achilles (Eds.), *Technik im Weinbau. 8th Int. ATW Symposium* (pp. 169–176). Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Ferrer, M., Echeverría, G., Pereyra, G., Gonzalez-Neves, G., Pan, D., & Mirás-Avalos, J. M. (2020). Mapping vineyard vigor using airborne remote sensing: relations with yield, berry composition and sanitary status under humid climate conditions. *Precis. Agric.*, 21, 178–197. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09663-9>
- Gatti, M., Garavani, A., Squeri, C., Diti, I., De Monte, A., Scotti, C., & Poni, S. (2022). Effects of intra-vineyard variability and soil heterogeneity on vine performance, dry matter and nutrient partitioning. *Precis. Agric.*, 23, 150–177. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09831-w>
- Gatti, M., Garavani, A., Vercesi, A., & Poni, S. (2017). Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 23, 399–408. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12286>

- Hagiwara, K., Ooi, I., Itsukage, I., & Okuno, T. (1987). Investigation of sampling method to estimate grape sugar content. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, 56, 151–158.
- Kasimatis, A. N., & Vilas, E. P. (1985). Sampling for degrees Brix in vineyard plots. *Am. J. Enol. Vitic.*, 36, 207–213.
- Meyers, J. M., Dokoozlian, N., Ryan, C., Bioni, C., & Vanden Heuvel, J. E. (2020). A new, satellite NDVI-based sampling protocol for grape maturation monitoring. *Remote Sens.*, 12, 1159. <https://doi.org/10.3390/rs12071159>
- Meyers, J. M., Sacks, G. L., van Es, H. M., & Vanden Heuvel, J. E. (2011). Improving vineyard sampling efficiency via dynamic spatially explicit optimisation. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 17, 306–315. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00152.x>
- Peynaud, E., Guimberteau, G., & Nauzin, P. (1970). Étude de la maturation du raisin considérée grain par grain. *OENO One*, 4, 285–298.
- Rankine, B. C., Cellier, K. M., & Boehm, E. W. (1962). Studies on grape variability and field sampling. *Am. J. Enol. Vitic.*, 13, 58–72.
- Student. (1938). Comparison between balanced and random arrangements of field plots. *Biometrika*, 30, 363–378.
- Tagarakis, A. C., Koundouras, S., Fountas, S., & Gemtos, T. (2018). Evaluation of the use of LIDAR laser scanner to map pruning wood in vineyards and its potential for management zones delineation. *Precis. Agric.*, 19, 334–347. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9520-2>
- Tisseyre, B., Mazzoni, C., & Fonta, H. (2008). Within-field temporal stability of some parameters in viticulture: Potential toward a site specific management. *OENO One*, 42, 27–39. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2008.42.1.816>
- Travanic-Fuentes, Z., Gutiérrez-Gamboa, G., & Moreno-Simunovic, Y. (2024). The variability of berry parameters could be an indicator of the potential quality of the vineyard. *Plants*, 13(18), 2617. <https://doi.org/10.3390/plants13182617>
- Trought, M. C. T., & Bramley, R. G. V. (2011). Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: Characterising spatial and temporal changes in fruit composition and juice quality in the vineyard. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 17(1), 79–89. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00120.x>

6 Conclusioni generali

Il presente lavoro ha affrontato in modo sistematico il tema della variabilità nella composizione dell'uva, analizzandola su tre livelli distinti ma interdipendenti: tra piante (intra-parcellare), tra grappoli della stessa pianta (intra-pianta) e tra acini dello stesso grappolo (intra-grappolo). Questa articolazione multilivello ha messo in luce le principali fonti di variabilità e il loro impatto sulla qualità finale dell'uva.

A livello intra-parcellare, l'analisi dell'indice NDVI ha confermato l'esistenza di un gradiente di vigore stabile nel tempo, in grado di spiegare una parte significativa della variabilità riscontrata nei parametri qualitativi e produttivi. Le zone a vigore ridotto hanno mostrato una maturazione anticipata, un contenuto zuccherino maggiore e rese più basse, mentre le aree ad alto vigore hanno evidenziato rese superiori e una maturazione ritardata. Queste differenze si sono confermate su più annate, suggerendo che la variabilità di vigore ha una base pedologica stabile. L'impiego dell'NDVI calcolato a livello di singola pianta, rispetto alla più semplice suddivisione in classi di vigore, ha aumentato la capacità predittiva dei modelli statistici, soprattutto in relazione ai solidi solubili totali. Questi risultati sottolineano il potenziale degli strumenti di viticoltura di precisione nella caratterizzazione del vigneto e nella definizione di strategie di campionamento più efficaci.

L'indagine condotta sulla variabilità intra-pianta ha evidenziato che nelle viti potate a cordone speronato, la distribuzione della qualità dell'uva tra i centri produttivi, i nodi e lungo il germoglio è sostanzialmente omogenea. Sebbene siano emerse differenze nel peso dei grappoli in funzione della loro posizione sul germoglio, tali variazioni non si sono riflesse nei principali parametri compositivi. Questo suggerisce che, almeno in questo sistema di potatura, le differenze qualitative più rilevanti si manifestano tra piante diverse piuttosto che all'interno della stessa pianta, pertanto, il campionamento può essere meno vincolato alla posizione del grappolo, ma richiede una corretta distribuzione tra le piante per contenere l'errore di stima.

Per quanto riguarda la variabilità intra-grappolo, i risultati ottenuti indicano che la distribuzione dei solidi solubili all'interno del grappolo è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche e dallo stato fisiologico della pianta. In particolare, nelle annate più calde e stressanti, si osserva una maggiore omogeneità tra le diverse porzioni del grappolo, verosimilmente riconducibile a una maturazione più rapida e sincronizzata. Una tendenza simile si manifesta anche in annate che seguono stagioni molto difficili per alte temperature e carenza idrica, probabilmente per effetto del carico produttivo limitato, a sua volta conseguenza degli stress accumulati nel ciclo precedente.

Sulla base di queste osservazioni, è stato sviluppato un sistema di simulazione che ha permesso di confrontare tre diversi metodi di campionamento: per pianta, per grappolo e per acino, quantificando il numero minimo di unità necessarie per ottenere stime affidabili. Tutti e tre i metodi hanno dimostrato di poter fornire stime attendibili della gradazione zuccherina media del vigneto, a condizione che le operazioni di campionamento rispettino la logica della stratificazione, nonché una ripartizione del campione nei livelli vigore, oltre alla dimensione del campione.

In tal senso, il campionamento per pianta si è rivelato il più impegnativo dal punto di vista operativo, richiedendo l'analisi di almeno 30 piante per contenere l'errore entro limiti accettabili. Il campionamento per grappolo ha rappresentato un buon compromesso tra accuratezza e gestione operativa, mentre il campionamento per acino si è distinto per efficienza, riuscendo a restituire risultati comparabili con una quantità di campione decisamente inferiore. Tuttavia, quest'ultimo approccio necessita di ulteriore validazione, in quanto testato su un numero limitato di annate e fortemente dipendente dalla precisione nella fase di selezione.

In sintesi, l'analisi svolta ha dimostrato che comprendere le dinamiche della variabilità all'interno del vigneto è un prerequisito fondamentale per impostare strategie di campionamento più rappresentative ed efficaci. L'integrazione tra osservazioni agronomiche, strumenti di rilevamento avanzato e simulazioni sperimentali consente di affinare i protocolli decisionali legati alla maturazione, migliorando la capacità di individuare il momento ottimale per la vendemmia e favorendo una gestione del vigneto più razionale, mirata e sostenibile.