POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI STUDI MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Ottimizzazione di prove sperimentali ed analisi dei risultati su circuiti con ugelli irroratori per agricoltura

Relatore:

Prof. Terenziano Raparelli

Correlatrice:

Prof.ssa Gabriella Eula

Candidato:

Lorenzo Vaudano

Aprile 2023

Abstract

La seguente tesi ha come oggetto lo studio di un sistema di irrorazione di prodotti fitosanitari per colture vinicole tramite l'utilizzo di un drone; in particolare, si sono effettuate delle prove in laboratorio su un circuito irroratore composto da un serbatoio a vescica e un circuito a tre ugelli che simula il funzionamento del drone in volo. Questo lavoro è posto all'interno di un progetto più generale, che ha come obiettivo la progettazione di un sistema per l'applicazione dei prodotti fitosanitari sui vigneti più efficiente di quelli attuali. Tutte le attività sperimentali realizzate e presentate all'interno di questo elaborato sono state effettuate tra i mesi di ottobre e febbraio nel laboratorio di Aeronautica "Modesto Panetti" del Politecnico di Torino. Le prove sperimentali sono state effettuate su un banco prova realizzato appositamente, che simula la struttura di irrorazione che andrà poi montata sul drone. Le prove, realizzate con questo banco prova, sono state sostanzialmente di due tipi:

- la prima consiste nella misura dei tempi di svuotamento del serbatoio al variare delle condizioni iniziali;
- la seconda consiste nell'analisi dello spruzzo degli ugelli irroratori di acqua e colorante.

Per permettere di analizzare il getto di acqua colorata, si è utilizzata della carta fotografica, che si colora dopo il contatto con il liquido. Successivamente, l'analisi di questi fogli "macchiati" dal colore permette di individuare molti parametri caratteristici del getto e delle gocce, quali i diametri delle gocce stesse, la loro densità sul foglio e l'area percentuale coperta dalle gocce. Inoltre, si può immaginare il foglio come una simulazione delle foglie delle viti, e che quindi i parametri analizzati sul foglio rappresentino i medesimi parametri che si troverebbero nella situazione reale.

L'obiettivo della tesi è quello di analizzare i risultati ottenuti con questo circuito a tre ugelli alimentato dal serbatoio a vescica, fare un confronto dei risultati ottenuti con quelli ottenuti col medesimo circuito alimentato però dalla pompa (analisi effettuata nei lavori precedenti a questo) e capire se l'utilizzo del drone è veramente applicabile alla realtà oppure no. Lo studio del sistema deve tener conto dei limiti del drone, sia in termini di autonomia di volo che di peso trasportabile; inoltre non vanno trascurati nello studio i parametri del vigneto, quali possibili rami sporgenti che potrebbero portare instabilità al drone in movimento o l'effetto degli eventi atmosferici, come ad esempio il vento.

La soluzione finale, oltre a verificare tutte queste condizioni appena citate, deve verificare che i valori dei parametri ottenuti siano in linea con quelli indicati dalle normative vigenti, in particolare per quanto riguarda il diametro delle gocce; infatti, delle gocce troppo grandi rischierebbero di scivolare sulla superficie della foglia e finirebbero per inquinare il terreno sottostante, mentre delle gocce troppo piccole rischierebbero al contrario di essere in balia del vento, che quindi le farebbe disperdere in aria, inquinando il territorio.

Sommario

1. Capitolo 1: Introduzione 1
2. Capitolo 2: Modello del drone 4
2.1. Drone originale 4
2.2. Modifiche al drone 5
2.3. Drone modificato 8
2.4. Problematiche del drone 9
2.5. Modello vigneto 13
2.6. Drone e vigneto 14
3. Capitolo 3: Banco prova 16
3.1. Circuito per il riempimento del serbatoio 16
3.2. Circuito di alimentazione degli ugelli 19
3.3. Struttura porta-ugelli 20
3.4. Ugelli 21
3.4.1. Classificazione ugelli 22
3.4.2. Classificazione in base alle dimensioni delle gocce: ASABE 572.1 22
3.4.3. Ugelli utilizzati 23
3.4.4. Differenza tra VMD catalogati e ottenuti 24
3.5. Serbatoio 25
3.6. Simulatore di vigneto 26
3.7. Carta Fotografica 27
3.8. Colorante 28
3.9. Banco prova completo 29
4. Capitolo 4: Presentazione delle prove da effettuare 32
5. Capitolo 5: Prove di riempimento e svuotamento 33
5.1. Prove di riempimento 33
5.2. Prove di svuotamento del serbatoio 35
5.2.1. Parametri variabili per le prove di svuotamento 36
5.2.2. Elenco delle prove effettuate 37
5.2.3. Confronto dell'incidenza del volume sui tempi di svuotamento 38

5.2.4. Confronto ell'incidenza della pressione del riduttore sui tempi di svuotamento del serbatoio 40
5.2.5. Confronto dell'incidenza della pressione del serbatoio sui tempi di svuotamento del serbatoio 41
5.2.6. Grafici illustranti la pressione agli ugelli 43
5.3. Riepilogo risultati 44
6. Capitolo 6: Metodologia delle prove di spruzzo e definizione parametri 46
6.1. Definizione del circuito a tre ugelli 46
6.2. Spruzzo su carta fotografica 47
6.3. Fotografia del foglio 47
6.4. Elaborazione su software 47
6.5. Definizione dello spread factor 50
6.6. Calcolo dei parametri caratteristici 51
6.6.1. VMD 51
6.6.2. Densità di gocce 53
6.6.3. Area di copertura 53
6.7. Andamento dei grafici e analisi dei risultati 54
7. Capitolo 7: Prove di spruzzo 55
7.1. Procedura prove di spruzzo 55
7.2. Parametri impattanti sui risultati 58
7.3. Risultati ugelli singoli 59
7.4. Elenco prove di spruzzo effettuate in questo lavoro 60
7.5. Analisi su spruzzi ugello centrale 61
7.5.1. Andamenti parametri 63
7.5.2. Grafici 3D dell'ugello centrale 67
7.5.3. Pressioni molto basse e molto alte 69
7.5.4. Andamento parametri con pressioni basse e alte 70
7.5.5. Riepilogo risultati 71
7.6. Ugelli laterali 72
7.7. Angolo alpha = 45° e pressione alimentazione ugelli variabile 72

7.7.1. Andamento parametri 74
7.7.2. Grafici 3D dell'ugello inclinato di 45° 77
7.7.3. Riepilogo risultati 79
7.8. Angolo a 60° e pressione agli ugelli variabile 80
7.8.1. Andamento parametri 82
7.8.2. Grafici 3D 86
7.8.3. Riepilogo risultati 87
7.9. Angolo a 53° e pressione agli ugelli variabile 88
7.9.1. Andamento parametri 90
7.9.2. Grafici 3D 94
7.9.3. Riepilogo risultati 95
7.10. Analisi con angolo variabile e pressione costante 96
8. Capitolo 8: Confronto tra alimentazione con serbatoio e con pompa 99
8.1. Confronto ugello centrale 100
8.2. Confronto degli ugelli laterali 101
8.2.1. Angolo alpha = 45° 102
8.2.2. Angolo alpha = 60° 104
8.2.3. Angolo alpha = 53° 105
9. Capitolo 9: Spostamento ugelli laterali a metà altezza 106
9.1. Elenco prove 108
9.2. Andamento parametri 110
9.3. Grafici 3D 114
9.4. Riepilogo risultati 115
9.5. Confronto con l'ugello laterale in alto con angolo alpha=53° 115
9.5.1. Confronto parametri 117
9.5.2. Riepilogo risultati 118
10. Capitolo 10: Tabella ugelli 119
11. Capitolo 11: Confronto con la letteratura 128
11.1. Confronto del VMD 128
11.2. Confronto dell'area di copertura 129

11.3. Confronto della densità di gocce 129
12. Capitolo 12: Conclusioni 130
Riferimenti 133

1. Capitolo 1: Introduzione

In agricoltura, i prodotti fitosanitari sono di fondamentale importanza per aumentare la produttività e garantire la resa e la qualità nella produzione di derrate alimentari; assieme alla selezione vegetale e alla concimazione, l'utilizzo di prodotti fitosanitari fornisce un notevole contributo alla resa della produzione agricola (blw.ch, s.d.). Per questo motivo il corretto utilizzo e una giusta applicazione dei prodotti fitosanitari favorisce la crescita dei frutti e delle piante.

L'applicazione di questi prodotti sulle colture a terra (come, ad esempio, il riso o gli ortaggi bassi) è agevole e non comporta particolari problematiche; per quanto riguarda le piante ad albero o ad arbusto, invece, l'applicazione dei prodotti fitosanitari risulta più complessa e delicata, in quanto è molto difficile garantire una distribuzione uniforme del liquido su tutta la superficie della pianta.

Negli ultimi anni si stanno cercando di sviluppare nuove tecnologie che aiutino il coltivatore ad effettuare in maniera precisa l'irrorazione delle piante, in modo che esse crescano correttamente e diano frutti sani e consumabili. Dove possibile, si utilizza un trattorino che, passando tra le piante, irrori le piante tramite degli ugelli posti su delle appendici mobili. L'utilizzo del trattore però in molti casi non è applicabile, come ad esempio nei campi coltivati interamente senza stradine per il passaggio del trattore (come nelle risaie o nei campi di grano), oppure nel caso di coltivazioni su terreni scoscesi e in pendenza (come ad esempio i vigneti).

Figura 1: trattorino atto all'applicazione di prodotti fitosanitari (https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2018/06/20/macchine-irroratrici-attente-al-vigneto-e-all-ambiente/58963)

Per ovviare a questo problema, negli ultimi tempi si sono sviluppate delle nuove tecnologie che permettessero la corretta irrorazione delle colture anche senza l'utilizzo di trattorini. In particolare, per quanto riguarda le coltivazioni a terra, si stanno diffondendo in questi anni dei

droni atti all'applicazione di prodotti fitosanitari sulle piante; questi droni sono dotati di un serbatoio contenente del liquido che viene spruzzato tramite degli ugelli applicati al di sotto delle eliche del drone. L'utilizzo del drone ottimizza il lavoro di irrorazione, in quanto è stimato un risparmio di circa il 25% d'acqua rispetto alle tecnologie tradizionalmente utilizzate, oltre che una drastica riduzione dei tempi impiegati, che si possono ridurre addirittura fino a 40/60 volte (EGM96, s.d.). Inoltre, utilizzando dei droni, si possono installare su di essi dei sensori o fotocamere che permettono di monitorare anche altri parametri della pianta, quali il controllo dello stato di maturazione dei frutti o la presenza di possibili difetti nella pianta, che quindi possono essere subito corretti. L'utilizzo di questi droni e di queste nuove tecnologie rientra in quella che al giorno d'oggi è chiamata **agricoltura di precisione**, che è definita come una *strategia gestionale dell'agricoltura che si avvale di moderne strumentazioni ed è mirata all'esecuzione di interventi agronomici tenendo conto delle effettive esigenze colturali e delle caratteristiche biochimiche e fisiche del suolo* (Sky53, s.d.).

In sintesi, i vantaggi dell'utilizzo dei droni per l'applicazione dei prodotti fitosanitari sono:

- Riduzione degli sprechi d'acqua e dei prodotti spruzzati;
- Automatizzazione del processo;
- Riduzione drastica dei tempi;
- Possibilità di raggiungere zone non raggiungibili con le tecnologie tradizionali;
- Riduzione delle sostanze tossiche disperse nell'ambiente;
- Salvaguardia della salute dell'operatore.

Figura 2: drone utilizzato in agricoltura (https://blog.biotravel.it/droni-agricoltura-cambieranno-mondo/)

Le tecnologie appena citate, però, presentano ancora parecchi difetti, che ne limitano ancora il loro utilizzo; tra questi si evidenziano:

- Limitata autonomia di volo, nell'ordine di poche decine di minuti;
- Presenza di personale certificato per manovrare i droni;
- Costi iniziali molto alti;
- Tecnologia che, in presenza di piante ad albero, è ancora da ottimizzare.

Come si evidenzia nell'ultimo punto, sulle colture ad albero ci sono ancora degli ostacoli che ne impediscono lo sviluppo. Ciononostante, il tipo di cultura ad albero che più si appresta ad essere sottoposto al trattamento con i droni, è sicuramente la vite.

I vigneti sono solitamente disposti in lunghi filari dalla forma regolare, che quindi il drone può sorvolare senza particolari difficoltà. Inoltre, spesso sono posizionati in zone collinari o scoscese, come ad esempio nelle colline delle Langhe o del Monferrato, dove i mezzi di terra come i trattorini sono impossibilitati ad intervenire. Per questi motivi, l'utilizzo di droni per applicare i trattamenti fitosanitari ai vigneti sarebbe molto utile, in quanto ottimizzerebbe e velocizzerebbe il processo.

In questo lavoro si cerca quindi di adattare l'utilizzo del drone studiato per le colture di terra per trattamenti fitosanitari sui vigneti, in modo tale che il liquido raggiunga uniformemente tutte le zone della pianta; per far ciò, come si vedrà nei prossimi capitoli, è stato necessario sostituire il serbatoio del drone e aggiungere un circuito più elaborato di tre ugelli al fine di raggiungere anche le zone laterali della vite.

2. Capitolo 2: Modello del drone

In questo capitolo si illustra il drone preso come riferimento e le modifiche apportate ad esso al fine di ottimizzare le prestazioni.

Il drone utilizzato in questa tesi è stato selezionato dal precedente tesista Marco Persico (Persico, 2020) e corrisponde al modello DJI AGRAS MG-1, drone già utilizzato in applicazioni simili quali la coltivazione di risaie e colture a terra.

Figura 3: drone DJI AGRAS MG-1 in volo (https://www.dji.com/it/mg-1s/info)

2.1. Drone originale

Il modello DJI AGRAS MG-1 è un drone a otto rotori resistente alla polvere, all'acqua e alla corrosione, quindi lavabile senza nessun problema e perfettamente resistente all'ambiente agricolo; esso può trasportare un carico utile fino a 10 kg. Al drone viene inizialmente aggiunto un serbatoio per il trasporto di sostanze chimiche collocato sotto il corpo del drone: come si analizzerà in seguito questo serbatoio verrà sostituito per ovviare al problema dello scuotimento dell'acqua che porterebbe all'instabilità del drone. La miscela fitoiatrica viene poi irrorata da quattro ugelli irroratori rivolti verso il basso tramite un sistema di spruzzatura a pressione: anche questi ugelli sono stati sostituiti da un sistema a tre ugelli (uno centrale e due laterali) per garantire una copertura soddisfacente anche lungo le pareti verticali del vigneto (verrà analizzato in seguito nel capitolo 3).

Nell'immagine 4 è mostrato il modello Solidworks del drone originale, senza nessuna modifica apportata, e di seguito anche due proiezioni con riportate le quote in millimetri.

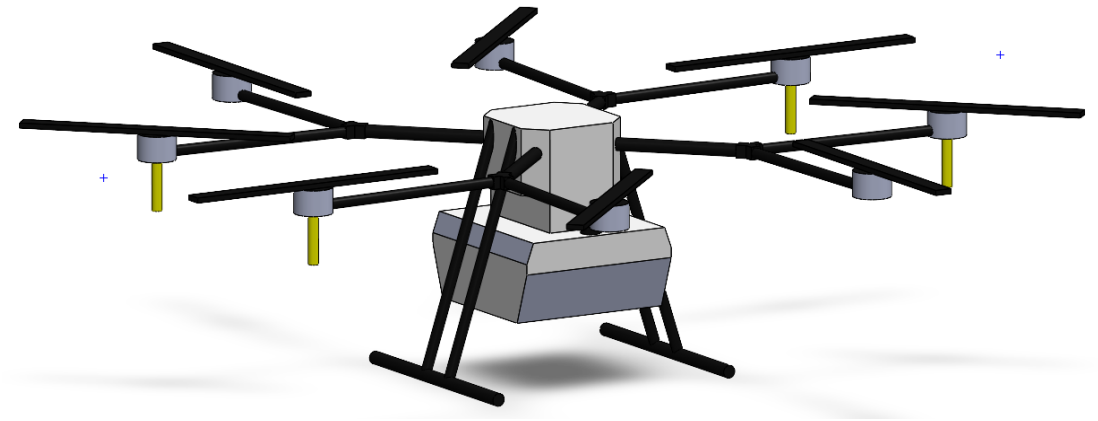


Figura 4: modello 3D Solidworks del drone originale (Persico, 2020)

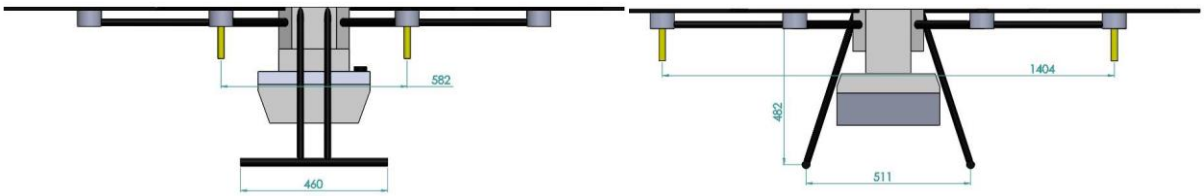


Figura 5: Proiezioni del modello Solidworks del drone (Persico, 2020)

2.2. Modifiche al drone

Come accennato pocanzi, al drone originale sono state apportate alcune modifiche, al fine di adattare il drone all'irrorazione di vigneti. Le modifiche principali apportate sono sostanzialmente due:

- Introduzione del circuito a tre ugelli
  La prima modifica rilevante apportata al drone è l'aggiunta di un circuito con tre ugelli. Questa modifica è resa necessaria al fine di garantire un'opportuna irrorazione anche alle foglie sulla parete verticale della vite che con il sistema originale non sarebbero state trattate opportunamente. Il sistema prevede l'utilizzo di un ugello centrale a cono pieno che va ad irrorare la parte superiore del vigneto e di due ugelli laterali a ventaglio calati verso i lati della vite (le differenze tra i due tipi di ugelli saranno illustrate al capitolo 3.4). In figura 6 si riporta la struttura del circuito che porta ai tre ugelli:

Figura 6: circuito che porta ai tre ugelli

Le distanze tra gli ugelli saranno riportate in seguito e sono state scelte in funzione delle dimensioni del vigneto e delle caratteristiche costruttive del drone.

- Cambio del serbatoio

La seconda modifica rilevante al drone è stata la sostituzione del serbatoio originale da 10 litri con due serbatoi a vescica da 4 litri ciascuno. Questa scelta è stata dettata dal fatto che nei droni in volo c'è la problematica dello scuotimento del liquido all'interno del serbatoio che potrebbe portare all'instabilità del drone stesso. Infatti, mentre il drone è in volo, il liquido all'interno del serbatoio inizia a muoversi nel serbatoio, il che potrebbe influire pesantemente sulla tenuta della rotta del drone; per evitare questo fenomeno si è deciso di applicare al drone due serbatoi a vescica (utilizzati anche come vasi d'espansione negli impianti di riscaldamento). I dettagli sul funzionamento di questo tipo di serbatoi saranno approfonditi nel capitolo 3.5.

I serbatoi scelti sono prodotti dalla Cimm e sono stati individuati dal tesista precedente Tobia Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022); il modello di serbatoio è il "CIMM STYLE 4" (Cimm SPA, s.d.) che ha una capacità di solamente 4 litri: dato che il volume fornito da un solo serbatoio di questo tipo sarebbe stato troppo ridotto, si è deciso di applicarne due, in modo da garantire più autonomia al drone.

Il volume totale garantito dai due serbatoi sarebbe quindi di 8 litri, inferiore al volume garantito dal serbatoio precedente che conteneva fino a 10 litri; per ovviare a questo problema si potrebbero applicare due serbatoi più capienti (come, ad esempio, i CIMM STYLE 5 da 5 litri ciascuno) ma il peso di liquido e serbatoi a carico del drone andrebbe

molto vicino al limite di 10 kg fornito dal produttore del drone. Per questo motivo si è scelto di sacrificare un po' di autonomia di lavoro del drone a favore della sicurezza. In figura 8 è riportato il modello costruito su Solidworks del serbatoio da 4 litri:

Figura 7: serbatoio "CIMM STYLE 4" (Cimm SPA, s.d.)

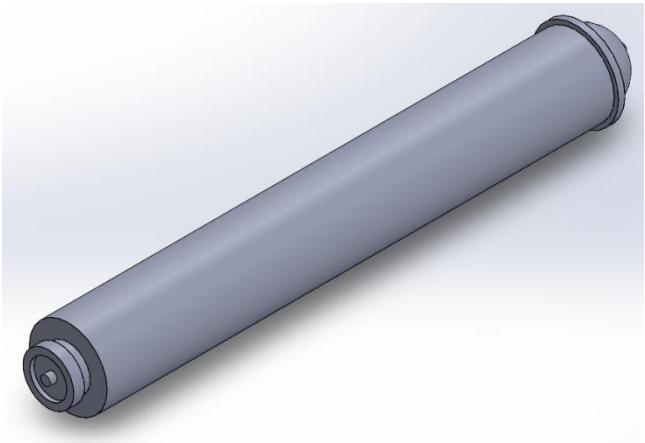


Figura 8: modello 3D Solidworks del serbatoio CIMM STYLE 4

Figura 9: quote in millimetri del serbatoio CIMM STYLE 4

2.3. Drone modificato

Al drone originale sono state apportate le modifiche appena riportate e il risultato finale è il seguente:

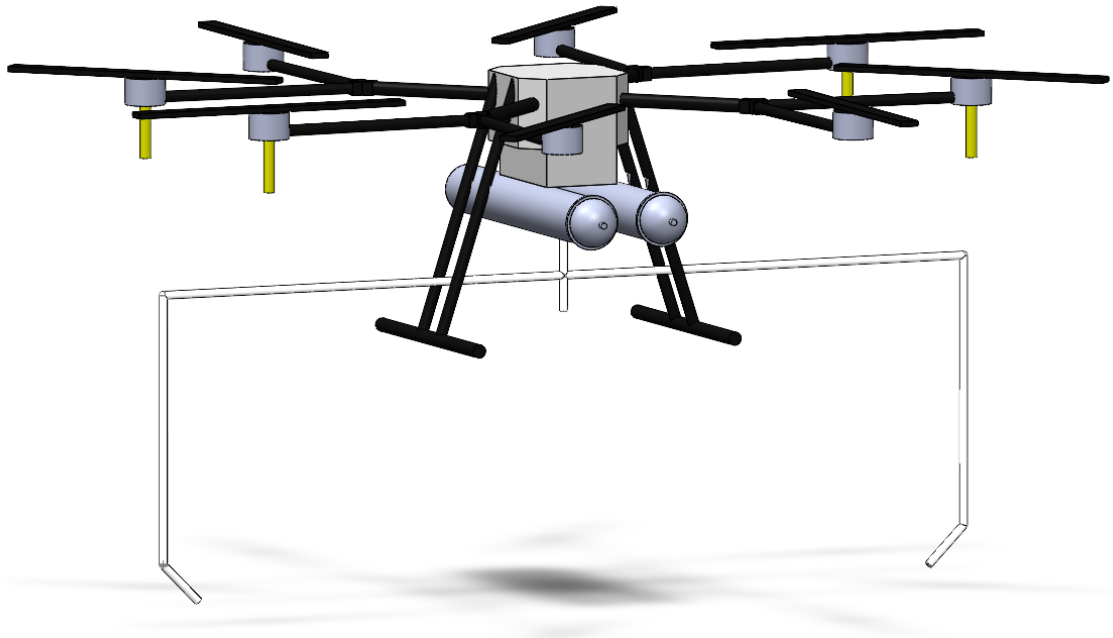


Figura 10: modello Solidworks del drone modificato

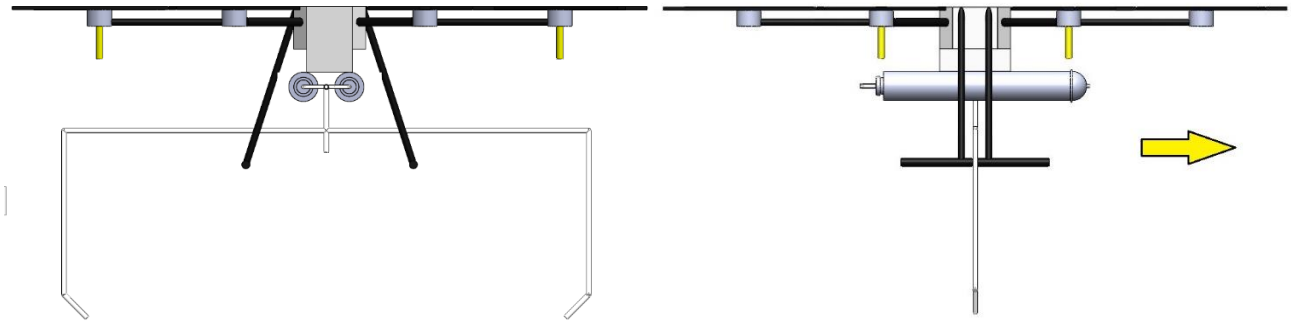


Figura 11: proiezioni modello Solidwors drone modificato

La direzione di avanzamento del drone è riportata in figura 11 ed è stata scelta così in base a considerazioni aerodinamiche: è stato ritenuto opportuno posizionare i tubi uscenti dai serbatoi verso la parte posteriore del drone, quando quest'ultimo è in volo, al fine di non peggiorare le prestazioni di volo a causa dell'attrito.

2.4. Problematiche del drone

Queste modifiche apportate al drone originale creano delle possibili problematiche che vanno considerate per evitare danni durante il suo utilizzo.

- Assetto di volo del drone

  L'introduzione dei due nuovi serbatoi molto lunghi e stretti potrebbe portare a possibili sbilanciamenti del drone in volo durante lo svuotamento degli stessi serbatoi, e pertanto questa problematica va tenuta in considerazione durante lo studio.

  Il drone originale in volo ha un assetto di volo leggermente sbilanciato verso la direzione di volo, come si osserva dalla figura 12:

Figura 12: drone in volo durante il suo utilizzo (Cimm SPA, s.d.)

  Come si può osservare, il drone è inclinato verso la direzione di volo anche se il serbatoio (il componente bianco nella parte bassa del drone) è spostato verso il retro del drone stesso: ciò fa pensare che il drone in fase di progetto sia stato pensato in modo tale che si sbilanci verso la direzione di volo e il serbatoio funga un po' come "contrappeso".

  In base a queste considerazioni si è deciso di installare i due serbatoi a vescica sul piano mediano del drone in quanto è solo nella parte posteriore del serbatoio che è presente il liquido fitoiatrico, mentre nella parte anteriore (verso la direzione di volo del drone) sarà presente solamente aria compressa, che quindi ha un peso specifico molto minore rispetto al liquido fitoiatrico. Con questa scelta si avrà un serbatoio che sbilancia un po' il drone indietro (come nel serbatoio originale) in condizione di pieno carico (quindi a inizio volo), mentre con serbatoio quasi vuoto il peso del serbatoio è equamente distribuito e non va ad influenzare troppo l'equilibrio del drone.

- Irregolarità dei rami del vigneto

  Un altro problema da non trascurare durante lo studio del drone è rappresentato dai possibili rami sporgenti dalle viti. Infatti essi, se dovessero urtare il drone in volo,

potrebbero sbilanciare il velivolo in maniera molto pericolosa, rischiando anche di fare perdere il controllo al sistema automatico di volo del drone, compromettendo la sua funzionalità. È perciò importante verificare che durante il suo utilizzo non ci siano rametti troppo sporgenti uscenti dal vigneto.

Come analisi sul campo di questa problematica, si è scelto di verificare la regolarità dei rami di un vigneto reale per convalidare o meno la realizzabilità dell'utilizzo del drone per il trattamento di vigneti. Di seguito si riportano alcune fotografie realizzate durante la stagione autunnale nei vigneti di Gattinara (in provincia di Vercelli):

Figura 14: vigneto di Gattinara (VC)

Figura 13: vigneto di Gattinara (VC)

Figura 15: vigneto di Lozzolo (VC)

Le tre fotografie appena riportate appartengono a tre vigneti differenti e da esse si può notare come in tutti i casi le viti siano potate in maniera molto regolare e precisa e pertanto non siano presenti eccessive protuberanze. Il drone risulta quindi utilizzabile per questo tipo di coltura, ma bisogna sempre controllare che i rami non sporgano più di qualche decina di centimetri dal profilo medio del vigneto, per evitare di danneggiare la funzionalità del drone.

- Atterraggio

Un ulteriore problema da analizzare è quello dell'atterraggio del drone dopo l'introduzione del circuito a tre ugelli: infatti gli ugelli laterali senza nessun intervento si interporrebbero tra la base del drone e il terreno, rendendo impossibile l'atterraggio e il decollo. Per ovviare a questo problema sono state proposte due alternative:

- Introduzione di un sistema automatizzato di ripiego del circuito di tre ugelli, in modo tale da far ripiegare gli ugelli laterali fin sopra al livello dei supporti di atterraggio del drone. Questa soluzione però richiederebbe un'implementazione costosa e complessa; in aggiunta, l'installazione di un dispositivo di ripiegatura automatica aumenterebbe la massa a carico del drone, limitandone quindi l'autonomia.
- Introduzione di un sistema a tubi telescopici, in maniera tale che i tubi che portano agli ugelli si possano ripiegare verso l'interno del drone, garantendo quindi un atterraggio sicuro.
- Realizzazione di una piazzola di atterraggio del drone, rialzata rispetto al terreno, che permetta alla struttura del drone di appoggiarsi senza problemi senza che i tubi laterali urtino contro il terreno. Questa soluzione risulta comoda, veloce ed economica, dato

che non è necessario modificare la struttura del drone e la sua forma. La piattaforma di atterraggio può essere realizzata ad esempio in legno e risulta molto semplice. Di seguito si riporta il disegno Solidworks di una possibile soluzione di piattaforma, con le quote (in millimetri) che sono state ricavate dalle dimensioni del drone.

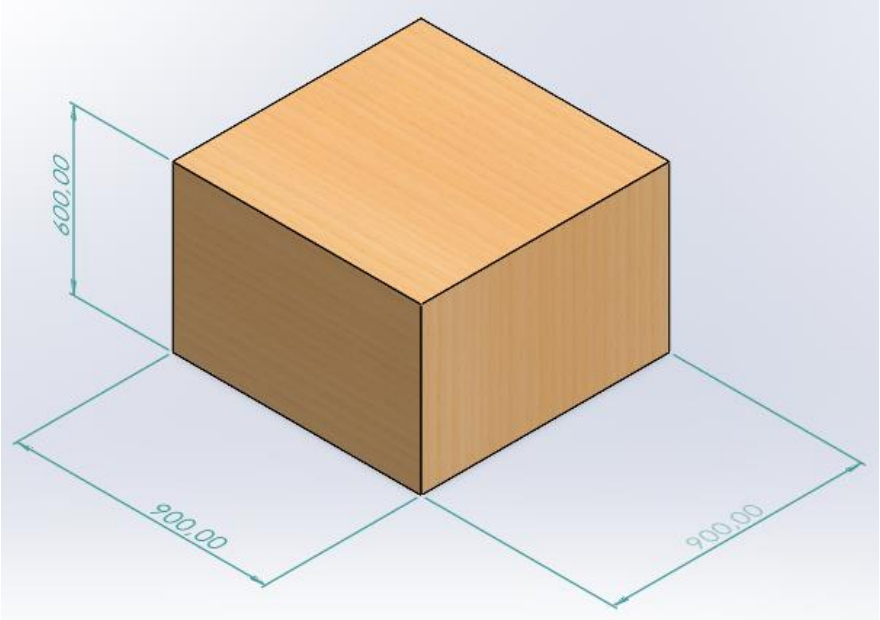


Figura 16: base di atterraggio drone, realizzata su Solidworks

Per confrontare le dimensioni della piattaforma appena realizzata con quelle del drone, in figura 17 si riporta il drone appoggiato sulla piattaforma; si nota anche come i tubi deli ugelli laterali non impattino contro il terreno, il che non impatta sull'integrità del drone.

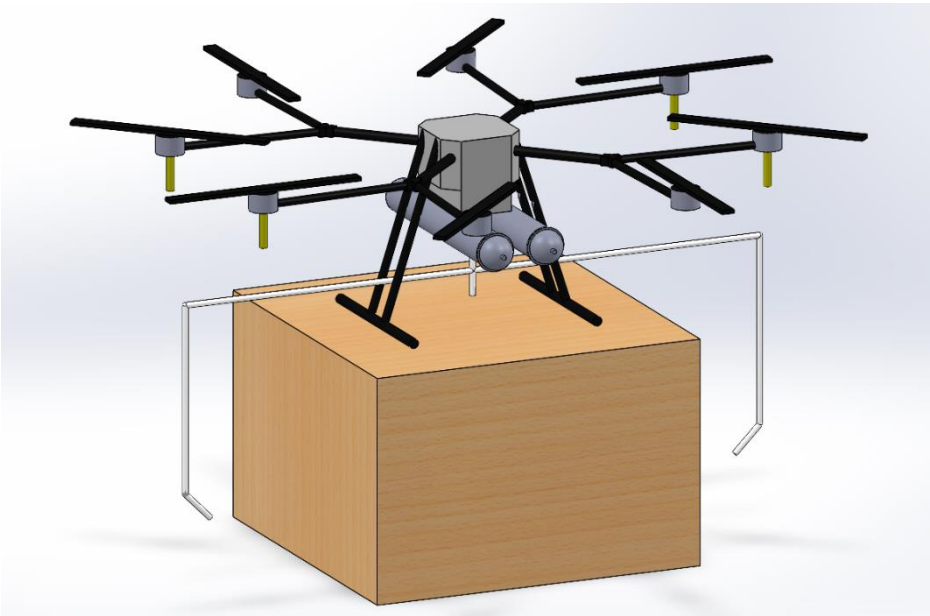


Figura 17: drone appoggiato sulla piattaforma, modelli Solidworks

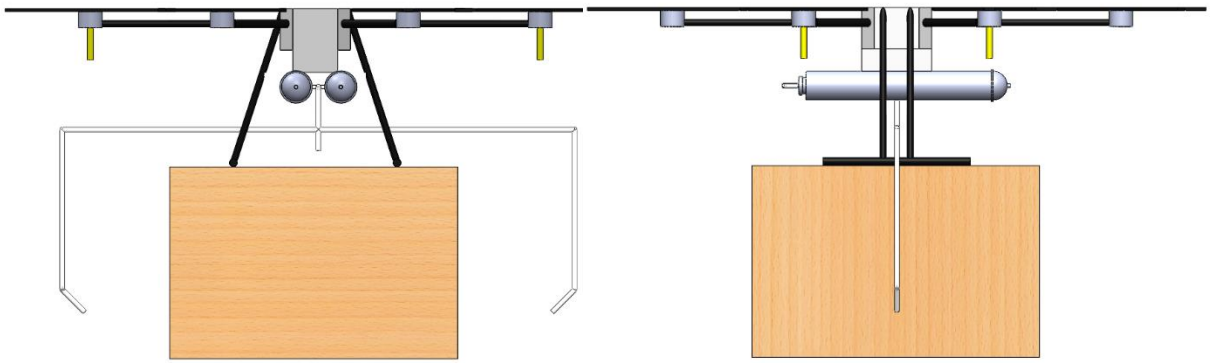


Figura 18: proiezioni dell'insieme

Quest'ultima soluzione proposta risulta essere la più vantaggiosa dal momento che, oltre che ad essere di semplice implementazione, non necessita di aggiungere peso ulteriore al drone in volo, garantendo quindi un'autonomia di volo maggiore.

2.5. Modello vigneto

Per simulare il vigneto nelle prove poi effettuate in laboratorio si è utilizzato il lavoro effettuato nella Tesi di Laurea Magistrale da Marco Persico (Persico, 2020), dove il tesista aveva costruito un modello che simula abbastanza fedelmente la forma del vigneto. Ovviamente, trattandosi di un modello, non rispecchia perfettamente la forma delle viti reali (il problema dei rami sporgenti, ad esempio, nel modello non esiste) e quindi bisognerà poi tenerne conto. Questo modello è stato poi costruito in laboratorio e denominato "simulatore di vigneto" ed è stato utilizzato per effettuare le prove di spruzzatura con il circuito a tre ugelli. Di seguito si riporta il modello della vite, con riportate anche le quote di riferimento in millimetri.

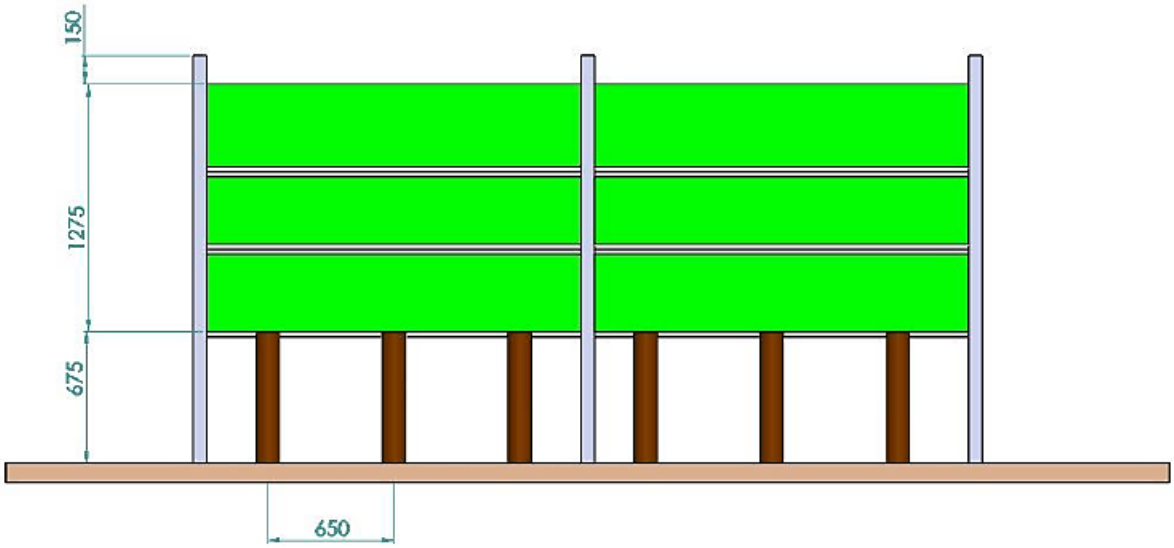


Figura 19; vista frontale del modello del vigneto (Persico, 2020)

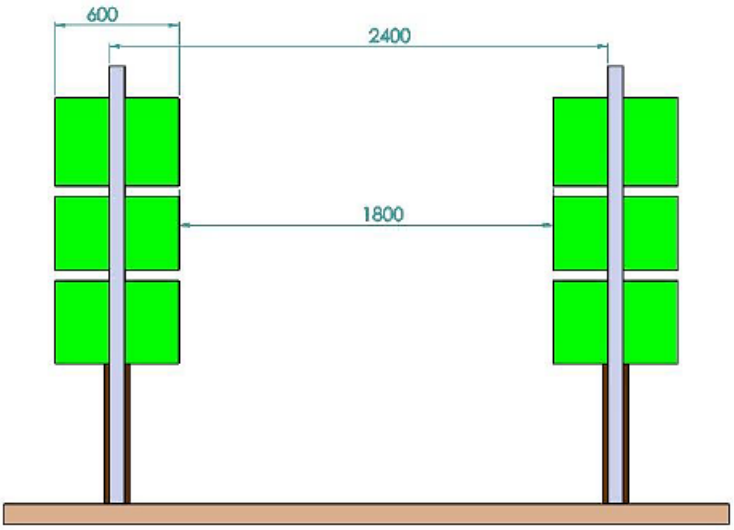


Figura 20: vista laterale del modello del vigneto (Persico, 2020)

2.6. Drone e vigneto

Unendo i risultati dello studio del drone a quelli del vigneto, si ottiene la simulazione dell'applicazione reale; questa configurazione è riportata in figura 21:

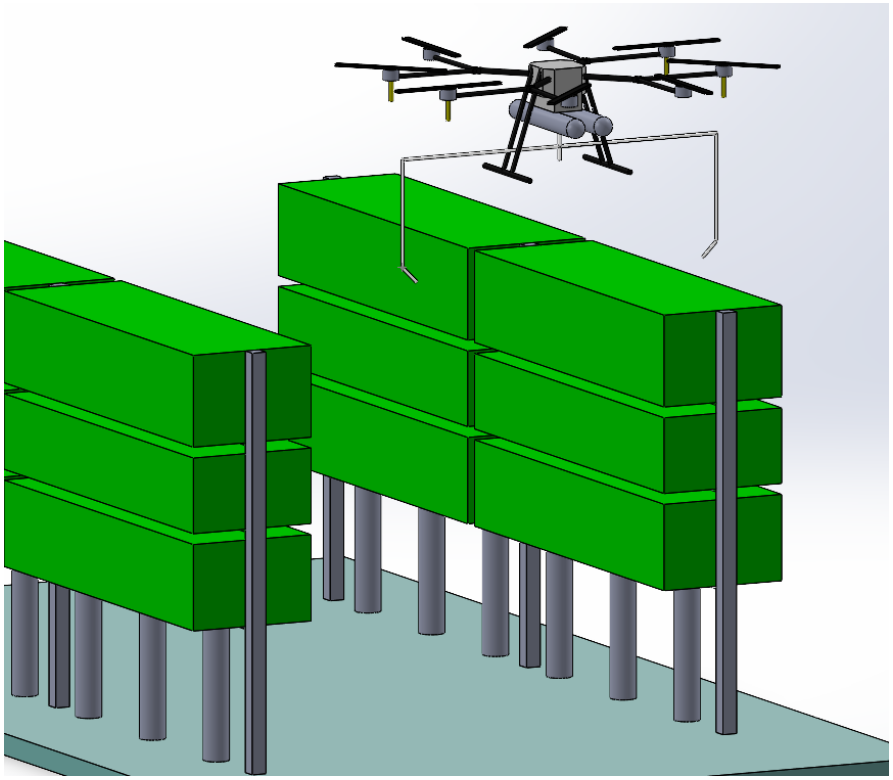


Figura 21: modello Solidworks finale con tutti gli elementi

Dalla figura si nota come il drone sia collocato in modo tale che gli ugelli laterali siano a livello dell'altezza del vigneto e inclinati di 45° (come impostato nelle prime prove elencate al capitolo 7), mentre l'ugello centrale dista 450 mm dalla superficie superiore della vite. Con

questa disposizione il drone non andrebbe a impattare neanche contro i rametti della vite che potrebbero sporgere dal modello realizzato su Solidworks, perché, come mostrato precedentemente, i rametti del vigneto non sono molto pronunciati.

In figura 22 è riportato il drone realizzato su Solidworks posto su dei vigneti reali (vigneti in comune di Gattinara), per rendere l'idea della possibile applicazione reale.

Figura 22: modello Solidworks del drone posizionato su un vigneto reale

Come notato poco fa, si nota come le protesi degli ugelli laterali non rischino in alcun modo di impattare contro i rametti laterali. L'unica possibile problematica è rappresentata dai paletti bianchi che, elevandosi ben più in alto del vigneto, potrebbero creare un ostacolo al volo; per questo motivo, se si vuole utilizzare questo metodo per l'applicazione del liquido fitoiatrico, bisognerà tenere conto di questi ostacoli e limitarli in altezza, in modo che siano allineati con la vite.

3. Capitolo 3: Banco prova

In questo capitolo è descritto il banco prova utilizzato per le prove di spruzzatura su carta fotografica, utili poi per lo studio del sistema di irrorazione. Gli esperimenti consistono di fatto nello spruzzare attraverso un circuito dotato di tre ugelli una soluzione di acqua e colorante su fogli di carta fotografica. Analizzando le macchie di colore che rimangono sui fogli, attraverso un software di analisi delle immagini, si possono calcolare i parametri che caratterizzano il getto e determinare la bontà delle prove. Tutte le prove effettuate in questo lavoro sono state realizzate con l'ausilio di questo banco prova.

Il banco è stato collocato nel laboratorio seminterrato "Modesto Panetti" del Politecnico di Torino dove si sono effettuate tutte le prove di spruzzo.

Il banco prova è costituito da sette sezioni principali:

1. Circuito per il riempimento del serbatoio;
2. Circuito di alimentazione degli ugelli;
3. Struttura porta-ugelli, che simula la struttura del drone;
4. Ugelli;
5. Serbatoio;
6. Simulatore di vigneto;
7. Carta fotografica;
8. Liquido irroratore, formato da una soluzione di acqua e colorante.

Il serbatoio e gli ugelli verranno analizzati nel dettaglio nel capitolo successivo.

3.1. Circuito per il riempimento del serbatoio

Questa parte del banco prova ha lo scopo di riempire il serbatoio di liquido, quando agli ugelli ancora non arriva il liquido. Questa operazione è una parte del processo che dovrà essere effettuata velocemente per ridurre i tempi morti tra un volo del drone e l'altro.

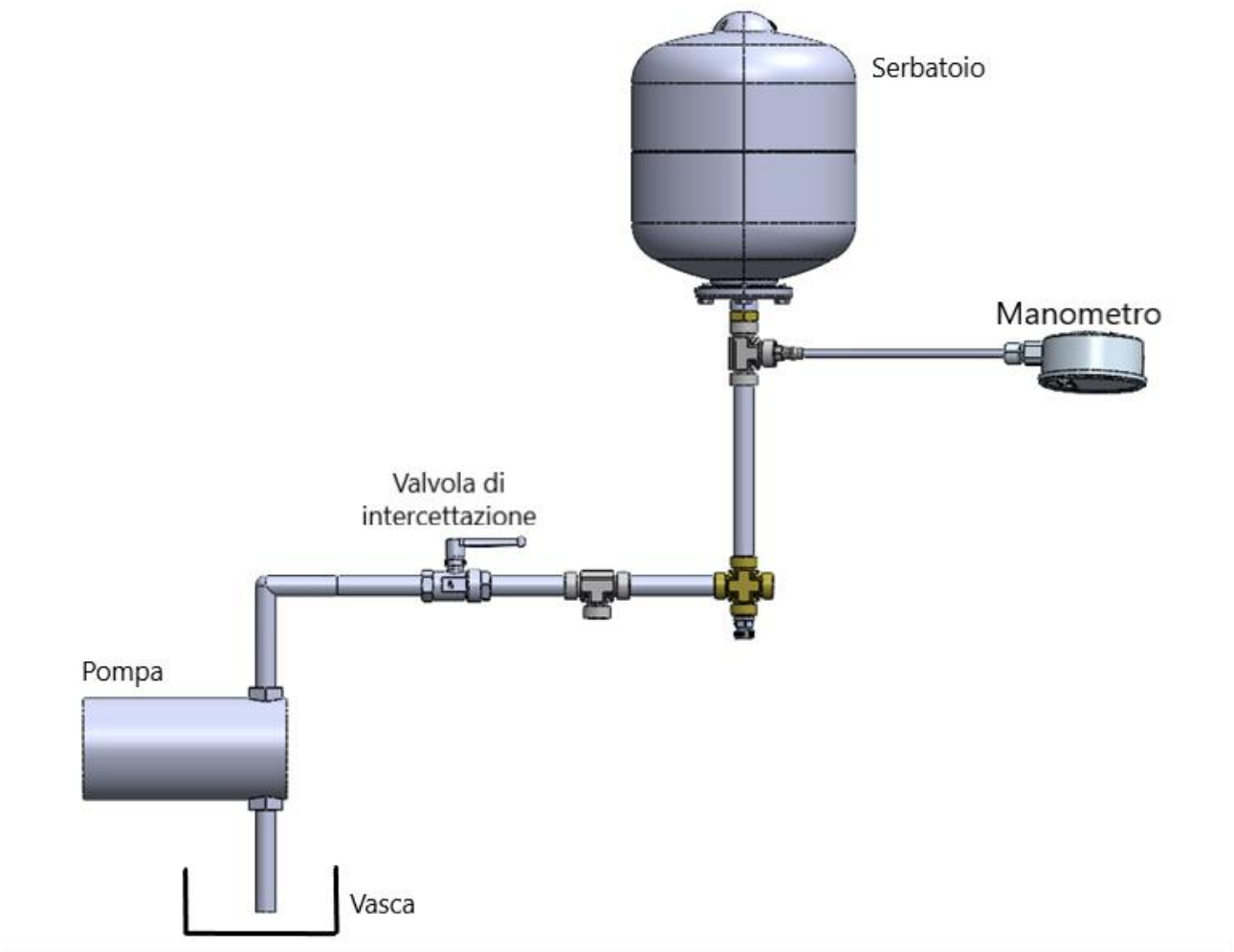


Figura 23: modello Solidworks del circuito di riempimento del serbatoio

Questa parte del circuito ha come elemento cardine la pompa, che preleva acqua da una vasca di acqua e la invia al resto del circuito, che culmina con il serbatoio anti-sloshing, che di conseguenza si riempie. Gli altri elementi presenti in questa sezione sono una valvola di intercettazione che ha lo scopo di aprire o chiudere il flusso del liquido e un manometro subito a monte del serbatoio.

Come detto, l'elemento fondamentale di questa parte di circuito è la pompa del modello Remco F2133031E1 (Pompa Remco, s.d.), con pressione massima di esercizio di 4 bar, che preleva il liquido dalla vasca e lo manda al circuito che termina con il serbatoio. Questa pompa ha bisogno di un'alimentazione elettrica a 12 V in corrente continua, perciò è necessario utilizzare un alimentatore regolabile per passare dalla tensione di rete ai 12 V DC necessari al funzionamento della pompa. Tra l'alimentatore e la pompa è stato posto un interruttore per poter accendere e spegnere più agevolmente la pompa.

Figura 25: pompa REMCO F2133031E1 con interruttore (in basso a destra)

Figura 24: alimentatore

L'alimentatore (mostrato in figura 24) permette di regolare la tensione o la corrente in ingresso, e a sua volta esso imposta l'altro parametro in uscita. La tensione può essere regolata ad un valore tra 0 e 30 V tramite le due manopole poste sotto lo schermo di sinistra: una manopola regola in maniera più grossolana, mentre l'altra permette di impostare con precisione il valore voluto. Allo stesso modo si regola la corrente, che può assumere valori compresi tra 0 e 30 A.

3.2. Circuito di alimentazione degli ugelli

Questa parte del banco prova ha lo scopo di collegare il serbatoio contenente il liquido caricato tramite la pompa e i tre ugelli che spruzzano il liquido.

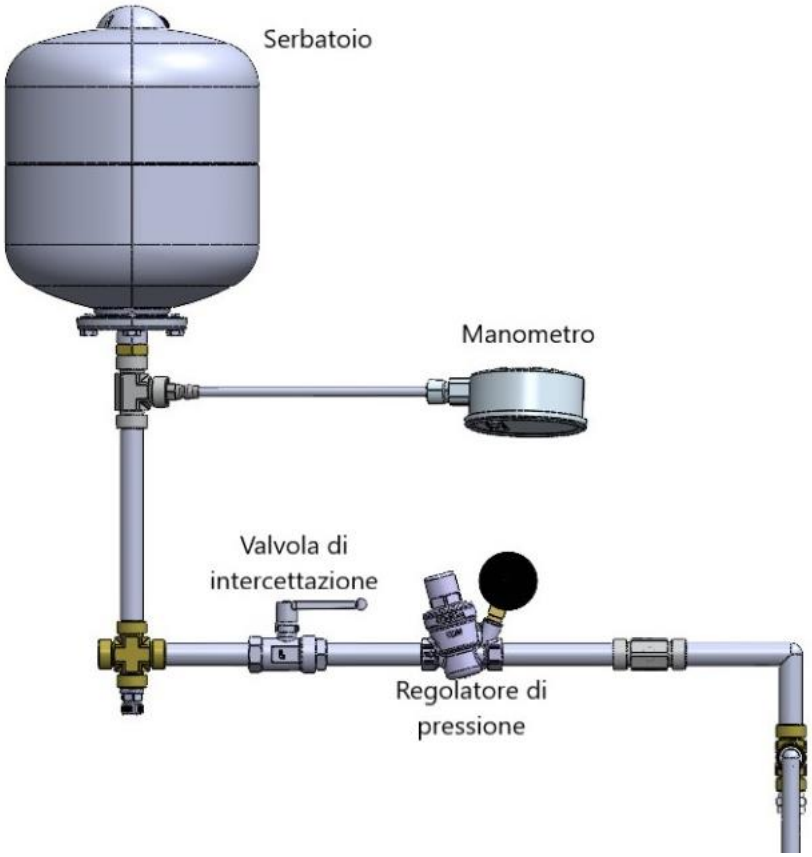


Figura 26: modello Solidworks del circuito di alimentazione degli ugelli (vista frontale)

La prima parte di tubazione uscente dal serbatoio è in comune con quella utilizzata per il caricamento dell'acqua tramite la pompa, mentre dopo il raccordo a T è presente una tubazione apposita. Anche in questa parte è installata una valvola di intercettazione (chiusa durante il riempimento del serbatoio e aperta al momento dell'alimentazione degli ugelli), la quale è seguita da un regolatore di pressione che ha lo scopo di mantenere la pressione agli ugelli il più costante possibile.

Successivamente il circuito si dirama in tre tubazioni che portano agli ugelli e, in corrispondenza dell'ugello centrale, è posta una diramazione a T che permette il collegamento di un ulteriore manometro a monte dell'ugello.

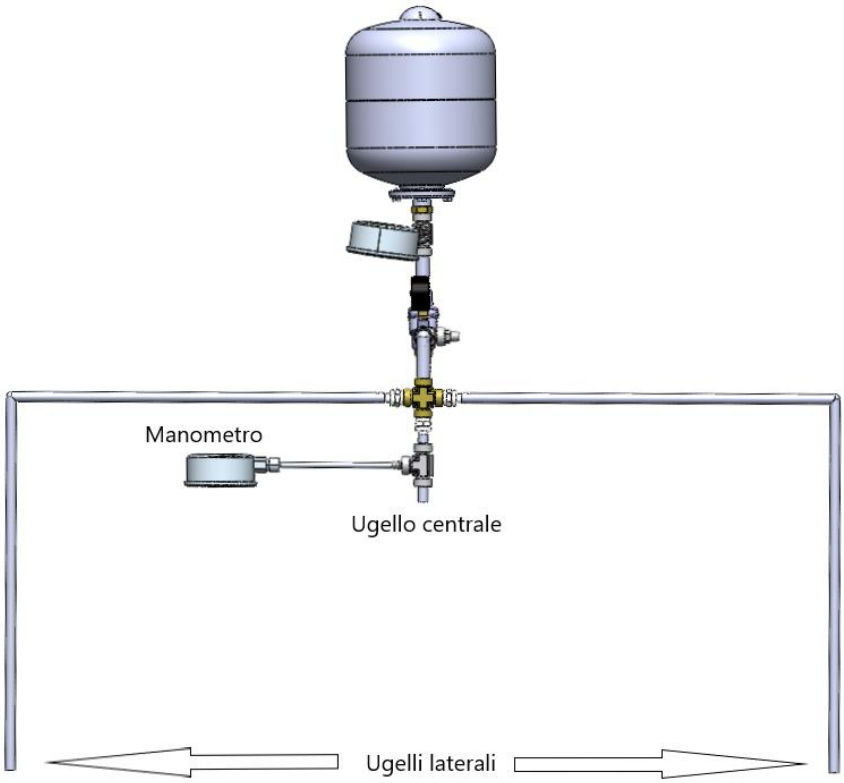


Figura 27: vista laterale del circuito di alimentazione degli ugelli

3.3. Struttura porta-ugelli

Tutto il banco prova descritto finora è stato montato su una struttura in grado di garantire agli ugelli la stabilità nella posizione desiderata e un corretto funzionamento di tutto il sistema. La struttura permette la regolazione del braccio e dell'angolo di inclinazione dei tre ugelli in modo tale da simulare correttamente la situazione reale.

Figura 28: struttura porta ugelli, con indicato l'angolo alpha

La struttura è formata da tre elementi principali:

- Traliccio di sostegno, che ha la funzione di sostenere tutta la struttura, compreso il serbatoio (questa parte è la struttura blu in figura 29);
- Struttura metallica a sbalzo, che ha la funzione di supportare il porta-ugelli;
- Porta-ugelli, sul quale son fissati tutti e tre gli ugelli: dal porta-ugelli è possibile regolare l'angolo di spruzzo degli ugelli laterali, impostato grazie all'ausilio di un goniometro.

Figura 29: struttura di sostegno del circuito

Tutta la struttura è impostata in modo tale da garantire l'altezza corretta degli ugelli rispetto al simulatore di vigneto; inoltre, anche il serbatoio va messo ad un'altezza maggiore rispetto agli ugelli (come nel caso reale del drone) in modo da simulare correttamente anche l'effetto della caduta del liquido per gravità.

3.4. Ugelli

Gli ugelli sono l'elemento fondamentale del circuito, in quanto caratterizzano il getto del liquido; essi sono composti essenzialmente da un orifizio nel quale il liquido in pressione, durante il suo passaggio, si espande dividendosi in tante piccole goccioline: questo fenomeno è detto polverizzazione del liquido.

3.4.1. Classificazione ugelli

Gli ugelli si possono distinguere in varie categorie, in base alla forma del getto che essi danno allo spruzzo:

- Ugelli a cono pieno
- Ugelli a cono vuoto
- Ugelli a ventaglio

Come suggerisce il nome, gli ugelli a cono hanno un getto appunto conico, e quindi l'impronta su un foglio perpendicolare al getto risulta essere circolare; la differenza tra ugelli a cono pieno e a cono vuoto è la presenza o meno di liquido all'interno dell'impronta. Invece, gli ugelli a ventaglio sono caratterizzati da un'impronta rettangolare, molto allungata.

Ugello a cono pieno	Ugello a cono vuoto	Ugello a ventaglio impronta rettangolare	Ugello a ventaglio impronta ellittica

Tabella 1: classificazione degli ugelli in base alla forma del getto (Asj Spray Jet Arag Group, Catalogue DC 6010a 2021)

Inoltre, esistono degli ugelli che hanno delle caratteristiche particolari, che fanno preferire alcuni ugelli ad altri: tra questi ci sono gli ugelli anti-deriva, che riducono drasticamente l'effetto della deriva. *La deriva è un fenomeno causato solitamente dal vento che porta alla dispersione di una parte del prodotto fitosanitario nell'ambiente circostante, causandone l'inquinamento* (ASJsrl, 2021). Per evitare questo fenomeno, gli ugelli anti-deriva inglobano aria all'interno delle gocce, facendole diventare più grosse e pesanti, in modo che risultino meno soggette all'effetto del vento.

La classificazione degli ugelli può essere fatta mediante vari criteri: in base alla taglia dell'ugello o in base alla dimensione delle gocce emesse. In questo elaborato si farà riferimento a quest'ultima distinzione, in quanto è fondamentale caratterizzare le gocce e la loro forma.

3.4.2. Classificazione in base alle dimensioni delle gocce: ASABE 572.1

La normativa ASABE 572.1 permette di catalogare gli ugelli in base alle dimensioni delle gocce emesse in otto diverse classi; nella seguente tabella sono riportate queste otto classi con i parametri da tenere in considerazione:

Getto	Dimensione delle gocce	Range di VMD (µm)
Molto fine	Piccole	61-105
Fine		106-235
Medio		236-340
Grossolano		341-403
Molto Grossolano	Grandi	404-592

Tabella 2: classificazione getto secondo ASABE 572.1 (ASABE, s.d.)

Dove il parametro chiamato VMD (Diametro Medio Volumetrico) è definito come:

VMD is the droplet size at which 50% of the spray volume is in droplets larger than the VMD and 50% of the volume is in droplets smaller than the VMD. (ASABE, s.d.)

Che tradotto in italiano risulta:

Il VMD è il diametro della goccia per il quale il 50% del volume dello spray è contenuto in gocce di diametro superiore al VMD ed il 50% in gocce con diametro inferiore al VMD.

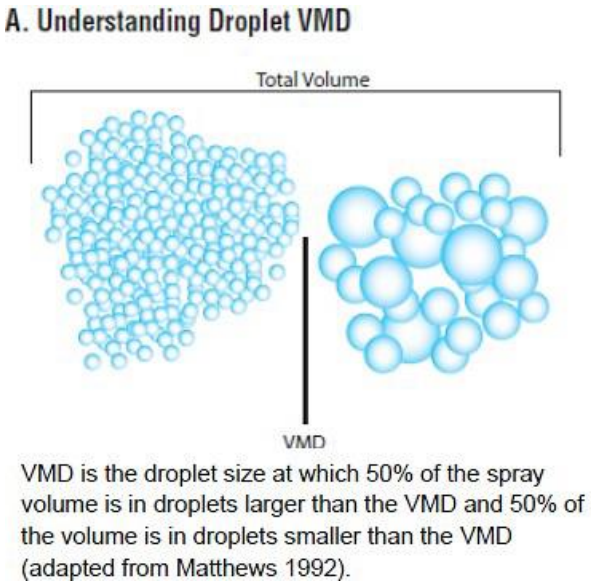


Figura 30: definizione VMD (ASABE, s.d.)

3.4.3. Ugelli utilizzati

Nei lavori precedenti a questo sono stati testati parecchi tipi di ugello, sia a cono che a ventaglio, ognuno con i propri vantaggi. Per scegliere gli ugelli da montare sul circuito a tre ugelli si è innanzitutto controllato quali fossero anti-deriva, in quanto in quest'applicazione è particolarmente importante non disperdere goccioline di liquido inquinante nell'ambiente: per questo motivo gli ugelli a cono vuoto risultano inadatti per questo utilizzo.

Per i tre ugelli utilizzati nel circuito del banco prova, si è scelto di differenziare il tipo di ugello montato nella posizione centrale e il tipo montato nelle posizioni laterali (Festa Bianchet,

2022): per l'ugello centrale si è scelto l'ugello a cono pieno HCF80015, mentre per i due laterali si è scelto l'ugello a ventaglio con impronta rettangolare LDC11001. In tabella 3 si riportano le caratteristiche degli ugelli installati e utilizzati in questo elaborato.

Ugello		Descrizione	Range di pressioni	Dimensioni gocce alla pressione ottimale
	HCF80015	Ugello a cono pieno	Pressioni ottimali tra 3 e 6 bar	Tra 2 e 6 bar gocce di tipo "fine"
	LDC11001	Ugello a ventaglio anti-deriva	Pressioni ottimali tra 2 e 4 bar	A 1 bar, gocce "medie" A 3-4 bar, gocce "fine"

Tabella 3: Ugelli utilizzati per le prove di questo elaborato (ASJsrl, 2021)

Si può notare come a 3 bar, entrambi gli ugelli sulla carta dovrebbero garantire un getto caratterizzato da un getto fine, mentre a pressioni inferiori l'ugello a ventaglio dovrebbe garantire un getto con gocce "medie", invece per l'ugello a cono pieno non vengono fornite informazioni ulteriori.

3.4.4. Differenza tra VMD catalogati e ottenuti

Si precisa che i VMD che verranno ottenuti in questo elaborato (capitolo 7), risulteranno decisamente più alti rispetto ai VMD riportati in tabella 3; questo avviene perché per quanto riguarda i valori riportati nel catalogo, sono state effettuate prove specifiche sulle singole gocce dello spruzzo quando questa è ancora in volo, mentre le prove effettuate in questo capitolo avevano lo scopo di analizzare il getto generale con tecnologie più basiche. Inoltre, l'impatto della goccia sul foglio, porta a delle modifiche sostanziali del diametro della goccia che si espande subito dopo il contatto. Gli errori che quindi possono verificarsi nelle prove sperimentali sono:

- Impatto della goccia sul foglio: al capitolo 6.5. si illustra come si è provato a compensare quest'impatto tramite l'utilizzo dello spread factor;
- Coalescenza delle gocce: le gocce sul foglio tendono a unirsi fra loro, risultando così al software un'unica grande goccia invece che tante piccoline.
- Sovrapposizione delle gocce, dovuta alla staticità delle prove.
- Analisi generale delle gocce invece che di una singola goccia.
- Nelle prove con fogli verticali, le gocce tendono a scivolare sul foglio verso il basso, allungando ulteriormente l'impronta.

3.5. Serbatoio

Il serbatoio utilizzato in laboratorio è diverso dai serbatoi a vescica anti-sloshing mostrati nel capitolo precedente. Innanzitutto, il serbatoio utilizzato è uno unico e non sono due come nel modello del drone e poi è un serbatoio non anti-sloshing.

Il serbatoio utilizzato che è stato utilizzato nella fase sperimentale è un vaso di espansione Caleffi, della serie 5557. Le specifiche tecniche, le masse e gli ingombri sono riportati in tabella 4:

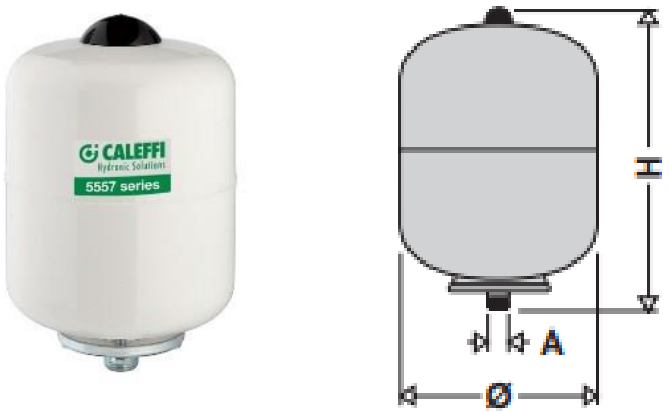


Figura 31: serbatoio Caleffi 5557 (Caleffi, s.d.)

Codice	555708
Capacità	8 litri
Tipologia	Membrana
Pressione massima di esercizio	10 bar
Pressione di precarica	2,5 bar (modificabile)
Massa	2,1 kg
Attacco	3/4''
Diametro Ø	230 mm
Altezza H	305

Tabella 4: caratteristiche serbatoio Caleffi 5557 (Caleffi, s.d.)

Anche questo serbatoio è un serbatoio a vescica, cioè al suo interno è diviso in due parti separate da una membrana: nella parte interna è presente dell'aria (con apposita valvola per la regolazione della pressione), mentre nella parte esterna è presente il liquido da mandare al resto del circuito. Con questa configurazione, il liquido esce dal serbatoio sia grazie all'effetto della pressione dell'aria sul liquido, sia per effetto gravità (dato che il serbatoio è stato montato nella parte alta, per simulare correttamente il comportamento del drone). Il serbatoio utilizzato in laboratorio non corrisponde ai serbatoi mostrati nel primo capitolo: questo serbatoio non è anti-sloshing e alla prova di scuotimento subisce il movimento del

serbatoio, mentre i due serbatoi a membrana della CIMM non dovrebbero risentire particolarmente di questo fenomeno.

Figura 32: serbatoio a membrana (https://www.varem.com)

3.6. Simulatore di vigneto

Il simulatore di vigneto riprodotto in laboratorio è stato costruito sulla base del simulatore illustrato nel capitolo 2, del quale si riportano nuovamente le quote.

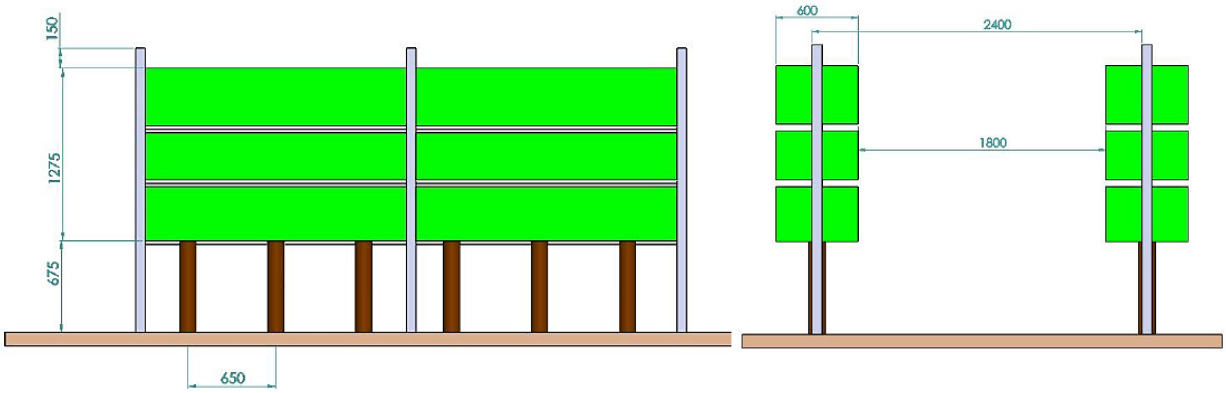


Figura 33: modello Solidworks del vigneto (Persico, 2020)

In laboratorio è stata riprodotta solamente la parte di interesse del vigneto, ovvero quella coperta dalle foglie, mentre è stata esclusa la parte inferiore con i tronchi. Le quote di riferimento significative per l'applicazione sono l'altezza di 1275 mm e la larghezza di 600 mm del filare. Per ricostruirlo in laboratorio in modo semplice ed efficace si è scelto di utilizzare due Europallet (1200 x 800 mm), distanziati da un asse di legno di larghezza 600 mm. In figura 34 si riporta il risultato del simulatore di vigneto

Figura 34: simulatore di vigneto realizzato in laboratorio

3.7. Carta Fotografica

Per analizzare gli spruzzi emessi dagli ugelli, si utilizzano dei fogli di carta fotografica. Questo tipo di carta è stata scelta per la sua capacità di non deformarsi a causa dell'assorbimento del liquido, cosa che invece accade su altre tipologie di carta come, ad esempio, la carta comune o la carta da imballaggi. Inoltre, la scelta di utilizzare dei fogli estesi e non delle cartine idro-sensibili è dettata dal fatto che lo studio deve essere effettuato sull'intera impronta del getto e non su piccole superfici di carta.

La tipologia di carta utilizzata per tutte le prove è la carta fotografica "IJM260 Instant Dry Photo Paper, Gloss" prodotta da Canon®, con grammatura pari a 190 g/m^2, come indicato dall'etichetta mostrata in figura 35. I rotoli di questo tipo di carta hanno una larghezza di 914 mm e sono lunghi 30 m e quindi sono poi opportunamente ritagliati in base alle dimensioni della superficie da analizzare.

Figura 35: dati tecnici carta fotografica

Figura 36: carta fotografica posizionata sul simulatore di vigneto

3.8. Colorante

Per rendere possibile lo studio del getto impresso sulla carta, si è utilizzato un getto di acqua e colorante: in questo modo il software utilizzato per lo studio del getto riesce a identificare le impronte delle gocce, ben più scure rispetto al foglio di carta fotografica. Il colorante utilizzato corrisponde a *acid blue 9 – 85%* fornito da Novema in una soluzione di 50 grammi di colorante per litro d'acqua. In figura 37 è riportata una fotografia della bottiglia di colorante comprensiva di etichetta.

Figura 37: colorante utilizzato

3.9. Banco prova completo

Tutti i componenti appena descritti sono poi assemblati per formare il banco prova finale, del quale si riportano la ricostruzione su Solidworks (sia il modello 3D che due proiezioni con relativa tabella riassuntiva dei componenti) e le fotografie del banco effettivo: le foto del banco prova in laboratorio illustrano anche la protezione in plastica esterna al banco, necessaria al fine di evitare di sporcare il laboratorio e di isolare il circuito dalle possibili correnti d'aria che potevano circolare nei corridoi del laboratorio.

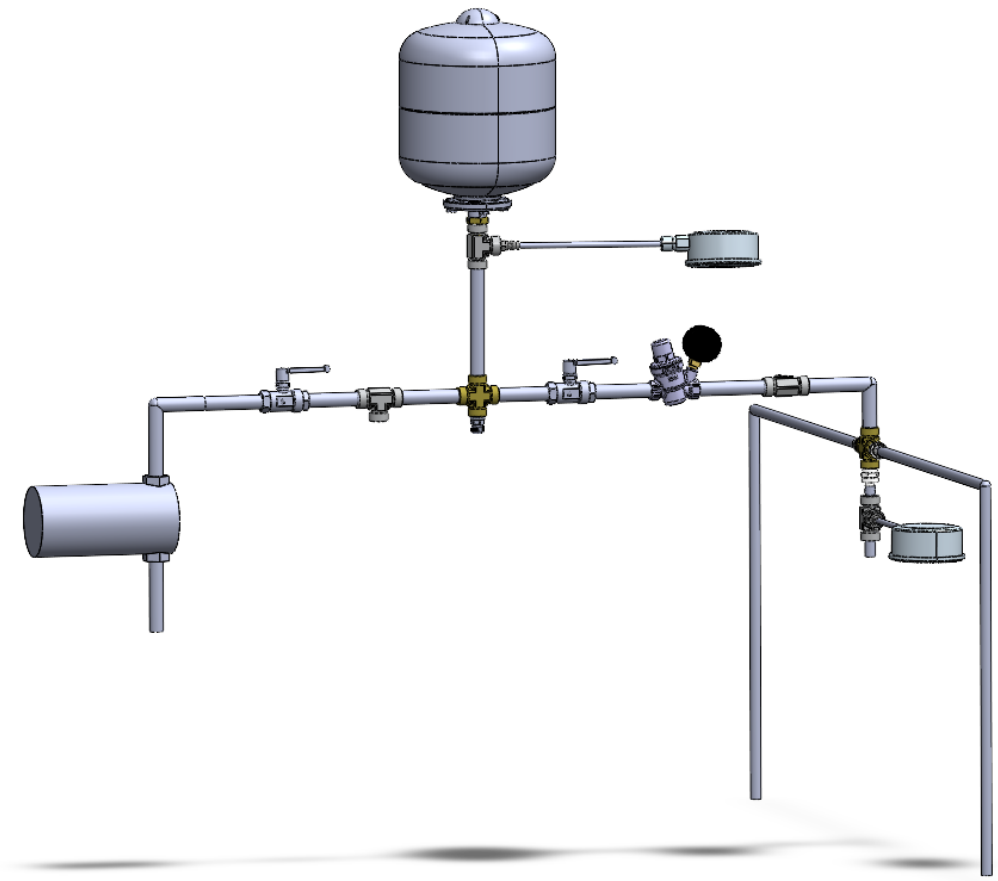


Figura 38: modello 3D del banco prova completo

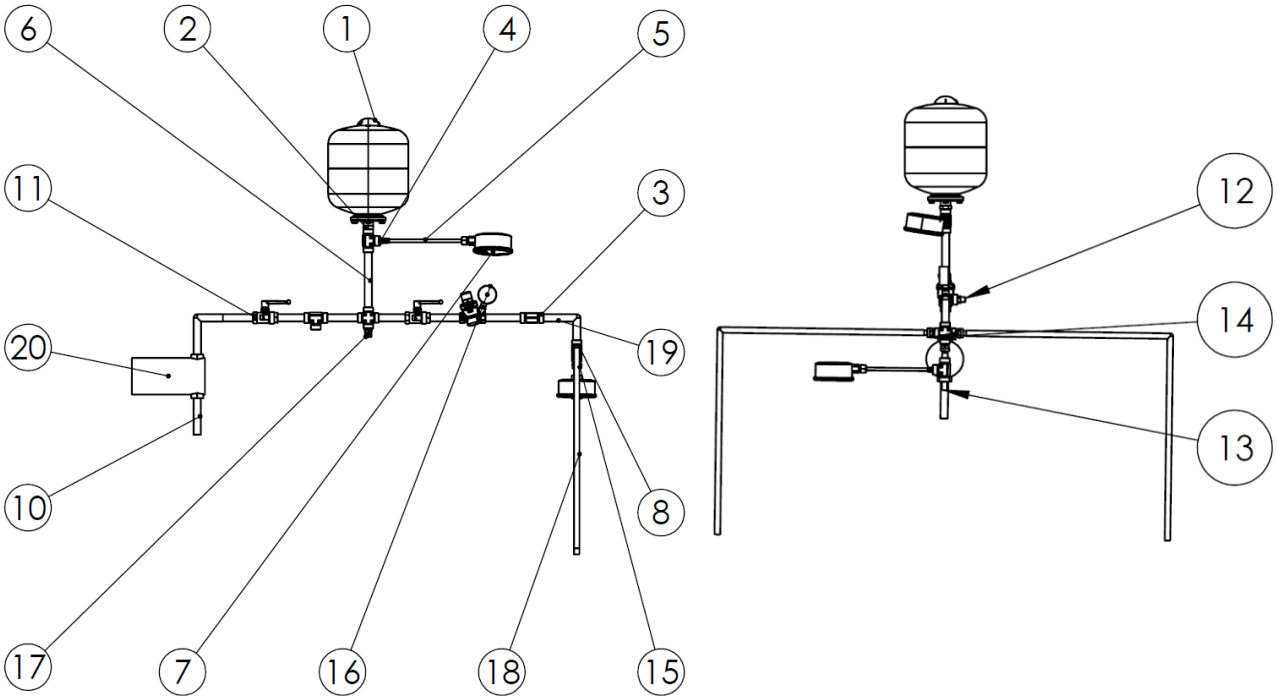


Figura 40: proiezioni del modello con bollatura

Num. articolo	Num. parte	Descrizione	Quantità
1	serbatoio	Serbatoio	1
2	3_nipple_l-5pmr4	Adattatore 1/2"M - 3/4" F	1
3	8_tee_316-4pth4	Raccordo a T 1/2"	4
4	15_kk130p-01f	Attacco rapido pneumatico	2
5	tubo_manometro	Tubo per il manometro	2
6	tubodicollegamento	Tubo di collegamento	1
7	14_7075651	Manometro	2
8	2_cross_l-4pxh4	Raccordo a croce 1/2"	2
9	5_pipe_xp-tub1296	Tubo filettato	1
10	tubocircuito	Tubi metallici del circuito	7
11	4_0402_13_21	Valvola di intercettazione 1/2"	2
12	11_1864_14_13	Adattatore 1/2"M-1/4"F	1
13	tubougellocentrale	Tubo collegamento ugello centrale	1
14	0134_62_21_01	Attacco rapido tubo	3
15	0134_62_21_02	Attacco rapido tubo	3
16	533241 (stp).stp	Regolatore di pressione	1
17	7_valvigrosco508041 (STP).stp	Valvola di sfogo dell'aria	1
18	tubougellolaterale	Tubo collegamento ugello laterale	2
19	tubocircuito2	Tubo di collegamento ugelli-circuito	2
20	pompa	Pompa	1

Figura 39: legenda dei pezzi utilizzati

Infine, come detto, si riporta una foto del banco prova effettivamente costruito in laboratorio, dove si vede anche la protezione esterna in plastica contro gli schizzi:

Figura 41: banco prova in laboratorio

4. Capitolo 4: Presentazione delle prove da effettuare

Ora che è stato illustrato il banco prova in tutti i suoi componenti, è possibile iniziare a realizzare prove su di esso. I tipi di prova effettuati sul circuito sono essenzialmente di due tipologie:

- Prove di riempimento e svuotamento del serbatoio
- Prove di spruzzo su carta fotografica

Le prime prove permettono di capire quanto tempo è necessario a caricare il serbatoio al variare delle condizioni (pressione di precarica, volume da caricare), e successivamente quanto tempo il serbatoio ci mette a svuotarsi completamente, il che indica per quanto tempo il drone riesce a spruzzare il liquido fitoiatrico sulle piante. Per queste prove non è necessario l'utilizzo di carta fotografica e pertanto gli ugelli scaricano direttamente in un contenitore di raccolta per il liquido. La geometria del circuito è ininfluente, in quanto l'unica cosa importante è che tutti e tre gli ugelli siano aperti e funzionino correttamente, ma non è importante come sono posizionati.

Le seconde prove, invece, permettono di analizzare le gocce emesse in determinate condizioni di pressione, e sono dipendenti dalla geometria del banco prova: ad esempio, variando l'angolo alpha di inclinazione degli ugelli laterali, l'impronta lasciata da questi ultimi sul foglio sarà diversa da quella lasciata avendo imposto un altro angolo. Analizzando poi le immagini tramite un software apposito presentato in seguito, è possibile calcolare alcuni parametri caratteristici del getto ed effettuare anche un confronto di questi ultimi con la letteratura.

5. Capitolo 5: Prove di riempimento e svuotamento

Le prime prove effettuate sul circuito sono state quelle di riempimento e svuotamento del serbatoio con già tutti gli ugelli in posizione operativa. Per non consumare inutilmente carta fotografica e colorante queste prove si sono effettuate mediante l'utilizzo di acqua non colorata e con l'installazione di contenitori all'uscita degli ugelli, in modo tale da non disperdere tutto il liquido in laboratorio.

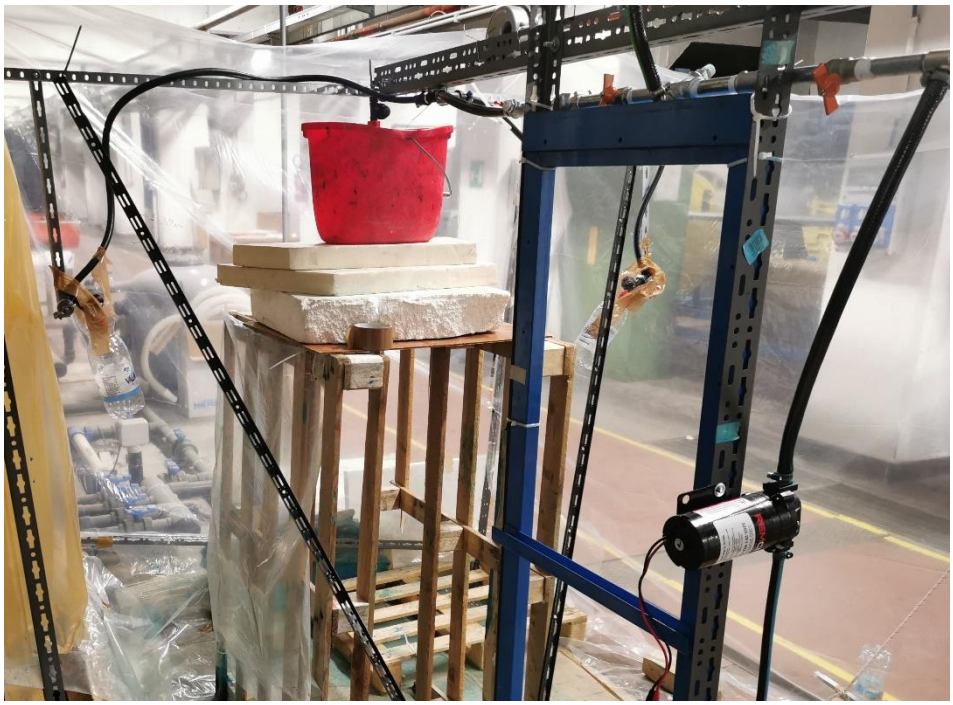


Figura 42: configurazione del banco prova per le prove di riempimento e svuotamento

5.1. Prove di riempimento

Le prove di riempimento sono state effettuate tenendo chiusa la valvola d'intercettazione verso gli ugelli mentre quella posta tra pompa e serbatoio è tenuta aperta.

Nella procedura sperimentale per prima cosa si abbassa il valore della pressione presente all'interno della vescica d'aria del serbatoio a un valore vicino a quello della pressione ambiente; questa procedura è necessaria per non compromettere il lavoro della pompa, che ha una pressione massima di utilizzo di appena 4 bar e anche a valori più bassi fa fatica a lavorare correttamente.

Come seconda operazione si apre la valvola di intercettazione tra pompa e serbatoio, permettendo così al liquido mandato dalla pompa di passare e riempire il serbatoio. L'attivazione della pompa avviene tramite l'interruttore separato dal trasformatore, in modo che sia facilmente raggiungibile dal circuito. Infatti, essendo il trasformatore un elemento elettrico, si è preferito mantenerlo il più distante possibile dalle parti con acqua.

Figura 43: alimentazione pompa e recipiente dal quale preleva l'acqua

La pompa preleva il liquido da una tanica contenente una quantità nota di acqua, che viene mandata al serbatoio dopo l'attivazione della pompa. Durante il trasferimento di acqua si attiva un cronometro (o tramite un orologio apposito o mediante un telefono cellulare) per misurare il tempo necessario a mandare la quantità di acqua desiderata al serbatoio. Con i tempi misurati si costruisce un semplice grafico che relaziona il volume mandato al serbatoio e il tempo impiegato, e la relazione risultante è simile a una proporzione diretta, come ci si attendeva.

Tempo di riempimento (s)	Volume (l)
45	3
67	4
79	5
85	5.3

Tabella 5: elenco prove di riempimento

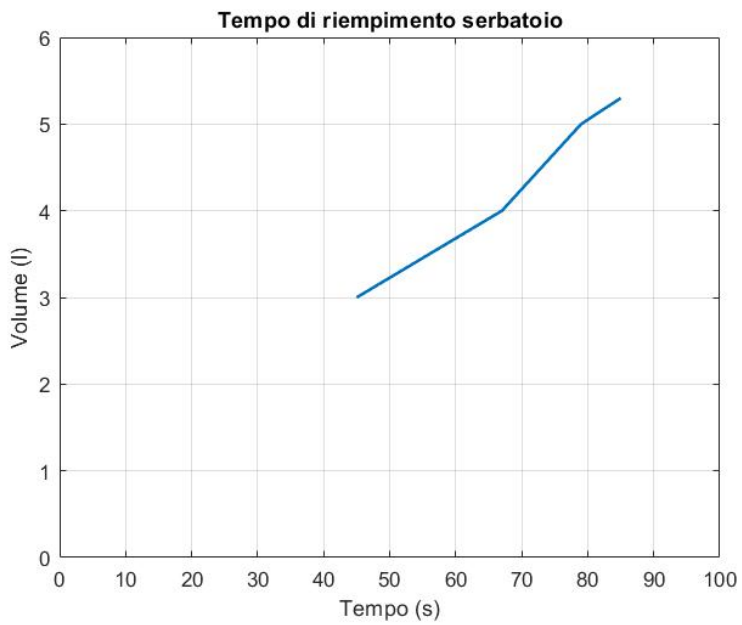


Figura 44: relazione tra volume e tempo di riempimento

Dopo aver riempito il serbatoio con il volume desiderato di acqua si chiude la valvola di intercettazione posta tra pompa e serbatoio e, tramite il compressore, si porta la parte contenente aria nel serbatoio alla pressione scelta per quella prova, in modo tale da aumentare anche la pressione del liquido (equilibrio delle pressioni all'interno del serbatoio stesso). Durante questa operazione, si è notato come la pressione segnalata dal manometrino a bordo del compressore fosse maggiore rispetto a quella segnalata dal manometro posto all'ingresso del liquido del serbatoio.

In linea teorica, queste due pressioni dovrebbero avere lo stesso valore numerico, ma nella pratica questo non risulta veritiero. Le cause potrebbero essere la scarsa precisione del manometro a bordo del compressore, oppure la presenza delle bolle d'aria che si possono formare nel liquido, rendendo molto imprecisa la misura della pressione; inoltre, il manometro per misurare la pressione del liquido è posto a valle del serbatoio e non al suo interno, il che potrebbe compromettere la riuscita della misurazione.

5.2. Prove di svuotamento del serbatoio

Una volta che il serbatoio è caricato con il volume desiderato alla pressione scelta, si può procedere all'apertura della valvola di intercettazione per portare il liquido agli ugelli. La prima cosa che si nota immediatamente dopo l'apertura della valvola è un brusco calo della pressione nel serbatoio, che perde istantaneamente qualche decimo di bar: questo calo è naturale perché il liquido fluisce molto rapidamente verso gli ugelli, andando a creare un nuovo equilibrio del sistema, a una pressione un po' inferiore.

Appena aperta la valvola si imposta inoltre anche la pressione del regolatore di pressione, che determina la pressione agli ugelli. Quest'ultima pressione è misurata anche con un manometro posto dopo la diramazione dei tre rami che portano agli ugelli, in modo tale da verificare eventuali perdite di pressione dovute alla diramazione; la lettura di questo livello di pressione è risultata sempre coerente con il valore impostato tramite il regolatore di pressione, il che permette di concludere che le perdite dovute alla diramazione sono trascurabili.

Durante lo svuotamento si sono misurati i tempi necessari a raggiungere determinati livelli di pressione (tendenzialmente sono stati misurati intervalli di pressione di 0,25 bar) e successivamente sono stati riassunti in una tabella. Inoltre, quando i contenitori posti sotto agli ugelli risultano colmi, si procede a misurare il liquido espulso fino a quel punto, chiudendo prima opportunamente la valvola: in questo modo è stato possibile anche analizzare quanto liquido viene espulso dal circuito ad alte e basse pressioni.

Figura 45: intercettazione del fluido degli ugelli

5.2.1. Parametri variabili per le prove di svuotamento

In questa sezione si analizzano i risultati estrapolati dalle prove appena descritte. I parametri principali che influenzano il tempo di svuotamento del serbatoio sono tre:

- Volume del liquido mandato all'interno del serbatoio;
- Pressione del liquido nel serbatoio;
- Pressione impostata dal regolatore di pressione in ingresso agli ugelli.

Il volume totale del serbatoio è di 8 litri, ma come detto precedentemente la parte superiore ha all'interno aria compressa e quindi occupa una buona parte del volume; per questo motivo si è scelto di non riempire il serbatoio con non più di 5 litri circa, in modo da garantire il corretto funzionamento del serbatoio stesso (eccetto una singola prova effettuata con 7 litri di liquido).

La pressione all'interno del serbatoio può essere al massimo di 10 bar (come definito dal produttore del serbatoio, che indica 10 bar come la pressione massima di esercizio), ma vista l'applicazione sul drone in volo e l'incapacità del compressore di raggiungere pressioni così elevate non si è superata la pressione di 4 bar.

L'ultimo parametro caratterizzante è la pressione agli ugelli, regolabile tramite il riduttore. La pressione minima ottimale necessaria agli ugelli affinché lo spruzzo sia ottimale è di 3 bar (come analizzato nelle tesi precedenti di Antonio Frate (Frate, 2022) e Tobia Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022)), e per questo per qualche prova è stata mantenuta a questo valore. C'è però anche da tenere in considerazione che più la pressione agli ugelli è elevata, più il volume del liquido espulso dal serbatoio diminuisce rapidamente, e quindi l'autonomia di volo del drone diminuirebbe; per questo motivo per molte prove si è diminuita di 0,5/1 bar la pressione al regolatore, aumentando così l'autonomia di volo del drone.

5.2.2. Elenco delle prove effettuate

Nella seguente tabella sono riportate sinteticamente tutte le prove effettuate; si precisa che i codici delle prove si riferiscono solo all'ordine cronologico in cui esse sono state realizzate e non hanno altre motivazioni. Inoltre, per ogni prova sono stati misurati anche tempi e pressioni intermedie, non riportate nella seguente tabella ma utilizzate successivamente per la realizzazione dei grafici.

Prova	Volume (l)	Pressione serbatoio del liquido (bar)	Pressione al riduttore (bar)	Tempo di svuotamento (s)	Tempo di raggiungimento pr <2 bar (s)
1	5,1	4	2	405	142
2	5	3,5	2	422	112
3	5,4	3,5	2	537	144
4	5,3	4	2	405	158
5	7	4	2	/	60
6	4,6	4	2	365	157
7	3,2	4	2	199	199
8	4	4	2	240	196
9	4	3,5	2	270	146
10	4	4	3	176	157
11	5	4	2,5	269	160
12	4	4	2,5	214	172
13	3	4	2,5	168	168

Tabella 6: elenco prove di svuotamento

Nella prova numero 5 non è riportato il tempo di svuotamento perché è stato fin da subito evidente che la prova non aveva portato dei risultati soddisfacenti, e quindi si è interrotta prima del suo termine.

5.2.3. Confronto dell'incidenza del volume sui tempi di svuotamento

In figura 46 sono riportati gli andamenti della pressione all'interno del serbatoio in funzione del tempo di svuotamento di prove aventi tutte pressione iniziale all'interno del serbatoio di 4 bar e pressione del riduttore di pressione di 2 bar.

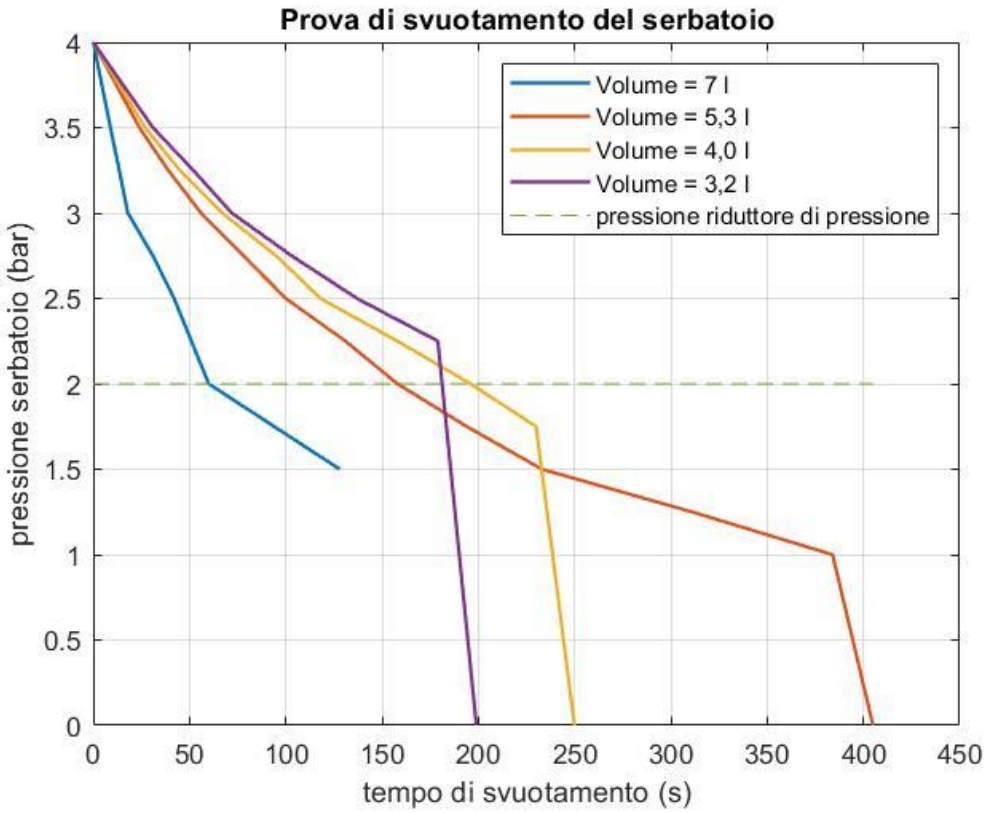


Figura 46: relazione tra tempi e pressione nel serbatoio con volumi variabili

Osservando il grafico appena riportato si nota subito come le tre curve in alto seguano lo stesso andamento, mentre la curva blu abbia un andamento con maggiore tendenza a decrescere. La curva blu, infatti, rappresenta la prova effettuata riempiendo il serbatoio con quanto più liquido possibile (7 litri) che come già accennato in precedenza non aveva portato a risultati soddisfacenti; difatti, la pressione all'interno del serbatoio si abbassa drasticamente in pochissimo tempo, non facendo lavorare gli ugelli ad una pressione sufficientemente alta: la pressione di 2 bar corrispondente alla regolazione del riduttore viene superata in circa 60 secondi, troppo poco per l'applicazione reale, che rende inutili anche i litri in più caricati.

Analizzando le restanti curve, si nota come più il volume inziale è basso, più il decremento di pressione è minore e quindi il tempo necessario a raggiungere il valore soglia del riduttore di

pressione (2 bar) è maggiore: ciò porta a preferire il serbatoio riempito con meno liquido. Si nota inoltre come per un volume iniziale di 3,2 litri non venga mai raggiunta la pressione di 2 bar, che quindi indica che agli ugelli arriverà sempre una pressione consona al loro corretto funzionamento. Allo stesso modo però, caricare poco il serbatoio, significa perdere autonomia di volo del drone: infatti comparando i casi con 5,3 litri di volume iniziale e 3,2 litri, si nota come nel primo caso il tempo necessario allo svuotamento è addirittura doppio rispetto al secondo caso, dato da non sottovalutare vista l'applicazione. È anche vero che per gran parte del tempo il caso con 5,3 litri di volume iniziale lavora con una pressione minore ai 1,7/1,5 bar, limite minimo per un accettabile spruzzo degli ugelli e quindi risulterebbe anche un po' dannoso per le piante.

Per questi motivi si ritiene la prova più soddisfacente tra quelle analizzate la prova gialla (corrispondente a un volume iniziale di 4,0 litri), che garantisce una pressione di alimentazione agli ugelli sempre superiore a 1,7 bar e un'autonomia di oltre 4 minuti. Considerando che nel drone saranno posizionati due serbatoi di questa taglia significa avere una durata stimata che supera gli 8 minuti, che garantisce di avere un'ottima autonomia, in linea con l'autonomia del drone.

5.2.3.1. Modifica della pressione del riduttore

La stessa analisi appena effettuata è stata realizzata anche per il caso con pressione al riduttore di pressione di 2,5 bar, come si mostra in figura 47:

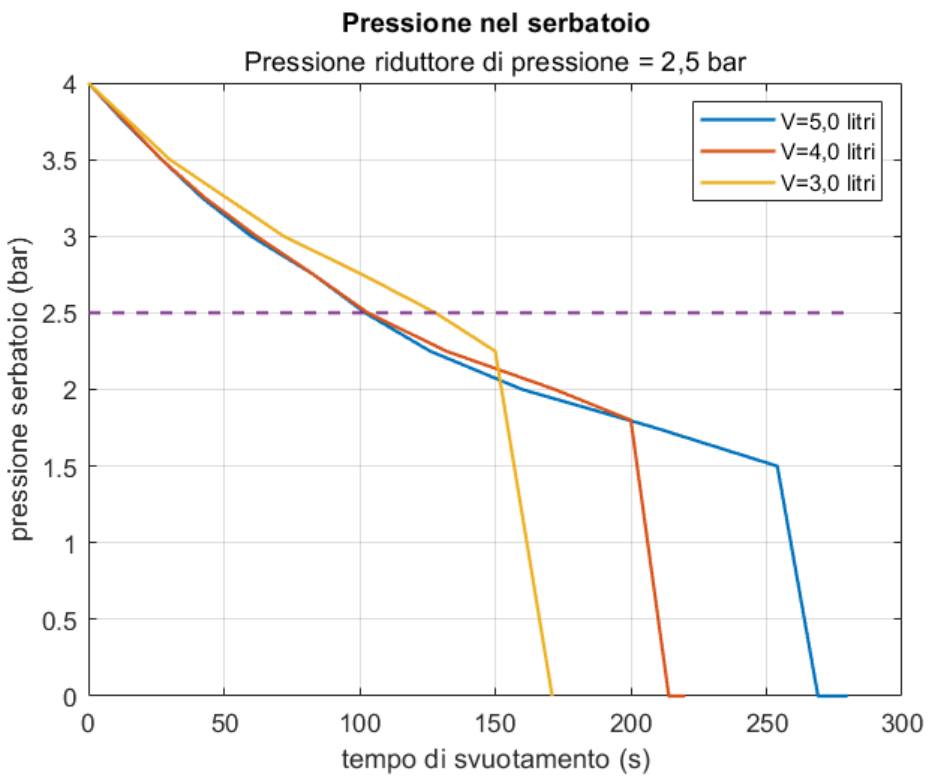


Figura 47: prove con pressione al riduttore a 2,5 bar

Le considerazioni su questo grafico sono le stesse appena effettuate per il caso con p_{rid} = 2 bar, con la sola differenza che in questo caso, essendo la pressione maggiore agli ugelli, i tempi di svuotamento risultano essere in generale inferiori. In generale si vede ancora di più come più il volume iniziale è piccolo, più le pressioni agli ugelli rimangono alte, anche se diminuisce sensibilmente la durata, esattamente come nel caso precedente. Anche in questo caso il volume di 4 litri risulta essere il migliore, perché unisce i vantaggi delle altre due curve.

5.2.4. Confronto dell'incidenza della pressione del riduttore sui tempi di svuotamento

In figura 48 sono riportati gli andamenti di tre curve aventi pressione all'interno del serbatoio di 4 bar e volume iniziale di 4 litri, ma con pressione imposta al riduttore di pressione variabile.

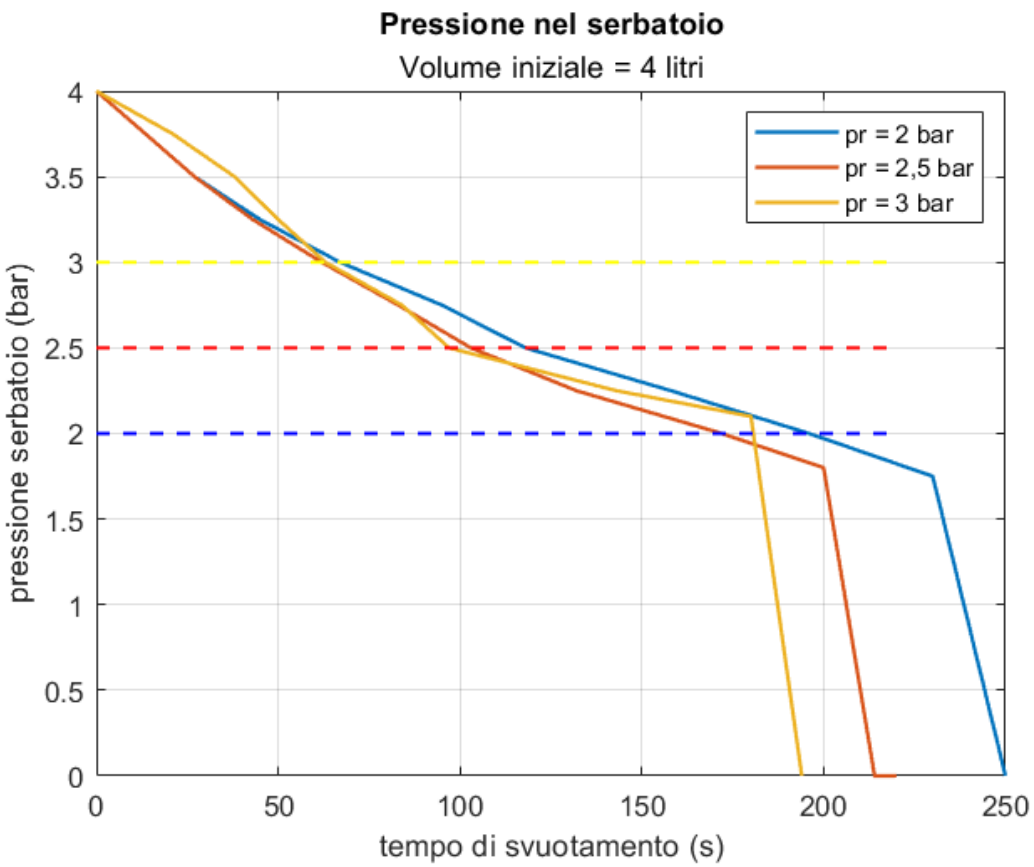


Figura 48: relazione tra tempi e pressione nel serbatoio con pressione al riduttore variabile

Osservando l'andamento delle tre curve si nota come esso sia abbastanza equivalente per tutte le tre prove analizzate. Quello che cambia è il tempo di svuotamento, che aumenta più la pressione del riduttore si riduce: questo fenomeno era atteso, dal momento che più la pressione fornita agli ugelli è maggiore, maggiore è il liquido inviato (e quindi espulso dal serbatoio) e di conseguenza minore è il tempo di autonomia. Un altro dato interessante da osservare è dopo quanto tempo la pressione del serbatoio scende sotto la soglia imposta dal riduttore di pressione, ovvero il momento dal quale serbatoio e ugelli hanno la stessa

pressione. Nel primo caso (pressione del riduttore a 3 bar) il tempo necessario a scendere sotto la soglia dei 3 bar è molto piccolo (per la precisione 63 secondi), ma comunque per il resto del tempo agli ugelli arriva una pressione sempre maggiore di 2 bar, che quindi garantisce prestazioni adeguate al sistema.

Nel caso della curva blu (pressione del riduttore a 2 bar) il tempo necessario alla pressione del serbatoio a raggiungere il valore impostato dal riduttore è ben superiore (per la precisione 193 secondi, circa il triplo del primo caso), il che indica che gli ugelli riescono a spruzzare alla pressione definita in partenza per un tempo maggiore a prima, anche se questa pressione non garantisce allo spruzzo i parametri che sono garantiti a 3 bar. Rispetto al primo caso aumenta anche l'autonomia del drone, aspetto assolutamente non da sottovalutare quando si decide di montare il sistema sul drone reale. La pressione, anche dopo che scende sotto i 2 bar, non scende mai sotto i 1,75 bar, e quindi, come si analizzerà dopo, i parametri dello spruzzo sono ancora interessanti; per questo motivo forse quest'ultima soluzione è preferibile, se ci si accontenta dei parametri dello spruzzo a 2 bar.

Il caso della curva rossa, corrispondente a una pressione del riduttore di 2,5 bar, è un caso intermedio tra i due analizzati finora, e unisce i vantaggi dei due casi: garantisce per la prima parte del volo una pressione agli ugelli maggiore, il che ottimizza lo spruzzo, e allunga l'autonomia di volo del drone.

5.2.5. Confronto dell'incidenza della pressione del serbatoio sui tempi di svuotamento

Quest'ultima analisi permette di confrontare il comportamento nel tempo della pressione del serbatoio in funzione della pressione impostata inizialmente; le prove sono state effettuate mantenendo costante il volume iniziale delle prove (4 litri) e la pressione al riduttore, impostata a 2 bar.

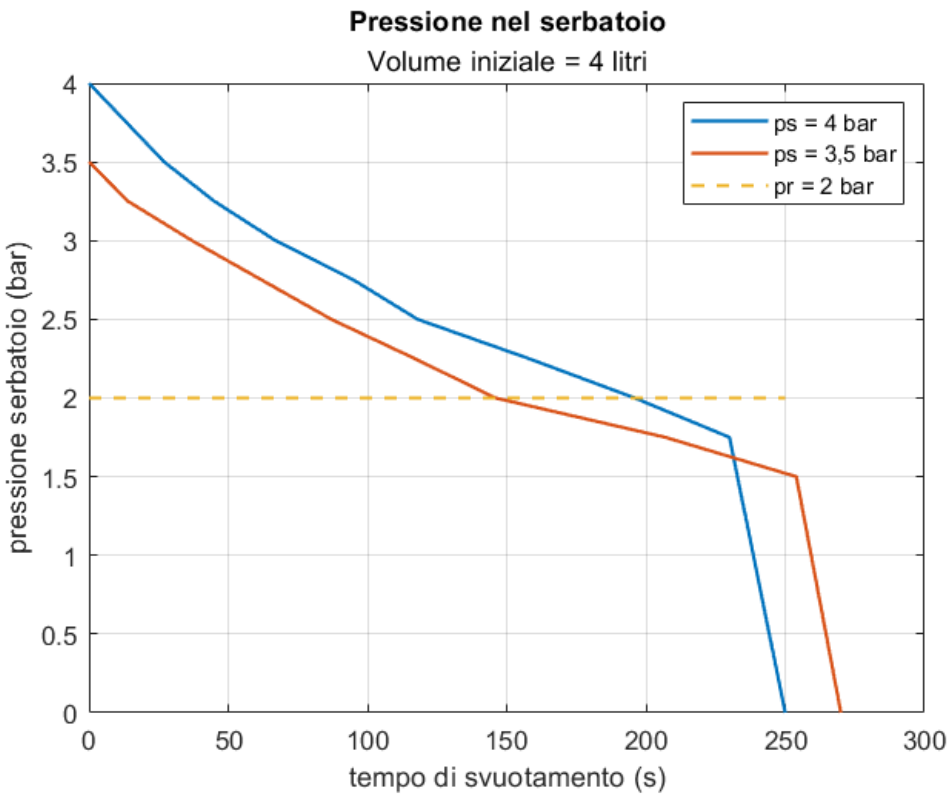


Figura 49: relazione tra tempi e pressione nel serbatoio con pressioni iniziali variabili

L'effetto di questo parametro sul sistema non è particolarmente interessante e, come ci si poteva aspettare già in precedenza, più la pressione nel serbatoio è alta, più il sistema ha un comportamento migliore: infatti anche se il tempo di svuotamento totale è leggermente maggiore per il caso con pressione minore (270 secondi contro 251 secondi), i due tempi sono abbastanza equiparabili; il vantaggio della curva corrispondente a una pressione di 4 bar è che per praticamente tutto il tempo di utilizzo la pressione garantita agli ugelli è quella del riduttore (2 bar), che garantisce quindi uno spruzzo migliore e più efficiente.

Se fosse possibile, sarebbe interessante capire il comportamento che si avrebbe caricando il serbatoio del laboratorio a una pressione maggiore (come ad esempio 5 bar): seguendo la logica appena descritta, potrebbe ridursi un po' la durata complessiva, ma si potrebbero garantire pressioni maggiori agli ugelli, e quindi parametri realisticamente migliori dello spruzzo. Per evitare di rischiare di danneggiare l'attrezzatura del laboratorio però, si è scelto di non aumentare le pressioni eccessivamente, e quindi ci si è fermati a 4 bar.

5.2.6. Grafici illustranti la pressione agli ugelli

In questa sezione, si riportano due grafici indicanti la pressione letta dal manometro a monte dell'ugello centrale, e che quindi corrisponde alla pressione su tutti gli ugelli. Si precisa che l'andamento è orizzontale finché la pressione nel serbatoio non scende sotto al valore impostato dal riduttore di pressione mentre dopo questo momento segue perfettamente l'andamento della pressione del serbatoio. Per questo motivo non sono ritenuti particolarmente significativi dal punto di vista dello studio, ma vengono comunque riportati per completezza.

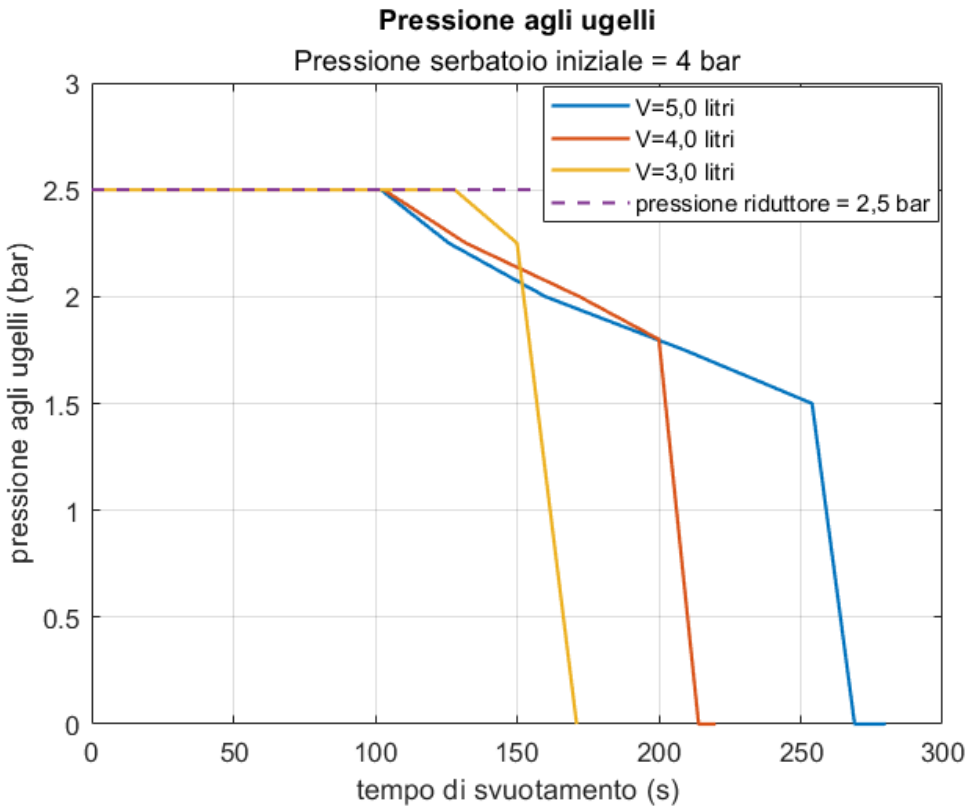


Figura 50: relazione tra tempi e pressione agli ugelli con volumi variabili

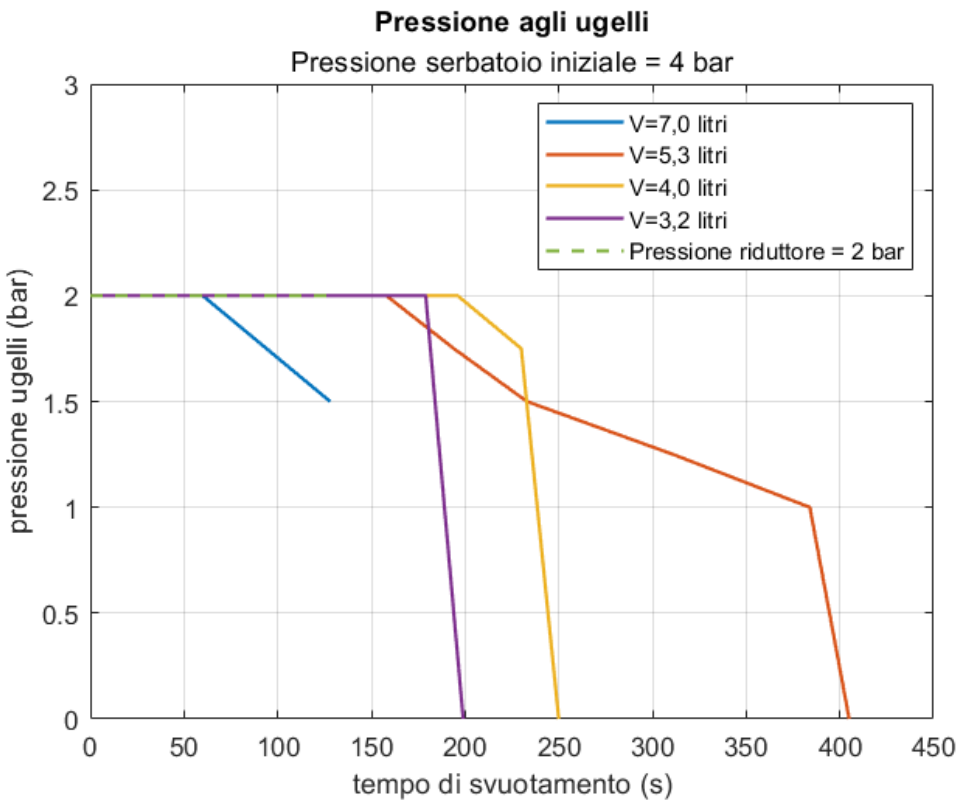


Figura 51: relazione tra tempi e pressione agli ugelli con volumi variabili

5.3. Riepilogo risultati

In conclusione a queste prove di svuotamento si possono ricavare delle preliminari conclusioni: si è notato come sia più vantaggioso avere dei serbatoi riempiti fino a circa metà con il liquido (4 litri sugli 8 massimi del serbatoio) piuttosto che dei serbatoi riempiti fino a quasi il massimo della loro capacità; questo fenomeno è causato dell'incapacità dell'aria compressa di far fuoriuscire correttamente il liquido nel caso in cui quest'ultimo riempia troppo il serbatoio, rendendo lo spazio dell'aria troppo ristretto, con l'effetto di perdere immediatamente tutta la pressione all'interno del serbatoio. L'ideale sarebbe avere dei serbatoi caricati intorno ai 3 litri (sempre considerando la taglia di 8 litri come quella analizzata in laboratorio), così da mantenere agli ugelli delle pressioni ottime che ottimizzino i parametri dello spruzzo lungo tutta la durata del volo; il problema è che l'autonomia del drone in questa condizione sarebbe troppo limitata e quindi servirebbe rifornire il drone di liquido troppo spesso. Per trovare una condizione che riuscisse ad avere un'autonomia sufficiente e allo stesso tempo che garantisse un accettabile range di pressioni agli ugelli per tutto il volo, si è optato per dei volumi intermedi, intorno ai 4 litri appunto.

Queste considerazioni fanno pensare che la soluzione pensata inizialmente di avere due serbatoi invece che uno solo, è valida, in quanto si possono riempire entrambi fino a metà della loro capacità, piuttosto che averne uno solo riempito eccessivamente.

Per quanto riguarda la pressione al riduttore di pressione si è notato come impostarla a 3 bar (per far lavorare gli ugelli alla pressione ottimale) sia abbastanza inutile, in quanto tale pressione è mantenuta per poco tempo e inoltre l'autonomia di volo è molto più bassa rispetto agli altri casi. Ovviamente impostandola a 2 bar aumenta l'autonomia ma potrebbero peggiorare i parametri dello spruzzo, mentre impostandola a un valore intermedio di 2,5 bar si potrebbe trovare una via di mezzo tra le due soluzioni. Per questa scelta si rimanda l'analisi ai capitoli successivi, dove si analizzano lo spruzzo e tutti i suoi parametri fondamentali.

6. Capitolo 6: Metodologia delle prove di spruzzo e definizione parametri

In questa sezione si vuole illustrare il metodo e la logica seguiti per effettuare le prove di spruzzo, l'elaborazione tramite software delle foto delle prove stesse e infine l'analisi dei risultati mediante i parametri caratteristici.

Per chiarire il metodo seguito, si riporta uno schema riassuntivo del processo:

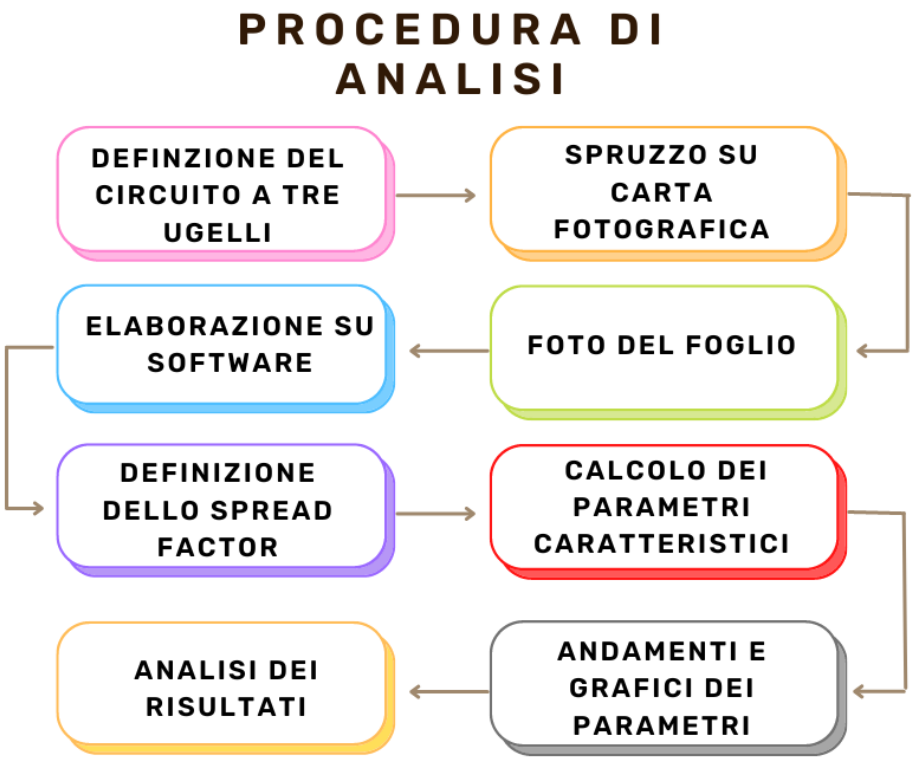


Figura 52: procedura di analisi seguita

Di seguito si riportano tutti i particolari dei passi seguiti nello schema.

6.1. Definizione del circuito a tre ugelli

In questa fase si imposta il banco prova illustrato nel capitolo precedente con i parametri desiderati, impostando i parametri geometrici (come l'angolo alpha di inclinazione degli ugelli laterali o le distanze degli ugelli dal foglio) e i parametri fisici, come la pressione nel serbatoio, la pressione agli ugelli e il volume da caricare nel serbatoio; una volta impostati tutti i parametri correttamente si può aprire la valvola d'intercettazione che porta agli ugelli e iniziare lo spruzzo.

Possibili errori di questo passaggio: gli strumenti di misura della lunghezza e dell'angolo non sono molto precisi e, dato che sono utilizzati manualmente, possono essere soggetti ad errori dell'operatore; inoltre anche i valori di pressione possono essere imprecisi a causa dei manometri che leggono dei valori di pressione che potrebbero non corrispondere a quella reale, dato che all'interno dei tubi potrebbero crearsi delle bolle d'aria che falsificano i risultati.

6.2. Spruzzo su carta fotografica

Una volta aperta la valvola che permette al liquido di raggiungere gli ugelli, non si registra immediatamente lo spruzzo su carta fotografica, in quanto potrebbe esserci un transitorio iniziale che falsifica i risultati. Inizialmente lo spruzzo degli ugelli è intercettato da contenitori di acqua che raccolgono lo spruzzo prima che esso arrivi al foglio. Quando si toglie il contenitore dagli ugelli si lascia lo spruzzo libero di incidere sulla carta fotografica per circa 0,5 secondi, passati i quali si reintercetta lo spruzzo. Successivamente si lasciano i fogli asciugare per qualche minuto.

Possibili errori di questo passaggio: il tempo di spruzzo, dato che è sotto il controllo dell'operatore, non è molto preciso, in quanto il tempo è molto ridotto; l'influenza del tempo potrebbe causare una variabilità significativa dei risultati, e perciò bisognerà tenerne conto.

6.3. Fotografia del foglio

Una volta che i fogli sono asciugati, si procede a rimuoverli dal simulatore di vigneto e a fotografarli, per permettere poi l'elaborazione.

Possibili errori di questo passaggio: lo strumento utilizzato per fotografare il foglio non ha una risoluzione molto alta, e quindi potrebbe perdere alcuni particolari dello spruzzo. Inoltre, durante la fotografia, ci potrebbero essere delle zone di ombra che poi il software non riesce a interpretare in modo corretto, falsificando i risultati.

6.4. Elaborazione su software

Le elaborazioni delle immagini vengono effettuate su ImageJ, software gratuito che permette di contare e misurare le gocce nell'area desiderata. I parametri di interesse per questo studio sono semplicemente il numero di gocce e l'area delle gocce; con quest'ultimo parametro si ricava un diametro equivalente, che corretto opportunamente con uno spread factor, permette di ricavare il VMD, l'area di copertura e la densità di gocce.

In particolare, l'analisi sulle immagini è stata eseguita su sezioni rettangolari di lati 52x76mm, che corrispondono alle misure standard delle cartine idro-sensibili, in modo da poter confrontate i risultati ottenuti dalle prove su carta fotografica con quelli ottenibili da cartine idro-sensibili. Per gli spruzzi dell'ugello centrale sono state selezionate 9 aree, mentre per quelli laterali (che sono più ampi) sono state prese 12 selezioni. Per automatizzare e

velocizzare questo processo sono state implementate delle macro, ossia dei piccoli codici nel linguaggio di ImageJ che contengono i comandi da eseguire. Di seguito si riportano le macro utilizzate per l'analisi degli ugelli centrali (primo codice) e laterali (secondo codice).

```
#UGELLO CENTRALE
var h=700;
var xcentro=500;
var ycentro=400;
var lscala=80;
var nomefile = "Prova";
var N=9;
var yc=ycentro;
var n_imm;
n_imm=getString("Nome immagine da processare", n_imm);
immagine="D:/POLITO/TESI/spruzzi tre ugelli/Centrali/"+n_imm+".JPG";
open(immagine);
//setTool("line");
waitForUser("Misura la lunghezza della linea di riferimento");
run("Measure");
lscala = getNumber("Lunghezza linea scala: ", lscala);
run("Set Scale...", "distance=lscala known=30 unit=unit");
waitForUser("Misura l'altezza");
run("Measure");
h = getNumber("Altezza: ", h);
//setTool("multipoint");
waitForUser("Seleziona il centro");
run("Measure");
xcentro = getNumber("X centro: ", xcentro);
ycentro = getNumber("Y centro: ", ycentro);
nomefile=getString("Nome file: ",nomefile);
close();
run("ROI Manager...");
for (i=1; i<=N;i++) {
yc=ycentro+h/2-i*h/(N+1);
print(yc);
immagine="D:/POLITO/TESI/spruzzi tre ugelli/Centrali/"+n_imm+".JPG";
open(immagine);
run("Set Scale...", "distance=lscala known=30 unit=unit");
run("Specify...", "width=76 height=52 x=xcentro y=yc centered scaled");
roiManager("Add");
run("8-bit");
setAutoThreshold("Default");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 116);
setOption("BlackBackground", false);
run("Convert to Mask");
run("Watershed");
run("Specify...", "width=76 height=52 x=xcentro y=yc centered scaled");
run("Analyze Particles...", "display clear");
path="D:/POLITO/TESI/spruzzi tre
ugelli/Centrali/"+nomefile+"_"+i+".txt";
saveAs("Results", path);
close();
}
open(immagine);
roiManager("Show All with labels");
```

```
#UGELLI LATERALI
var h=700;
var xcentro=500;
var xcentro=500;
var ycentro=400;
var lscala=80;
var nomefile = "Prova";
var N=12;
var yc=ycentro;
var n_imm;
var hbordo;
n_imm=getString("Nome immagine da processare", n_imm);
immagine="D:/POLITO/TESI/spruzzi tre ugelli/Angolo a 60/"+n_imm+".JPG";
open(immagine);

//setTool("line");
waitForUser("Misura la lunghezza della linea di riferimento");
run("Measure");
lscala = getNumber("Lunghezza linea scala: ", lscala);
run("Set Scale...", "distance=lscala known=30 unit=unit");
waitForUser("Misura l'altezza");
run("Measure");
h = getNumber("Altezza: ", h);
//setTool("multipoint");
waitForUser("Seleziona il centro");
run("Measure");
xcentro = getNumber("X centro: ", xcentro);
ycentro = getNumber("Y centro: ", ycentro);
waitForUser("Misura bordo superiore");
run("Measure");
hbordo=getNumber("Altezza bordo superiore: ", hbordo);
nomefile=getString("Nome file: ",nomefile);
close();
run("ROI Manager...");
for (i=1; i<=N;i++) {
yc=hbordo+(i-1/2)*h/(N);
print(yc-hbordo);
open(immagine);

run("Set Scale...", "distance=lscala known=30 unit=unit");
run("Specify...", "width=76 height=52 x=xcentro y=yc centered scaled");
roiManager("Add");
run("8-bit");
setAutoThreshold("Default");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 116);
setOption("BlackBackground", false);
run("Convert to Mask");
run("Specify...", "width=76 height=52 x=xcentro y=yc centered scaled");
run("Analyze Particles...", "display clear");
path="D:/POLITO/TESI/spruzzi tre ugelli/Angolo a
45"+nomefile+"_"+i+".txt";
saveAs("Results", path);
close();
}
open(immagine);
roiManager("Show All with labels");
```

Analizzando quest'ultimo codice delle prove dell'ugello laterale si riporta una breve lettura del linguaggio, allo scopo di illustrare il suo funzionamento; l'immagine analizzata in questo esempio è un'immagine di un ugello inclinato di 60° rispetto all'asse orizzontale.

- Settaggio dei parametri fondamentali come il numero di selezioni (altri parametri sono solo di riferimento e devono essere modificati dall'utente durante l'esecuzione del programma).
- Apertura dell'immagine in ImageJ tramite il comando "Run Macro".
- Definizione della scala: si misura la traccia di lunghezza nota (segmento di 3 cm disegnato sul foglio) e si riscala di conseguenza l'immagine.
- Misura dell'altezza e definizione del centro (serve a definire dove far partire le selezioni).
- Definizione delle aree di selezione da analizzare: per ogni area di selezione da analizzare si prende un rettangolo di 52x76mm, centrato in (x,y) .
- Conversione in binario a 8 bit.
- Settaggio automatico del valore di soglia (che identifica o bianco o nero).
- Analisi delle particelle.
- Salvataggio dei risultati nel percorso prestabilito.

I file finali sono stati salvati con il formato "Angoloa60Prova25_1", "Angoloa60Prova25_2", …, "Angolo60aProva25_12", dove il numero finale indica il rettangolo analizzato a partire dall'alto.

La stessa logica è stata seguita per l'analisi delle macchie orizzontali, eccetto qualche piccola modifica di linguaggio.

Possibili errori di questo passaggio: il software può interpretare male le zone di ombra dell'immagine e considerarle come gocce, anche laddove in realtà non ce ne sono. Approssimazione di impronte molto irregolari (per esempio causate dalla coalescenza di più gocce o da gocce colanti lungo il foglio verticale) a gocce perfettamente circolari.

6.5. Definizione dello spread factor

Dopo aver ricavato il numero delle gocce e la loro area, si può semplicemente ricavare il diametro equivalente di ogni goccia, approssimando tutte le gocce come delle circonferenze. Questo diametro però non equivale a quello della goccia in volo, perché questa al momento dell'impatto sul foglio si è espansa. Per cercare di limitare questo fenomeno in modo tale che non si falsifichino troppo i risultati, si è introdotto lo **spread factor**. In realtà ci sono molti metodi diversi per correggere questi diametri, illustrati tutti nei lavori precedenti ((Conte, 2022), (Frate, 2022), (Festa Bianchet, 2022)), ma si è scelto di utilizzare questo metodo perché ha mostrato degli ottimi risultati. Il diametro reale corrisponde quindi a:

$$D_{goccia} = \frac{D_{macchia}}{\beta}$$

Per il valore di β ci sono diversi metodi per calcolarlo ma, per dare continuità al lavoro del tesista precedente, si è utilizzata la seguente formulazione, che equivale al metodo Droplet Scan™ System:

$$\beta = 1{,}6333 + 0{,}000857 * D_{macchia}$$

Lo spread factor è calcolabile anche con altre formulazioni, riportate tutte nel lavoro precedente a questo di Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022), che si possono riassumere nella seguente tabella (dove è stato evidenziato il metodo utilizzato):

Nome del Metodo	Logica utilizzata
Syngenta	Il valore di β è fisso dato il diametro della macchia di partenza e si ricava da un'apposita tabella
Metodo Dipartimento agricoltura dell'università di Catania	$D_{goccia} = \left(\frac{D_{macchia}}{1{,}59 * 0{,}938}\right)^{1/1{,}143}$
Droplet Scan System	$\beta = 1{,}6333 + 0{,}000857 * D_{macchia}$
USDA-ARS	$D_{goccia} = 0{,}53549 * D_{macchia} - 0{,}00008484 * D_{macchia}{}^{2}$
Swath Kit	$D_{goccia} = -4{,}42 + 0{,}583 * D_{macchia} - 0{,}00312 * D_{macchia}{}^{2}$

Tabella 7: riassunto dei metodi per la correzione del diametro tra macchia e goccia (Festa Bianchet, 2022)

Possibili errori di questo passaggio: questa formulazione per il diametro della macchia è chiaramente un'approssimazione e quindi i valori che risulteranno non saranno esattamente corretti; infatti, le gocce, impattando sul foglio, interagiscono anche fra di loro dando vita al fenomeno della coalescenza.

6.6. Calcolo dei parametri caratteristici

Dopo aver calcolato i diametri presunti delle gocce in volo, è possibile calcolare i parametri più interessanti, quali il VMD, la densità di gocce e l'area di copertura.

6.6.1. VMD

Il VMD è già stato accennato precedentemente in occasione della presentazione degli ugelli, ma per completezza si riporta anche in questa sezione:

VMD is the droplet size at which 50% of the spray volume is in droplets larger than the VMD and 50% of the volume is in droplets smaller than the VMD. (ASABE, s.d.)

Che tradotto in italiano risulta:

Il VMD è il diametro della goccia per il quale il 50% del volume dello spray è contenuto in gocce di diametro superiore al VMD ed il 50% in gocce con diametro inferiore al VMD

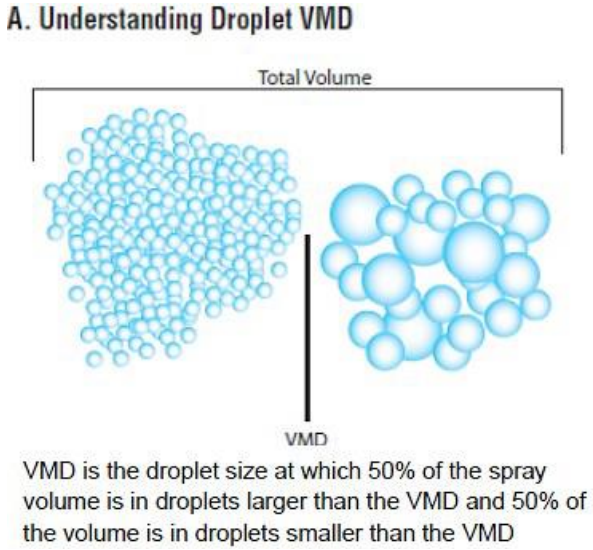


Figura 53: definizione di VMD per ASABE (ASABE, s.d.)

Il VMD risulta essere un parametro fondamentale che permette di definire un diametro caratteristico delle gocce. Le dimensioni delle gocce, infatti, non sono chiaramente tutte uguali, ma seguono una distribuzione statistica. È quindi necessario un metodo di natura statistica, il calcolo del VMD appunto, per definire un parametro significativo che sia di riferimento per quanto riguarda le dimensioni delle gocce.

6.6.1.1. Calcolo del VMD su Matlab

Per permettere il calcolo del VMD si è proceduto nel seguente modo:

- Creazione di un vettore nel quale si sono inseriti tutti i diametri (con la relativa correzione tramite lo spread factor) in ordine crescente;
- Creazione di un vettore con le stesse dimensioni del precedente, ma nel quale sono inseriti i volumi corrispondenti (che risulteranno quindi ordinati anche loro);
- Calcolo della cumulata del vettore dei volumi;
- Individuazione del valore che corrisponde alla metà del valore massimo della cumulata;
- Si calcola il diametro equivalente della goccia con volume pari al volume calcolato al punto precedente: questo valore corrisponde al VMD.

In codice Matlab la procedura risulta essere:

```
d_corretto=d_macchia./spread;
diam=sort(d_corretto);
v=4/3.*pi.*diam.^3;
v_cumulata=cumsum(v);
v05=0.5*v_cumulata(end);
```

```
VMD(i,j)=interp1(v_cumulata,diam,v05);
```

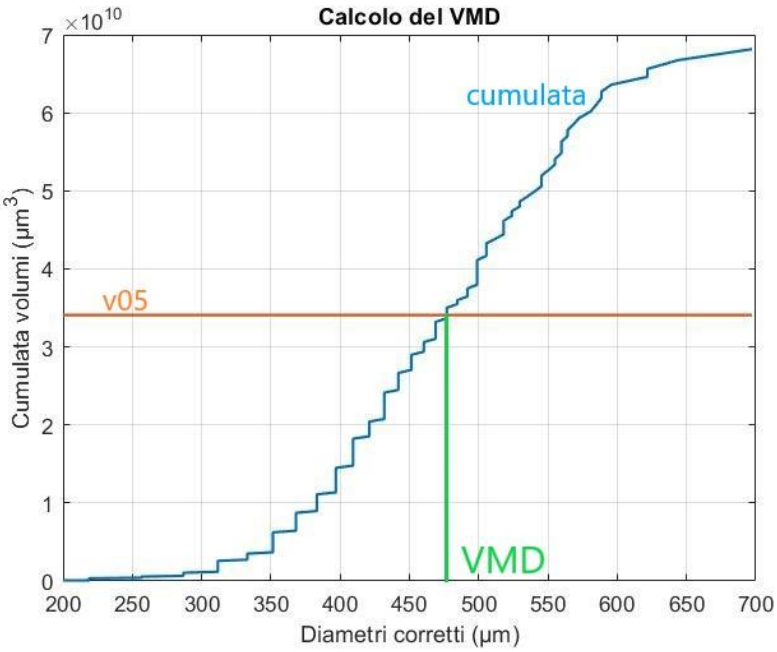


Figura 54: VMD per una prova di esempio

6.6.2. Densità di gocce

Questo parametro, in inglese detto *droplets density*, permette di identificare il numero di gocce presente nell'area interessata e si calcola come rapporto tra il numero di gocce presenti sulla superficie e la superficie stessa; la sua unità di misura è gocce/mm^2 (oppure, in inglese, droplets/mm^2). La formula che la identifica è:

$$Densità\ di\ gocce = \frac{Numero\ di\ gocce\ sulla\ superficie\ di\ riferimento}{Superficie\ di\ riferimento}\ \left({}^{gocce}/_{mm^2}\right)$$

6.6.3. Area di copertura

Infine, l'ultimo parametro che si andrà ad analizzare è l'area di copertura, in inglese detta *coverage factor*. Questo parametro è misurato in percentuale ed è il rapporto tra l'area coperta dalle gocce sulla superficie di riferimento e la superficie di riferimento (se si vuole il valore in percentuale il tutto deve essere moltiplicato per 100). Questo è un parametro molto utile in quanto con questo si può capire quanta superficie della foglia è coperta dal liquido fitosanitario. Si calcola con la seguente formula:

$$Area\ di\ copertura = \frac{Area\ coperta\ dalle\ gocce}{Superficie\ di\ riferimento}\ (\%)$$

Le superfici di riferimento utilizzate in questi parametri sono, per questo lavoro, i rettangolini impostati sul software ImageJ, ed equivalgono alle superfici delle cartine idrosensibili di 76x52mm.

6.7. Andamento dei grafici e analisi dei risultati

Una volta calcolati tutti i parametri, è possibile tracciare gli andamenti di questi ultimi, analizzando poi i risultati, sia al variare dell'altezza, sia al variare dell'angolo e anche al variare della pressione. Per quest'analisi è dedicato tutto il capitolo successivo.

7. Capitolo 7: Prove di spruzzo

In questo capitolo si analizzano le prove di spruzzo, prima illustrando come si sono realizzate in pratica le prove e poi analizzando i risultati, seguendo la procedura riportata nel capitolo precedente.

7.1. Procedura prove di spruzzo

In questo capitolo vengono illustrate le prove di spruzzo dei tre ugelli del circuito, "catturati" tramite fotografia (del telefono) della carta fotografica precedentemente illustrata. A differenza delle prove di riempimento/svuotamento, in questa sezione si è utilizzato colorante, in soluzione acquosa, in modo da visualizzare facilmente la macchia sulla carta fotografica. Per risparmiare in carta fotografica, essa è stata posizionata solo su un lato del simulatore di vigneto, essendo il circuito posizionato simmetricamente: per continuità rispetto al lavoro del tesista precedente Tobia Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022) si è scelto lo stesso lato analizzato da lui, e quindi il lato destro rispetto alla direzione di volo del drone. In figura si illustra ciò che è stato appena spiegato; si precisa che il foglio di carta fotografica posto sulla parte superiore del simulatore è più piccolo rispetto al vigneto solamente perché la prova fotografata aveva il solo scopo di ottimizzare il banco prova: durante le misurazioni "ufficiali" è stato utilizzato un foglio di carta fotografica più largo.

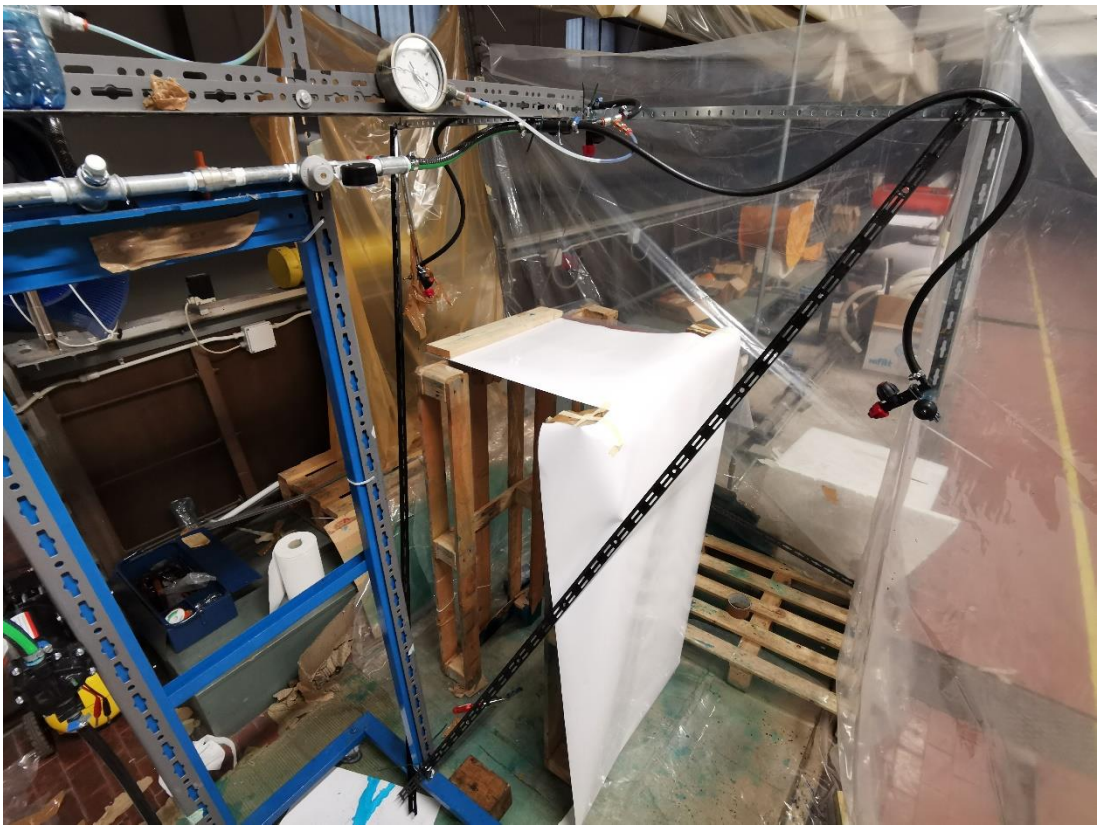


Figura 55: banco prova per lo spruzzo

In questa configurazione il tempo di spruzzo sulla carta deve essere ridotto in modo da garantire un'analisi precisa del getto: infatti, se si lasciasse lo spruzzo libero di agire sul foglio per molti secondi, le gocce si sovrapporrebbero creando una sola e grande macchia, che non si riuscirebbe ad analizzare. Per questo motivo, il tempo di spruzzo libero è stato mantenuto il più costante possibile intorno a 0,5 secondi per tutte le prove; seguendo questa procedura si simula anche lo spruzzo degli ugelli su una fascia di vigneto mentre il drone sta avanzando in volo (mentre il simulatore del laboratorio è ovviamente statico). Per catturare lo spruzzo solo per questo tempo limitato è stato ideato un semplice sistema di raccolta del getto appena a valle degli ugelli, che è costituito da due bottigliette in plastica fissate alle estremità di una sbarra metallica, di lunghezza pari alla distanza tra l'ugello centrale e l'ugello laterale. Mediante questo attrezzo è stato possibile bloccare il getto dei due ugelli per il tempo desiderato e rimuoverlo manualmente per gli 0,5 secondi necessari al getto per rimanere impresso sulla carta fotografica.

È importante che lo spruzzo non sia campionato nei 0,5 secondi iniziali, al fine di evitare errori dovuti al transitorio che si possono verificare all'apertura della valvola di intercettazione.

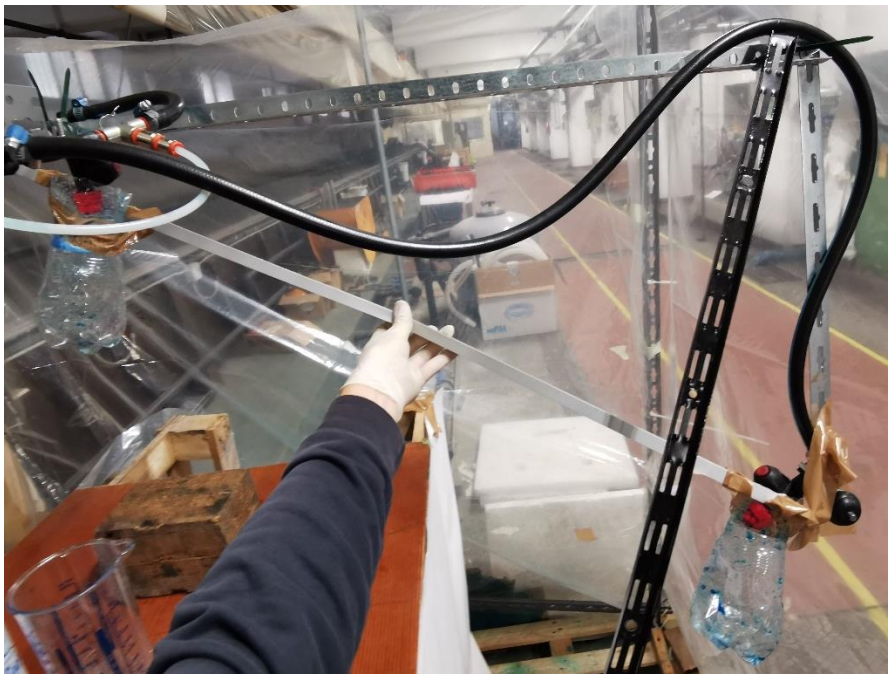


Figura 56: supporto ausiliario per l'esecuzione delle prove

Lo spruzzo del terzo ugello invece è stato raccolto mediante l'installazione appena a valle dell'ugello di un contenitore, corrispondente a una bottiglia d'acqua più capiente di quelle utilizzate per l'attrezzo appena descritto, che dopo un certo numero di prove veniva svuotato manualmente; esso è stato utile anche per misurare i volumi espulsi da un singolo ugello in certi lassi di tempo.

Il risultato dopo aver effettuato lo spruzzo è una situazione simile a quella in figura 57; per permettere un'asciugatura corretta delle goccioline è stato ritenuto consono lasciare i fogli asciugare in posizione per qualche minuto, dopodiché è stato possibile rimuoverli e posizionarli da parte per procedere poi alla fase di fotografia e di elaborazione.

Figura 57: esempi di prove di spruzzo appena effettuate, con l'impronta sulla cara fotografica

In sintesi, la procedura seguita per le varie prove è stata la seguente:

1. I fogli vengono posizionati sul simulatore di vigneto. Gli ugelli vengono disposti alle distanze scelte e con gli angoli di inclinazione desiderati.
2. Si apre la valvola di intercettazione e si regola il riduttore di pressione alla pressione desiderata per quella prova. In questa fase gli ugelli spruzzano ma si interpone tra ugelli e foglio l'attrezzo con le bottigliette in modo da non rovinare i fogli di carta fotografica.
3. Gli ugelli vengono fatti spruzzare sui fogli, nel mentre si misura il tempo di prova, rimuovendo la sbarra metallica con le bottigliette.
4. I fogli vengono lasciati asciugare e poi rimossi dal simulatore di vigneto.
5. Si procede con l'acquisizione dell'immagine tramite fotografia dalla fotocamera del telefono.
6. Si eseguono l'analisi dell'immagine ed i successivi calcoli.

Come detto precedentemente nel capitolo 2.2. gli ugelli utilizzati per tutte le prove sono l'ugello a cono pieno HCF80015 come ugello centrale e gli ugelli a ventaglio LDC11001 come ugelli laterali.

7.2. Parametri impattanti sui risultati

I parametri di cui tenere conto per ogni prova sono i parametri geometrici, le pressioni e il tempo di spruzzo.

- Parametri geometrici: per quanto riguarda i parametri geometrici, in queste prove si sono mantenute costanti le distanze degli ugelli dal simulatore in vigneto, in quanto nell'elaborato di tesi di Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022) è stato constatato che questa era la configurazione migliore rispetto alle altre. Facendo riferimento alla figura 60, le quote utilizzate per questa applicazione sono le seguenti: A=450 mm, B=450 mm, C=450 mm; in questo modo gli ugelli laterali risultano essere posizionati in corrispondenza dell'estremo superiore della vite. Gli angoli invece, sono stati fatti variare tra 45°, 53° e 60°. I risultati ottenuti precedentemente presentavano vantaggi e svantaggi in tutte e tre le configurazioni: con l'angolo a 45° si ottenevano dei buoni risultati in termini di VMD ma nella parte della vite non c'era una copertura adeguata; per cercare di rimediare a questo problema si è aumentato l'angolo di inclinazione a 60°, dove però si erano ottenuti valori un po' peggiori di VMD e soprattutto non si copriva in modo consono la parte alta della vite; per questo motivo si è introdotta un'angolazione intermedia di 53°, che cercava di unire i vantaggi dei due casi.

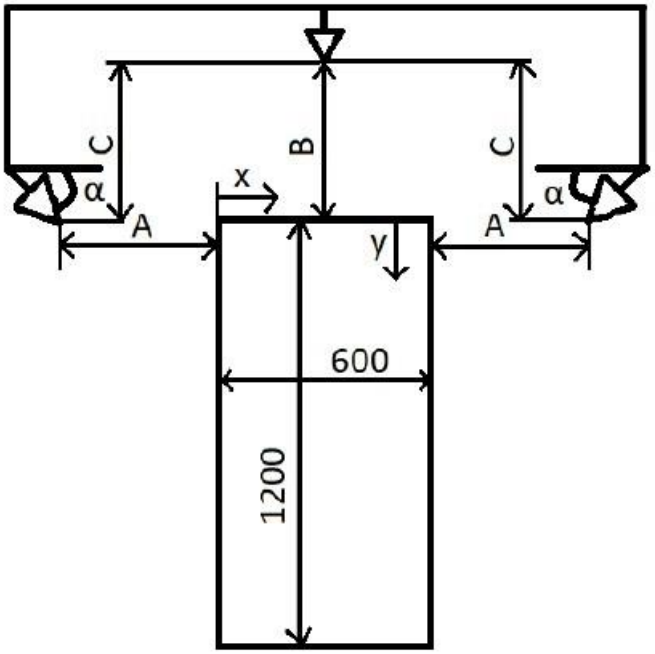


Figura 58: schema del simulatore (Festa Bianchet, 2022)

- Pressioni: per quanto riguarda le pressioni, c'è da fare una distinzione tra volume presente nel serbatoio e la pressione che arriva agli ugelli, che in questo caso è quella che ci interessa. Infatti, nelle prove di spruzzo la pressione all'interno del serbatoio non è importante come nelle prove di svuotamento, dal momento che lo spruzzo è influenzato dalla pressione in uscita agli ugelli: per questo motivo non si è inserito in tabella il valore di pressione del serbatoio. Ovviamente, il valore della pressione agli ugelli è determinato dal riduttore di pressione per pressioni maggiori di 2 bar (o dal valore impostato dal riduttore), mentre per le pressioni inferiori il valore di pressione degli ugelli corrisponde a quello all'interno del serbatoio, che rappresenta una situazione di serbatoio che si sta svuotando.
- Tempo di spruzzo: l'ultimo parametro influente per le varie prove di spruzzo è il tempo nel quale l'ugello viene lasciato libero di spruzzare verso il foglio. Questo tempo è stato registrato tramite il cronometro presente sul telefono cellulare e per la maggior parte delle prove è stato acquisito autonomamente, il che potrebbe aver inciso sulla precisione della misura; per qualche prova, il suddetto tempo è stato acquisito da un altro operatore, che ha reso la misura un po' più precisa: osservando comunque i vari tempi di spruzzo, non si nota una gran differenza fra loro, cosa che fa pensare che le rilevazioni siano state comunque abbastanza precise.

7.3. Risultati ugelli singoli

Nei lavori precedenti a questo, negli elaborati di Conte (Conte, 2022), Frate (Frate, 2022) e Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022), sono già stati analizzati i getti dei singoli ugelli, con un circuito apposito per questo studio. Guardando le caratteristiche degli ugelli e il loro studio singolo, si è constatato che gli ugelli utilizzati in questa applicazione (sia il HCF80015 a cono pieno che il LDC11001 a ventaglio) hanno come pressione ottimale di utilizzo 3 bar. Queste caratteristiche sono riassunte efficacemente nella tabella riportata al capitolo 11, dove sono riportati tutti i parametri di ogni prova, con relativo spruzzo associato.

Al contrario, nelle prove di svuotamento del serbatoio realizzate e illustrate precedentemente, si è concluso che la pressione di 3 bar è mantenuta per davvero poco tempo dal circuito, dato che il serbatoio a quella pressione si svuota più velocemente (si fa riferimento al capitolo 5). Per questo motivo si è deciso di analizzare come pressione massima quella ottimale di 2,5 bar, mentre a pressioni inferiori si accetta di utilizzare gli ugelli a una pressione insufficiente per avere uno spruzzo ottimale; purtroppo, questa scelta va a peggiorare un po' le prestazioni degli ugelli, ma risulta l'unico modo sensato per utilizzare il circuito.

7.4. Elenco prove di spruzzo effettuate in questo lavoro

In questa sezione si riassumono in una breve tabella tutte le prove di spruzzo effettuate in questo lavoro con i parametri caratteristici per ogni prova. Si precisa che il numero delle prove è semplicemente l'ordine cronologico seguito, e non ci sono altre relazioni.

Prove Spruzzo	**Ugello centrale**	**Ugello Laterale**	**Angolo laterale (°)**	**Pressione ugelli (bar)**	**Pressione regolatore (bar)**	**Pressione serbatoio (bar)**	**Tempo di spruzzo (s)**
12	si	si	45	2	2	3	0,52
13	si	si	45	1,75	/	1,75	0,62
14	si	si	45	1,45	/	1,45	0,66
15	si	si	45	3	3	4	0,59
16	si	no	45	3	3	4	0,48
17	si	no	45	2	2	3	0,52
18	no	si	45	3	3	4	0,68
19	no	si	45	2	2	3	0,61
20	si	si	45	2,5	2,5	3	0,57
21	si	si	45	2,8	2,8	3,5	0,50
22	si	si	45	0,9	/	0,9	0,57
24	si	si	60	2,5	2,5	3,5	0,61
25	si	si	60	2	/	2	0,63
26	si	si	60	1,5	/	1,5	0,54
27	no	si	60	1	/	1	0,56
28	no	si	53	2,5	2,5	3,5	0,59
29	no	si	53	2	/	2	0,55
30	no	si	53	1,5	/	1,5	0,49
31	no	si	53	1	/	1	0,54
32	no	si	53	3	3	4	0,58
33	si	si	60	3	3	4	0,66

Tabella 8: elenco di tutte le prove di spruzzo

Si è deciso nei prossimi capitoli di esaminare separatamente gli spruzzi degli ugelli centrali rispetto a quelli laterali, anche se durante la prova sono stati effettuati simultaneamente. Questa scelta è stata presa in quanto i due ugelli non influenzano in alcun modo il lavoro dell'altro ed effettuare l'analisi separatamente non comporta nessuna variazione. Inoltre, quando sull'ugello laterale viene cambiato l'angolo di inclinazione, sull'ugello centrale non si verifica nessuna variazione né di angolo né di distanza dal foglio, e risulterebbe ridondante effettuare una doppia analisi.

Alcune prove sono state effettuate analizzando solamente lo spruzzo sul foglio verticale, mentre non si è analizzato il foglio orizzontale centrale. Questa scelta è dettata dal fatto che tra le varie prove l'unico parametro variabile era l'angolo alpha, che quindi non variava in nessun modo il risultato dell'ugello centrale; per questo motivo, anche tenendo in

considerazione il costo rilevante della carta fotografica, si è ritenuto opportuno non analizzare più volte lo spruzzo centrale, per evitare ridondanza di risultati e costi inutili.

7.5. Analisi su spruzzi ugello centrale

Le prime prove analizzate sono quelle sull'ugello centrale, che si ricorda essere il modello HCF80015, che corrisponde ad un ugello a cono pieno. Le diverse analisi su questo ugello sono solo variazioni della pressione all'ugello, in quanto si sono mantenute invariate le distanze dal foglio e l'angolo è chiaramente posto perpendicolarmente alla superficie superiore del simulatore.

Come unica analisi sull'ugello centrale si è quindi effettuata una disamina sull'effetto della variazione della pressione agli ugelli sui parametri caratteristici, quali VMD, area di copertura e densità di gocce.

Le pressioni agli ugelli riportate di seguito vanno di pari passo alle pressioni nel serbatoio, seguendo la logica seguente: si imposta il serbatoio ad una pressione alta e simultaneamente si imposta al riduttore il valore di 2.5 bar; una volta che il serbatoio scende al di sotto di questa soglia di pressione, inevitabilmente si abbassa anche la pressione agli ugelli; così, quando quest'ultima raggiunge per esempio il valore di 2 bar, si realizza la prova alla pressione di 2 bar (la numero 16 in questo caso). In questo modo si simula correttamente lo svuotamento del serbatoio durante il suo volo e le prove rispecchiano bene la situazione reale.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle prove esaminate.

Numero prova	Pressione ugello (bar)	Distanza ugello – foglio (mm)	Tempo di spruzzo (s)
24	2,5	450	0,61
25	2,0	450	0,63
26	1,5	450	0,54

Tabella 9: prove analizzate per l'ugello centrale

Figura 59: spruzzo della prova 24

Figura 60: spruzzo della prova 25

Figura 61: spruzzo della prova 26

Queste immagini sono state elaborate tramite il software ImageJ (come illustrato al capitolo 6.4.) e per farlo le immagini sono state suddivise in selezioni più piccole, al fine di effettuare un'analisi abbastanza precisa. Di seguito sono riportate le immagini appena riportate con le selezioni utilizzate da imageJ per estrapolare i risultati successivamente riportati.

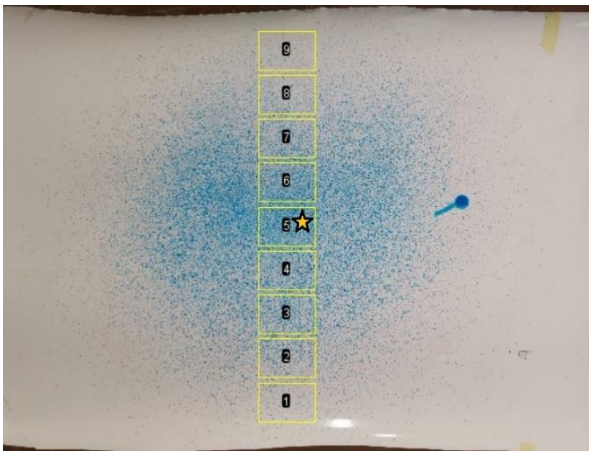


Figura 62: selezioni prova 24

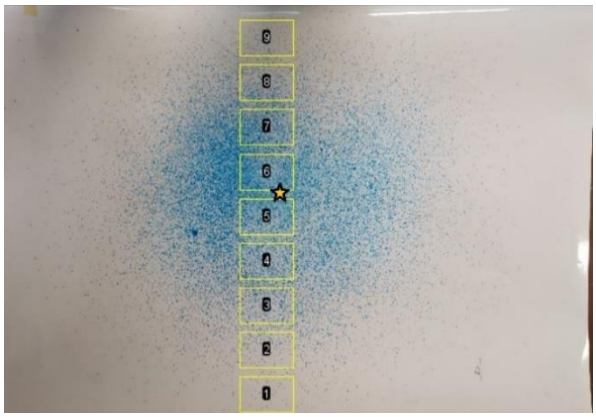


Figura 64: selezioni prova 25

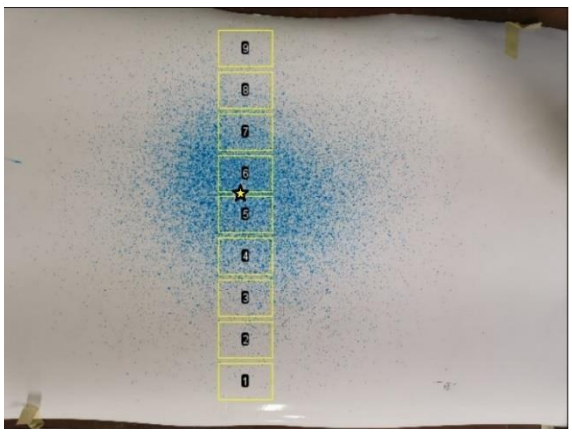


Figura 63: selezioni prova 26

La stellina riportata in ogni immagine rappresenta l'asse dell'ugello corrispondente, e quindi indica il centro teorico dello spruzzo. Per ogni rettangolo è stata ricavata l'area di ogni goccia presente nella selezione, dalla quale si è riusciti a ricavare il diametro equivalente delle gocce sul foglio. Successivamente, mediante l'utilizzo dello spread factor, si è ricavato il diametro delle goccioline in volo (prima dell'impatto sul foglio) e di conseguenza i tre parametri fondamentali, tramite le seguenti relazioni:

$$Area\ di\ copertura = \frac{Area\ coperta\ dalle\ goccioline}{Area\ totale\ di\ riferimento}\ (\%)$$

$$Densità\ di\ gocce = \frac{Numero\ di\ gocce\ sulla\ superficie}{Superficie\ di\ riferimento}\ (\frac{gocce}{mm^2})$$

Per il calcolo del VMD non c'è una formula precisa, ma come si è riportato al capitolo 6.6, si è utilizzato il codice:

```
 diam=sort(d_corretto);
v=4/3.*pi.*diam.^3;
v_cumulata=cumsum(v);
v05=0.5*v_cumulata(end);
```

dove d_corretto rappresenta il diametro già corretto con lo spread factor.

7.5.1. Andamenti parametri

Dopo aver riportato le macchie di colore, si analizzano i tre parametri già esposti precedentemente; si precisa che sono stati indicati l'altezza del vigneto sulle ordinate (con a fianco anche un'immagine del simulatore di vigneto che favorisce la comprensione del grafico) e i parametri sull'asse delle ascisse. Questa scelta è stata fatta in quanto risulta immediato comprendere come variano i parametri lungo l'altezza, facendo risultare i grafici più leggibili e comprensibili.

7.5.1.1. VMD

In questo paragrafo è presentata l'analisi del VMD per le prove dell'ugello centrale, a diverse pressioni.

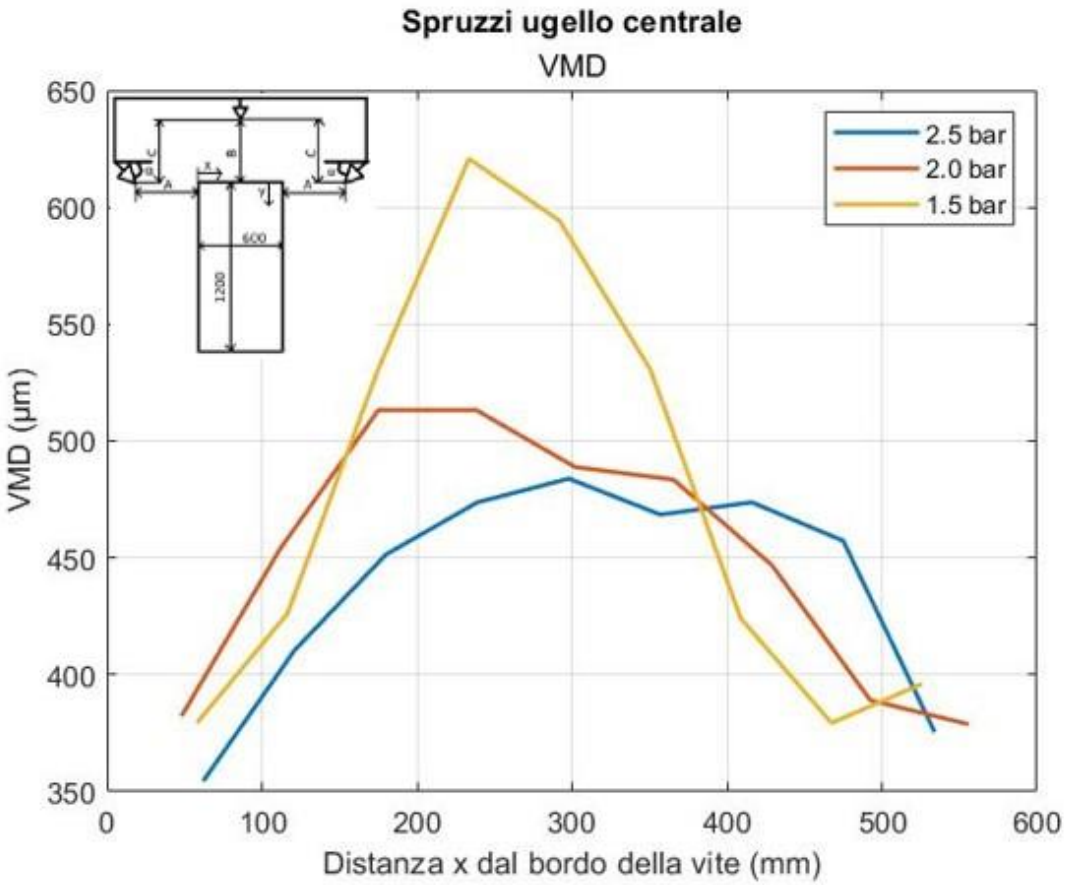


Figura 65: andamento VMD ugello centrale

Osservando il grafico si nota subito come tutti gli andamenti di VMD abbiano un massimo verso il centro della superficie della vite: questo comportamento è giustificato dal fatto che al centro corrisponde l'asse di spruzzo dell'ugello, e quindi le gocce potrebbero essersi anche unite fra loro durante l'impatto, generando quindi dei VMD medi più alti rispetto all'esterno, dove invece le gocce sono più distanziate. Si osserva inoltre come per la pressione più bassa tra quelle analizzate (1,5 bar) i VMD, specialmente al centro, siano molto più alti rispetto alle altre pressioni: ciò era prevedibile, in quanto gli ugelli a pressioni troppo basse non lavorano più in condizioni ottimali, facendo risultare i VMD delle gocce più alti rispetto a quelli desiderati. Si nota invece che per quanto riguarda i VMD i risultati ottenuti con le pressioni di 2.5 bar e 2 bar siano molto simili, e quindi un abbassamento di pressione in questo range non compromette particolarmente le prestazioni dell'ugello.

7.5.1.2. Area di copertura

In questo paragrafo è presentata l'analisi dell'area di copertura per le prove dell'ugello centrale con pressione variabile.

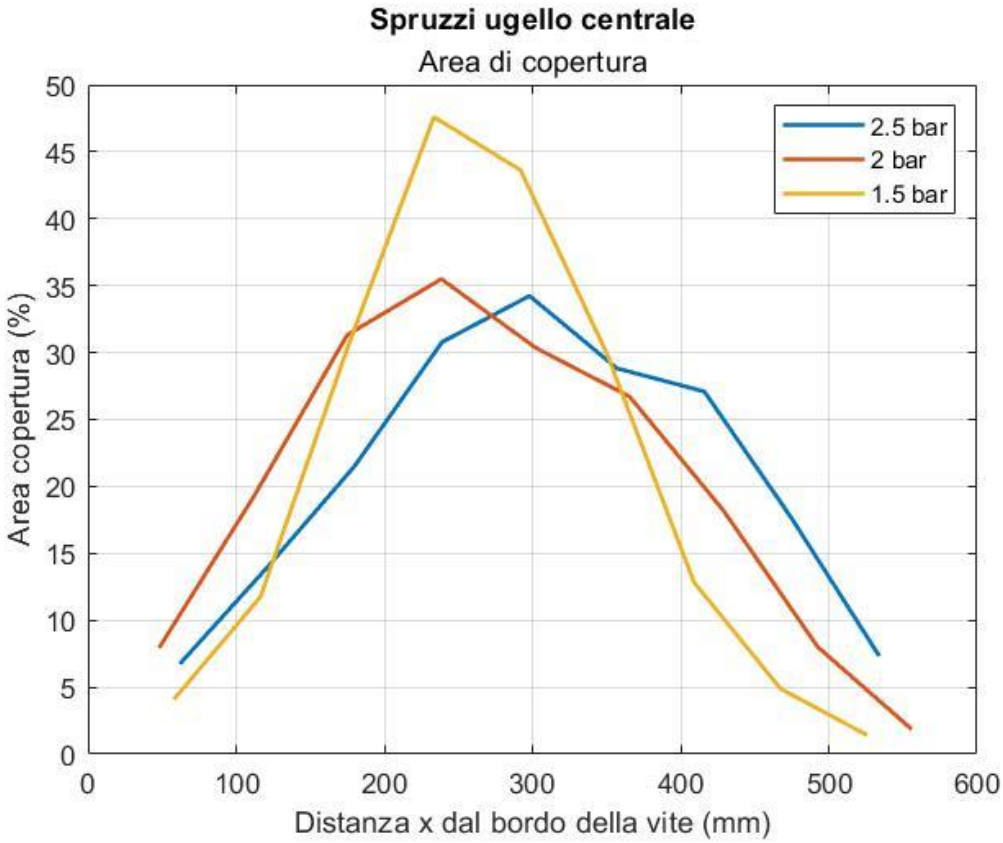


Figura 66: andamento area di copertura per ugello centrale

Per l'area di copertura (calcolata come rapporto tra superficie coperta dalle goccioline e superficie totale della superficie di riferimento) si osserva che in tutti i casi si ha un andamento parabolico con il massimo verso il centro della superficie superiore del vigneto. I risultati migliori in media (quindi quelli con area di copertura maggiore lungo tutta la distribuzione) si ottengono per le pressioni maggiori: questo risultato era atteso, infatti l'ugello lavora in maniera ottimale alla pressione di 2,5 bar e quindi garantisce una copertura maggiore dell'area di riferimento.

Si nota inoltre come per la pressione di 1.5 bar la copertura al centro della superficie sia molto alta, superando di molto l'area di copertura delle altre due pressioni: la spiegazione di questo fenomeno è dovuta al fatto che a pressioni basse le gocce si uniscono durante l'impatto col foglio e quindi occupano una superficie molto grande di foglio e allo stesso modo in quella sezione si erano ottenuti dei VMD molto alti; se si segue il resto della curva, infatti, si nota come verso gli estremi del vigneto l'area di copertura sia molto bassa, e il risultato risulta quindi insufficiente. Inoltre, il massimo della curva viola corrisponde al massimo di VMD ottenuto con la stessa pressione di 1.5 bar, validando quindi la spiegazione appena fornita.

7.5.1.3. Densità di gocce

In questo paragrafo è presentata l'analisi della densità per le prove dell'ugello centrale con pressione variabile.

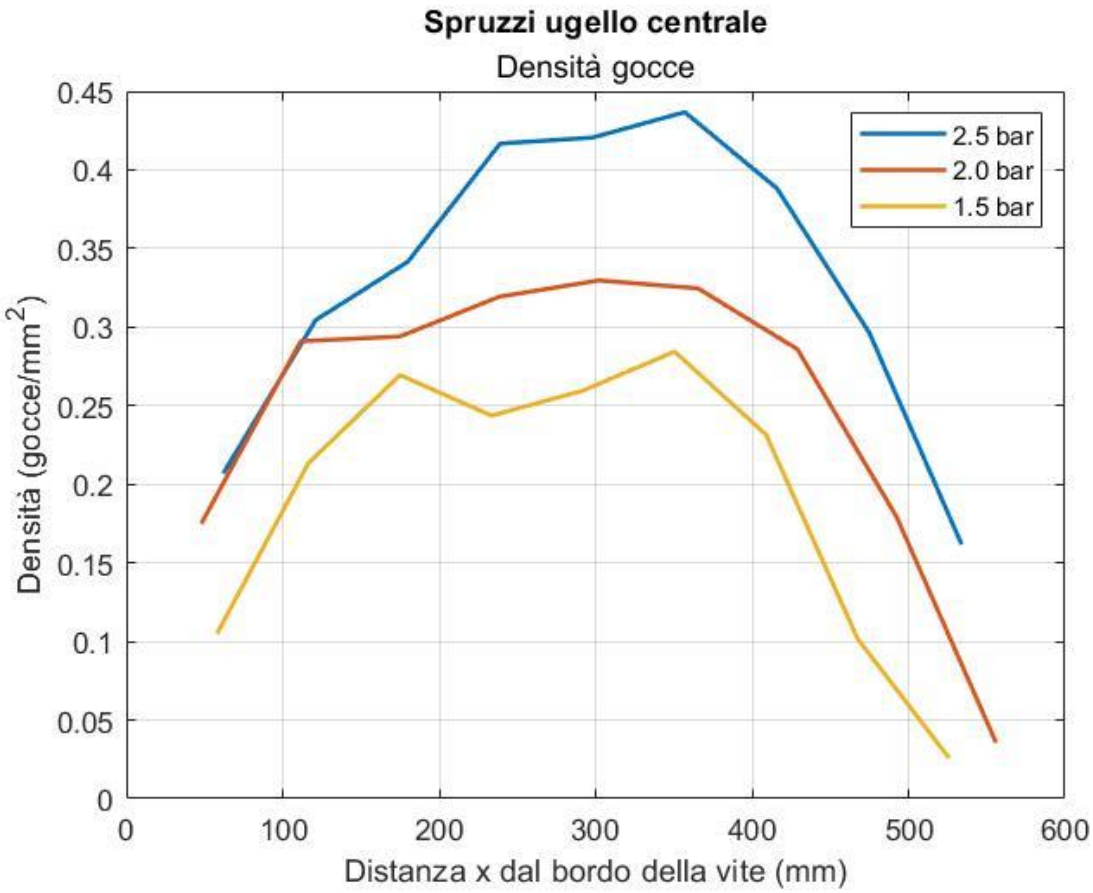


Figura 67: andamento densità per l'ugello centrale

L'andamento della densità di gocce rispecchia abbastanza fedelmente l'andamento degli altri due parametri studiati; in questo caso si nota molto bene il peggioramento della densità, a parità di distanza x dal bordo della vite, al diminuire della pressione agli ugelli: infatti per densità alte, la densità di gocce risulta abbastanza elevata, sintomo di uno spruzzo ottimale, mentre al diminuire della pressione la densità peggiora.

In questo caso si evidenziano anche differenze tra le curve corrispondenti alle pressioni di 2 bar e 2.5 bar, cosa che per il VMD e per l'area di copertura non si erano notate; quest'osservazione fa capire come il calo di pressione tra 2.5 e 2 bar non comporta un peggioramento significativo di prestazioni per quanto riguarda VMD e area di copertura, ma peggiora un po' la densità di gocce: si può quindi accettare di avere una pressione un po' inferiore, che permette di aumentare l'autonomia di volo del drone.

7.5.2. Grafici 3D dell'ugello centrale

In questa sezione si sono unite in un solo grafico 3D le curve corrispondenti alle pressioni di 2.5 bar, 2 bar e 1.5 bar. Questi grafici possono risultare molto utili in quanto si può visualizzare l'andamento dei tre parametri al diminuire della pressione agli ugelli, e quindi l'andamento dei parametri durante il volo del drone.

Infatti, ipotizzando di aver impostato la pressione iniziale agli ugelli a 2.5 bar tramite il riduttore di pressione, dopo un certo tempo la pressione all'interno del serbatoio scende sotto a tale valore, facendo calare di conseguenza anche la pressione agli ugelli, che scenderà secondo gli andamenti riportati al capitolo 5. Dopo un certo tempo si arriverà ad ottenere una pressione prima di 2 bar e poi di 1,5 bar, e quindi è interessante visualizzare graficamente il variare dei parametri.

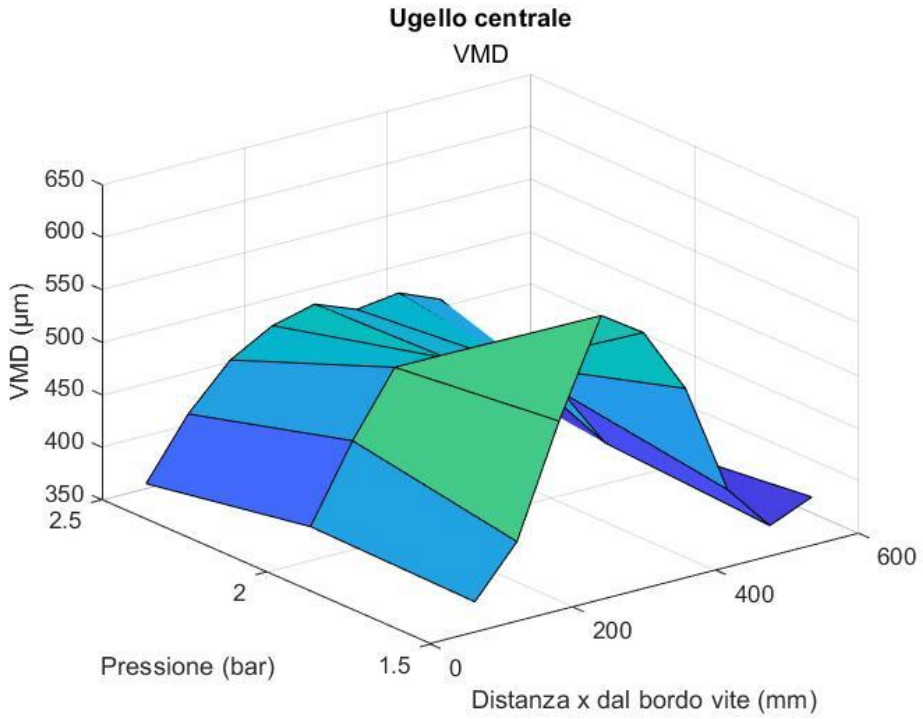


Figura 68: grafico 3D per il VMD

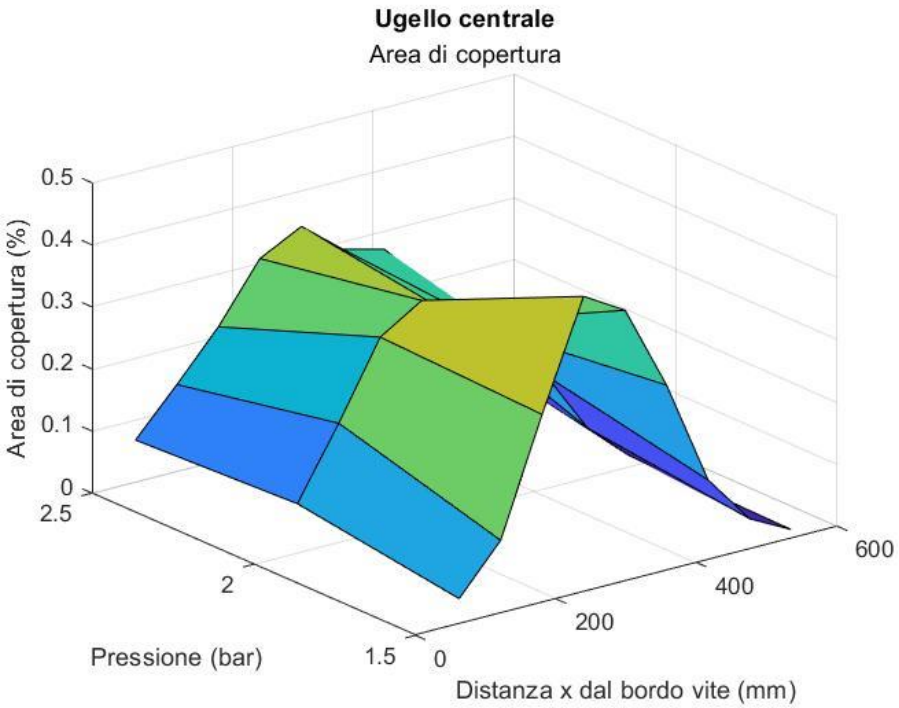


Figura 70: grafico 3D per l'area di copertura

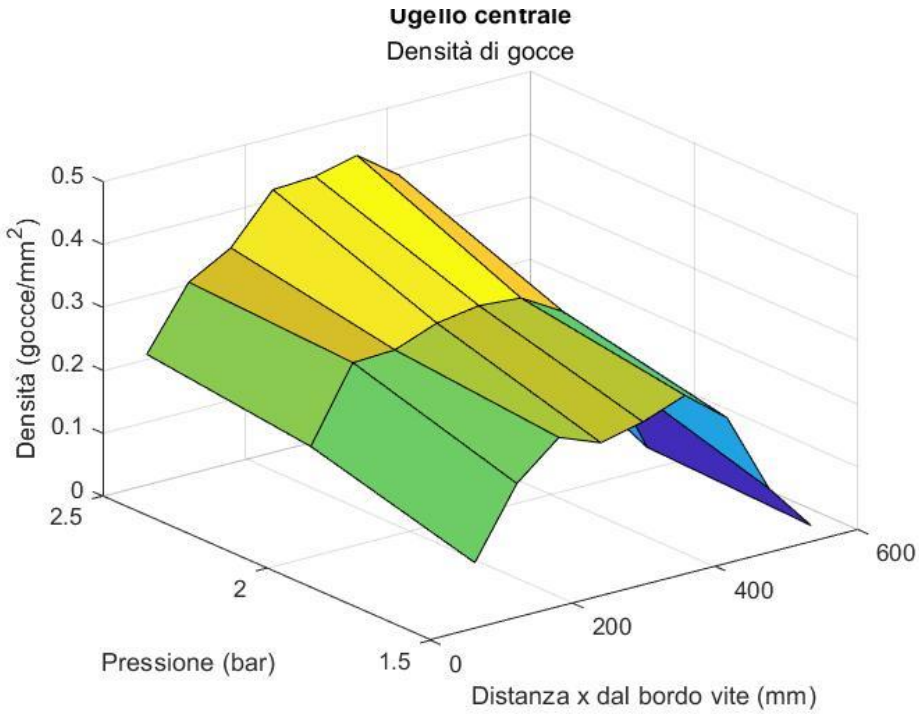


Figura 69: grafico 3D per la densità

Gli andamenti ricalcano ovviamente quelli analizzati in precedenza, ma si nota facilmente come al diminuire della pressione (e quindi con il passare del tempo di volo del drone) il VMD tendenzialmente cresca di valore, cosa che non risulta favorevole, confrontando poi i valori di VMD con quelli forniti da catalogo (vedi capitolo 3); al contrario, si nota invece come la densità di gocce diminuisca evidentemente al diminuire della pressione, cosa che non risulta minimamente vantaggiosa, dato che essa corrisponde al numero di gocce per ogni superficie

di riferimento analizzata, e quindi un valore più piccolo di questo parametro evidenzia un calo di prestazione del sistema.

7.5.3. Pressioni molto basse e molto alte

Come ultima analisi sugli ugelli centrali, si è deciso di analizzare il comportamento dell'ugello in condizioni di pressioni molto basse (in particolare in questo caso si ha una pressione di 0.9 bar, corrispondente alla prova 22) e molto alte (alla pressione di 3 bar, prova 16). Le prove a 3 bar corrispondono all'ottimale per gli ugelli, ma il serbatoio non riesce a mantenere tale pressione per un tempo sufficiente (capitolo 5) e quindi non si sono incluse nello studio precedente, in quanto si ritengono pressioni non realistiche per quest'applicazione.

In tabella sono riassunte le due prove con i parametri caratteristici:

Numero prova	Pressione ugello (bar)	Distanza ugello – foglio (mm)	Tempo di spruzzo (s)
16	3,0	450	0,48
22	0,9	450	0,57

Tabella 10: prova con pressione molto bassa (22) e prova con pressione alta (16)

Di seguito si riportano le impronte lasciate dall'ugello alle pressioni di 3 bar e 0,9 bar, con e senza selezioni adottate durante l'analisi con ImageJ.

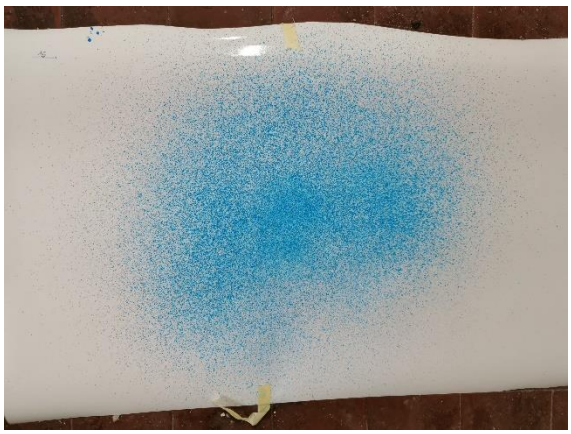


Figura 73: spruzzo prova 16

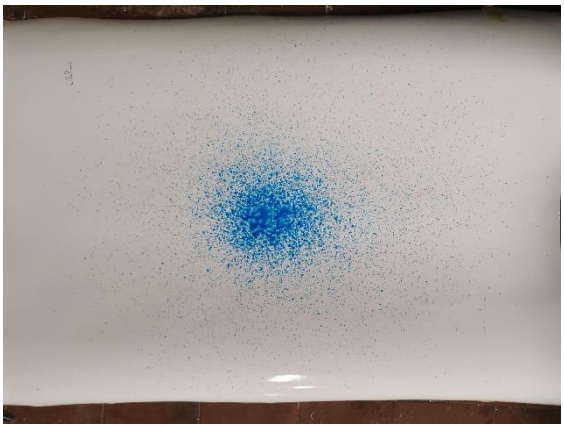


Figura 74: spruzzo prova 22

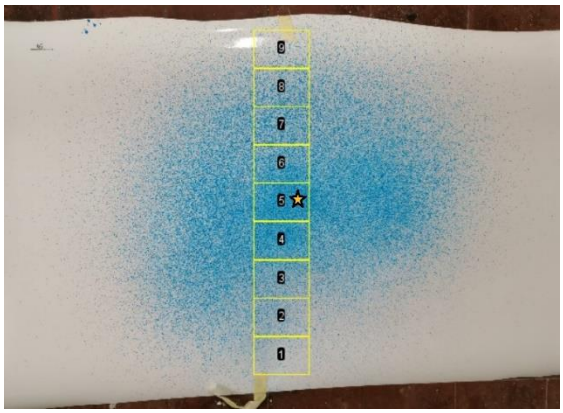


Figura 72: selezioni della prova 16

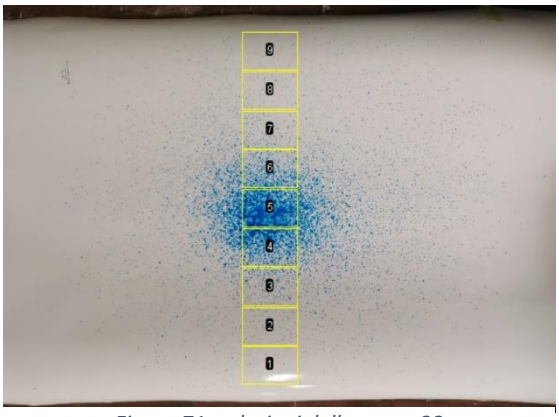


Figura 71: selezioni della prova 22

Si nota immediatamente come l'impronta corrispondente alla pressione di 0,9 bar sia molto concentrata al centro, con gocce grosse, mentre verso i lati le gocce siano molto rarefatte. Al contrario a 3 bar le gocce sono piccole e distribuite molto meglio

7.5.4. Andamento parametri con pressioni basse e alte

Di seguito si riportano gli andamenti dei tre parametri del caso con pressione molto bassa insieme a una curva con pressione più alta delle precedenti.

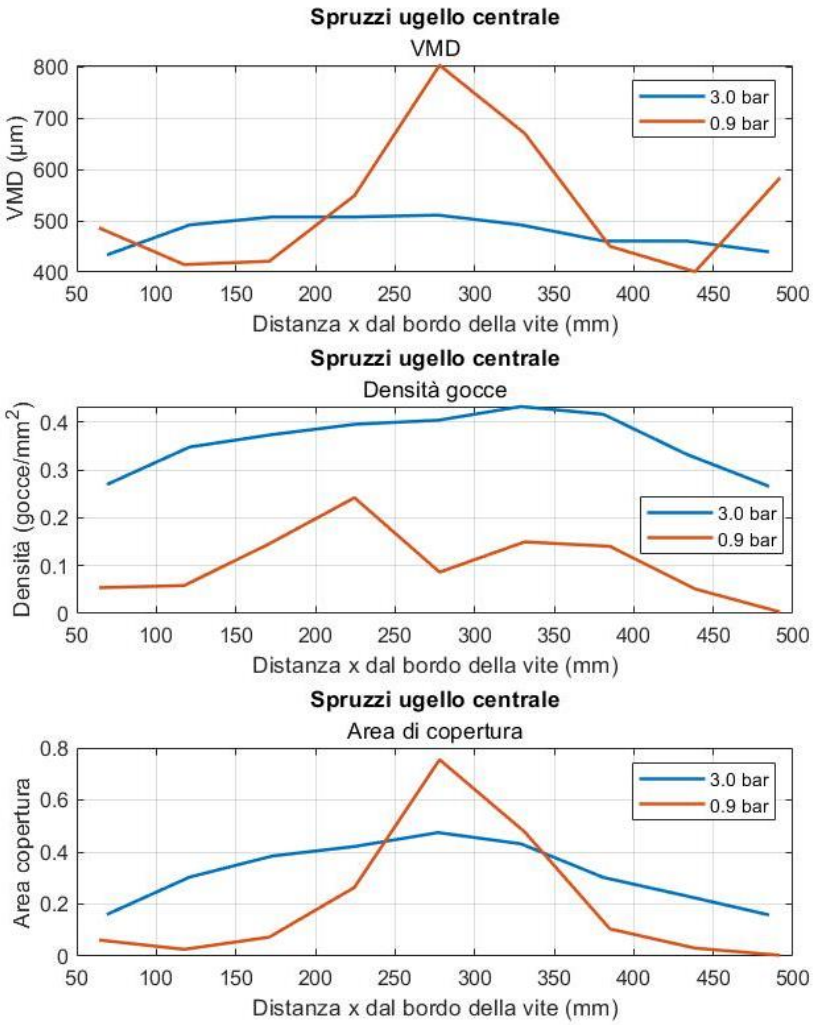


Figura 75: andamento dei tre parametri delle prove a pressione molto bassa e a pressione molto alta

Come si può notare bene dalla curva del VMD e da quella dell'area di copertura, il caso con pressione di 0.9 bar ha un picco molto evidente in corrispondenza del centro del grafico, che evidenzia delle gocce molto grandi (VMD alto) e un'area coperta molto bene (quasi l'80% dell'area al centro è coperto da gocce). Questo fenomeno non è ottimale, in quanto delle

gocce troppo grandi tendono a scivolare sulla foglia, non permettendo il corretto funzionamento del sistema. Inoltre, più ci si avvicina ai bordi della vite, più l'area di copertura e la densità assumono dei valori troppo bassi, indice di una distribuzione troppo concentrata verso il centro della superficie totale della vite. Al contrario, le prove a 3 bar risultano avere degli andamenti più costanti lungo tutta la sezione di foglio analizzata, il che è molto favorevole per l'applicazione, in quanto tutte le foglie risulteranno ricevere le stesse gocce ugualmente distribuite.

Osservando i valori enormi di VMD, per esempio, che si ottengono nel caso di pressione 0,9 bar, si conclude che le pressioni al di sotto di 1 bar non siano per nulla ottimali, e potrebbero anche recare danni alla pianta e al terreno (che potrebbe essere inquinato dalle gocce troppo grosse), oltre che non essere efficaci per il trattamento fitosanitario. Si ribadisce invece come la pressione di 3 bar è ottimale come prestazioni, ma purtroppo, come visto al capitolo 5, il serbatoio non è in grado di mantenere a lungo tale pressione.

7.5.5. Riepilogo risultati

Nella tabella 11 vengono riportati i risultati delle prove appena analizzate; per ogni parametro viene inserito il valore massimo, il valore minimo e il valore medio, al fine di avere una visione completa della situazione.

Prova	**VMD (µm)**			**Area di copertura (%)**			**Densità (gocce/mm^2)**		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
16	511,4	433,7	478,5	47,48	15,83	31,88	0,433	0,266	0,360
24	483,9	354,4	438,8	34,23	6,74	20,90	0,437	0,162	0,330
25	513,2	378,8	449,9	35,49	1,85	19,89	0,330	0,0357	0,248
26	620,8	379,4	475,7	47,60	1,41	20,71	0,284	0,0258	0,193
22	803,8	400,8	531,3	75,49	0,34	19,96	0,242	0,0030	0,104

Tabella 11: tabella riassuntiva dei risultati dell'ugello centrale

7.6. Ugelli laterali

Le prove degli ugelli laterali sono classificate sulla base dell'angolo di inclinazione scelto per ogni prova, e alla fine verrà fatto un confronto tra i vari casi con angolo diverso. Si ricorda che gli angoli scelti per le prove sono 45°, 53° e 60°, sulla base dell'angolo mostrato in figura 76.

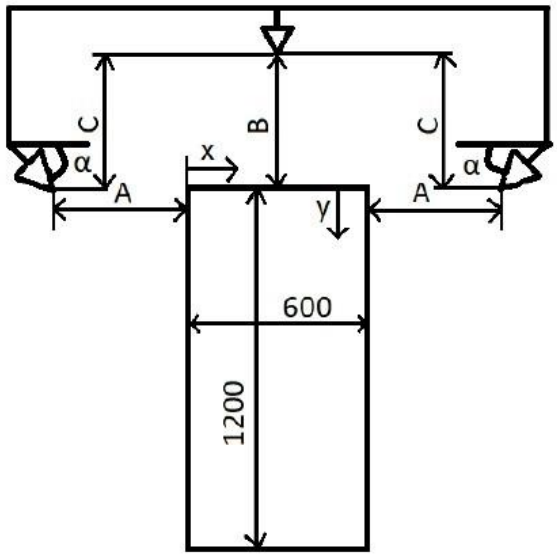


Figura 76: schema del simulatore di vigneto (Festa Bianchet, 2022)

7.7. Angolo alpha = 45° e pressione alimentazione ugelli variabile

Le prime analisi effettuate sono quelle con angolo alpha posto a 45°; anche in questo caso si è effettuata un'analisi facendo variare la pressione mantenendo costanti gli altri parametri geometrici.

Si precisa che differentemente da prima, si è inserito il caso con pressione molto bassa (1.0 bar) perché considerato significativo durante il tempo di volo del drone, mentre non è inserita la pressione di 3 bar, dato che l'impostazione di una tale pressione al riduttore a monte degli ugelli, risulterebbe inconcludente in quanto tale pressione può essere mantenuta solo per qualche decina di secondi dal serbatoio (come evidenziato nel capitolo 5.2.).

L'analisi sulla pressione di 3 bar è effettuata comunque successivamente per permettere il confronto tra l'alimentazione con serbatoio a vescica e quella con pompa (le prove con pompa sono state effettuate da Tobia Festa Bianchet nel lavoro precedente a questo (Festa Bianchet, 2022) a pressione di 3 bar). L'analisi risulta quindi completa anche con questo modo di procedere.

Le pressioni agli ugelli riportate di seguito vanno di pari passo con le pressioni nel serbatoio, seguendo la logica seguente: si imposta il serbatoio ad una pressione alta e simultaneamente

si imposta al riduttore il valore di 2.5 bar; una volta che il serbatoio scende al di sotto di questa soglia di pressione, inevitabilmente si abbassa anche la pressione agli ugelli; così, quando quest'ultima raggiunge per esempio il valore di 2 bar, si realizza la prova alla pressione di 2 bar (la numero 19 in questo caso). In questo modo si simula correttamente lo svuotamento del serbatoio durante il suo volo e le prove rispecchiano bene la situazione reale.

In tabella 12 sono riassunte le prove analizzate in seguito:

Numero prova	Pressione ugello (bar)	Angolo alpha (°)	Distanza ugello – foglio (mm)	Tempo di spruzzo (s)
20	2,5	45	450	0,50
19	2,0	45	450	0,57
14	1,5	45	450	0,66
22	0,9	45	450	0,57

Tabella 12: prove analizzate con alpha=45°

Figura 77: prova 20

Figura 80: prova 19

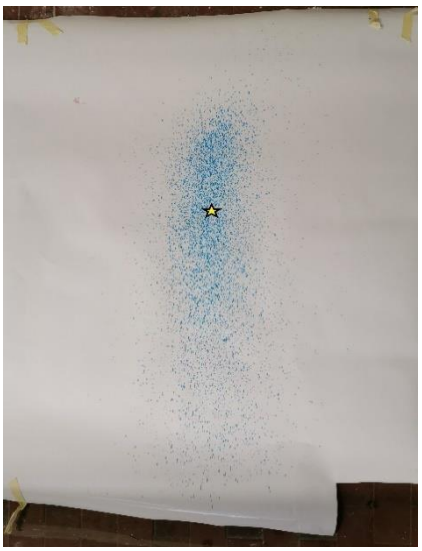


Figura 78: prova 14

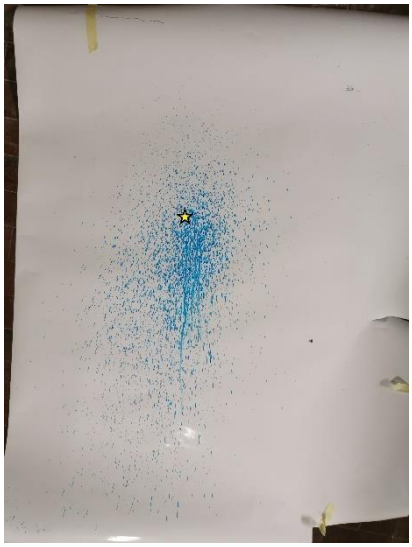


Figura 79: prova 22

Queste immagini, esattamente come fatto per l'ugello centrale, sono state elaborate tramite il software ImageJ (come illustrato al capitolo 6.4.) e per farlo le immagini sono state suddivise in selezioni più piccole, al fine di effettuare un'analisi abbastanza precisa. Di seguito sono riportate le immagini appena riportate con le selezioni utilizzate da imageJ per estrapolare i risultati successivamente riportati. Si ricorda che la stellina riportata nelle immagini rappresenta l'asse dell'ugello, che in questo caso con angolo di 45° dista esattamente 450 mm dal bordo superiore della vite.

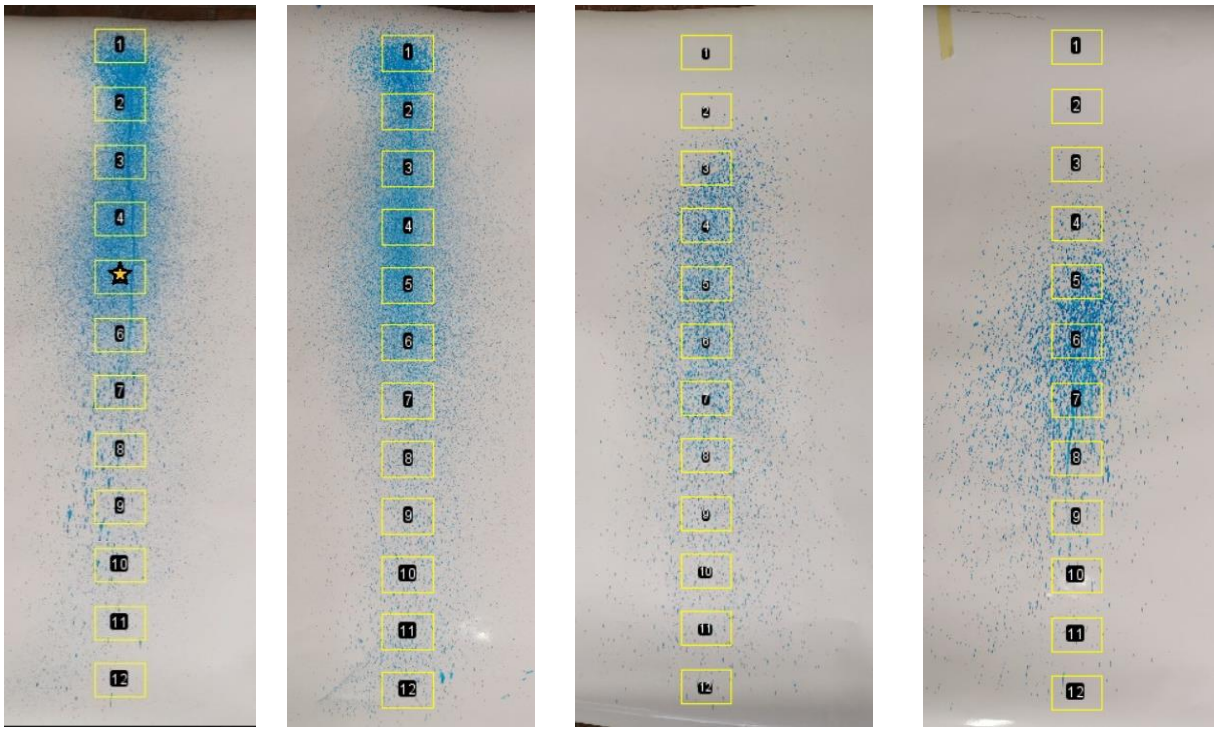


Figura 81: selezioni utilizzate nelle quattro prove

7.7.1. Andamento parametri

Dopo aver riportato le macchie di colore, si analizzano i tre parametri già esposti precedentemente; si precisa che sono stati indicati l'altezza del vigneto sulle ordinate (con a fianco anche un'immagine del simulatore di vigneto che favorisce la comprensione del grafico) e i parametri sull'asse delle ascisse. Questa scelta è stata fatta in quanto risulta immediato comprendere come variano i parametri lungo l'altezza, facendo risultare i grafici più leggibili e comprensibili.

7.7.1.1. VMD

In questo paragrafo è presentata l'analisi del VMD per le prove dell'ugello laterale con angolo di 45° e pressione variabile.

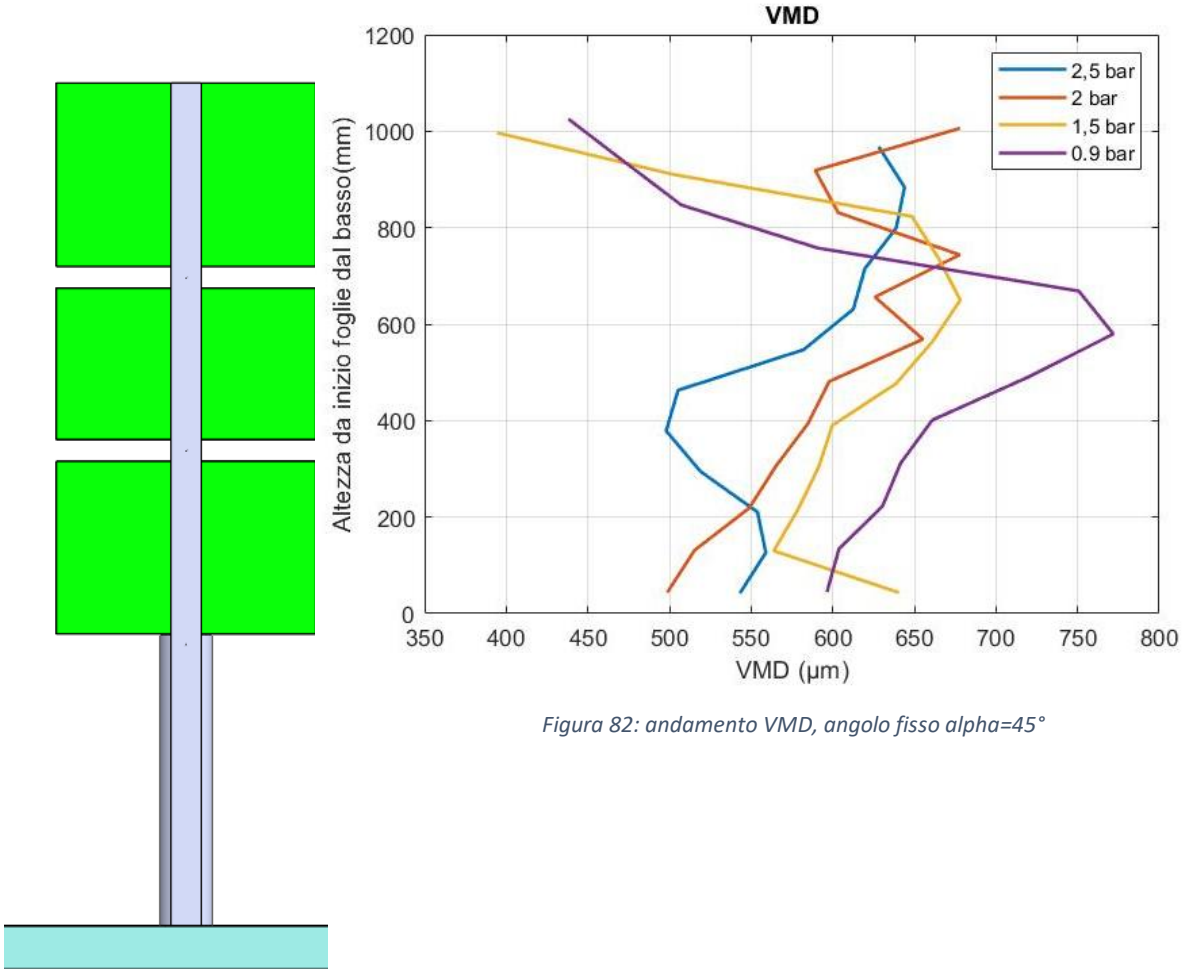


Figura 82: andamento VMD, angolo fisso alpha=45°

Osservando gli andamenti del VMD corrispondenti alle pressioni di 2,5 bar e 2 bar, si nota come essi rimangano abbastanza costanti lungo tutta l'altezza, cosa che è positiva perché evidenzia una generale omogeneità dello spruzzo. Se si osservano le altre due prove però, si nota come nella parte alta della vite ci sia un VMD molto basso, per poi avere una crescita evidente man mano che si va verso la base della vite: questo andamento è giustificato dal fatto che, a pressioni basse, lo spruzzo tende ad essere più debole e quindi il liquido si indirizza verso il basso, provocando dei goccioloni grossi in basso e poche goccioline di piccole dimensioni in alto.

Infine, si nota come il picco corrispondente alla curva viola (pressione di 0,9 bar) tocchi il valore di 772 µm, valore davvero troppo alto per questa applicazione, in quanto provocherebbe delle gocce molto grosse che scivolerebbero sulla foglia, andando a inquinare il terreno sottostante; per questo motivo è consigliabile evitare di raggiungere queste pressioni così basse, e fermarsi a dei valori che si aggirano intorno ai 1,5 bar, che assumono dei risultati ancora accettabili.

7.7.1.2. Densità di gocce

In questo paragrafo è presentata l'analisi della densità per le prove dell'ugello laterale con angolo di 45° e pressione variabile.

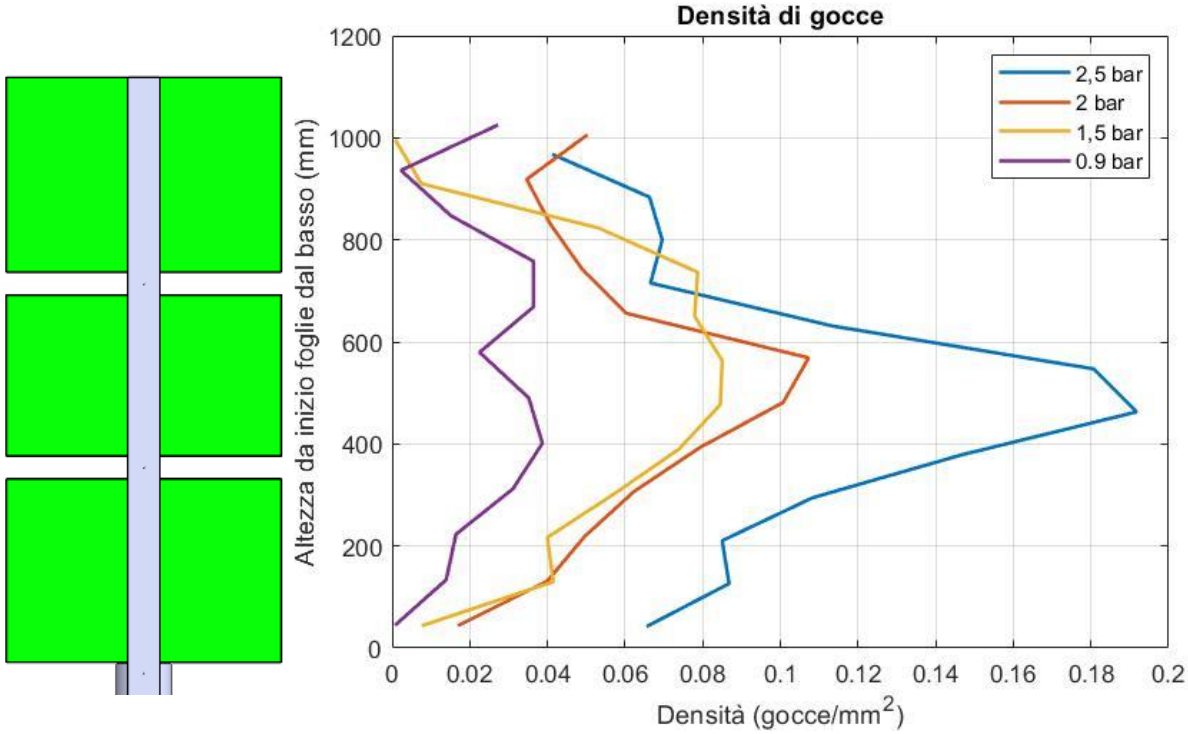


Figura 83: andamento densità di gocce, angolo fisso alpha=45°

Per quanto riguarda la densità, osservando il grafico ci si rende subito conto come al diminuire della pressione di alimentazione diminuisce anche la densità di gocce sul foglio: infatti alla pressione minima di 0,9 bar, la densità è davvero molto piccola se confrontata con i valori delle altre curve.

Inoltre, si osserva che i picchi di densità non si trovano in alto, ma nella parte centrale della vite, cosa che denota uno spruzzo ben indirizzato nella parte centrale: infatti, in corrispondenza di queste altezze, il VMD assume già valori inferiori al massimo (posto nella parte alta della vite) e quindi il getto è molto denso di gocce con area equivalente abbastanza piccola.

7.7.1.3. Area di copertura

In questo paragrafo è presentata l'analisi dell'area di copertura per le prove dell'ugello laterale con angolo di 45° e pressione variabile.

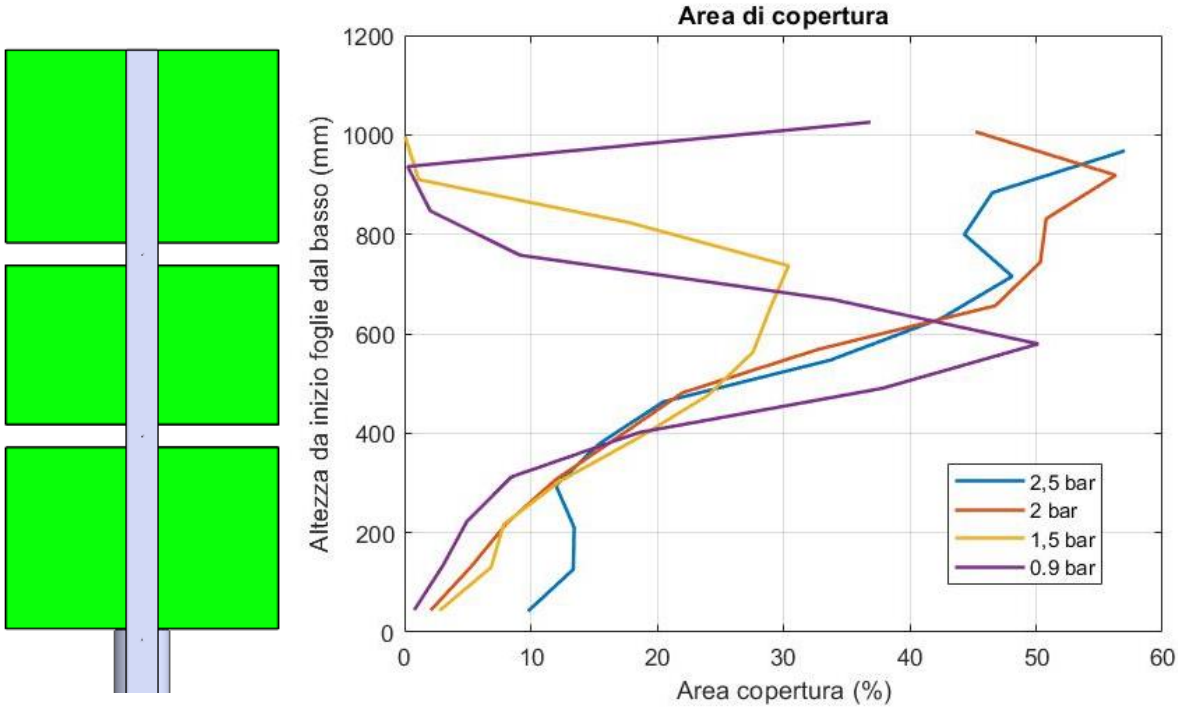


Figura 84: andamento area di copertura, angolo fisso alpha=45°

Osservando gli andamenti dell'area di copertura si può osservare subito come gli andamenti di tale parametro seguano l'andamento del VMD. Infatti, per le pressioni maggiori, il massimo dell'area di copertura si ha nella parte alta del lato della vite, fatto dovuto alle grosse gocce lasciate sul foglio (indice appunto di un VMD alto); man mano che si scende di altezza, l'area di copertura diminuisce perché le goccioline sul foglio risultano più piccole, provocando quindi un'area complessiva di ricoprimento inferiore.

La curva corrispondente alla pressione di 0,9 bar risulta molto irregolare, ma presenta il suo massimo molto in basso, cosa che indica che il getto è indirizzato verso il basso a causa della pressione insufficiente a garantire un effetto più omogeneo.

7.7.2. Grafici 3D dell'ugello inclinato di 45°

In questo paragrafo sono presentati i grafici per le prove dell'ugello laterale con angolo di 45° e pressione variabile sull'asse delle y.

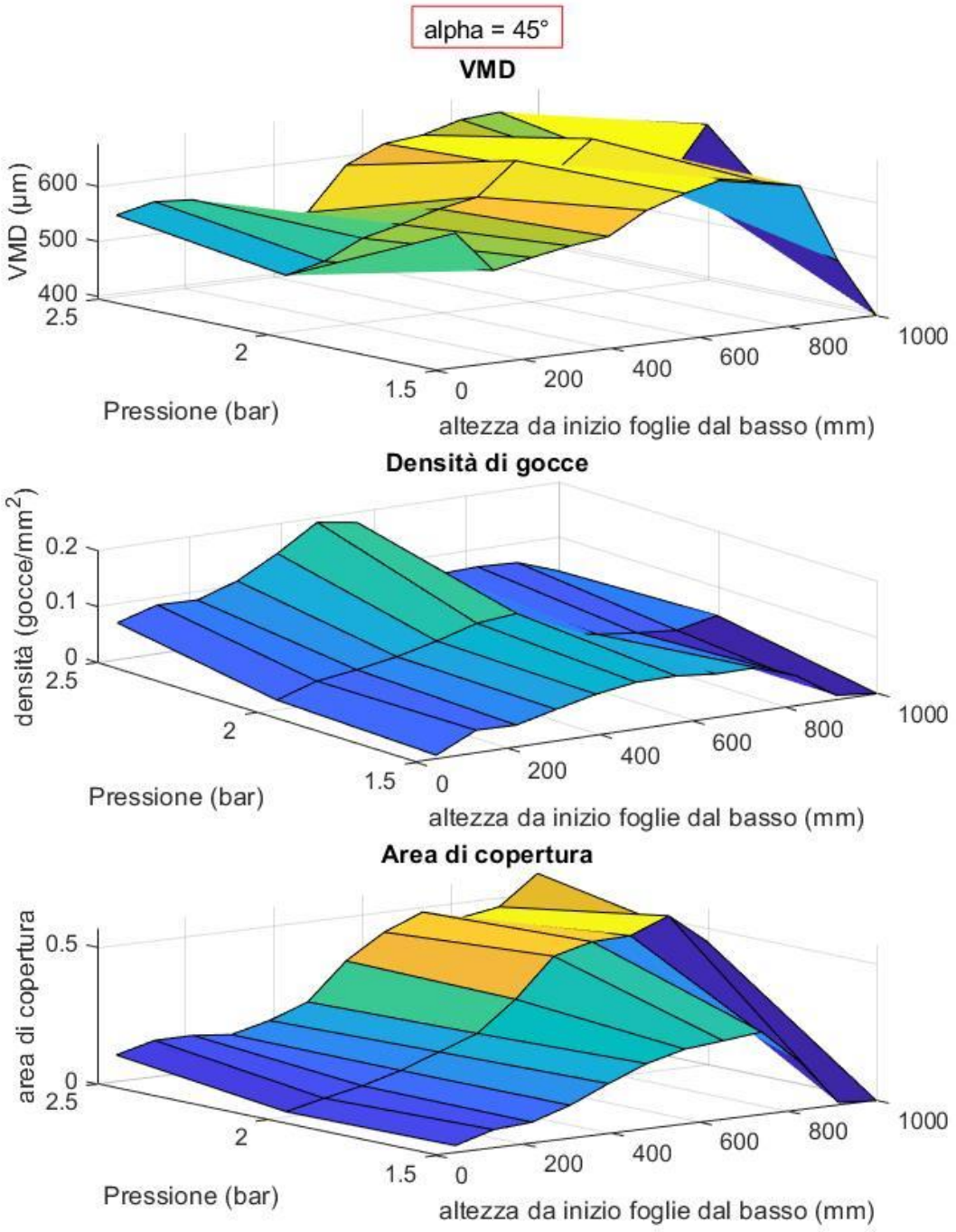


Figura 85: grafici 3D al variare della pressione con angolo fisso a alpha=45°

Come ultima disamina si sono realizzati dei grafici 3d con tutti e tre i parametri analizzati, in modo da cogliere bene l'andamento dei parametri in questione al variare della pressione; questi grafici si possono leggere anche immaginando il tempo di volo sull'asse della pressione, in quanto ad inizio volo la pressione è al valore massimo (2,5 bar in questo caso), mentre andando avanti la pressione agli ugelli diminuisce fino allo svuotamento totale del serbatoio del drone. Si osserva che il valore del VMD rimane pressoché costante al variare della

pressione, anche se c'è un leggero aumento al diminuire della pressione: ciò indica che con il passare del tempo il diametro delle gocce aumenta leggermente. Al contrario, la densità di gocce è maggiore all'inizio, in quanto lo spruzzo è più omogeneo e distribuito, mentre al diminuire della pressione lo spruzzo si fa più concentrato e con gocce più grandi. Per quanto riguarda l'area di copertura, l'andamento è simile per le tre pressioni analizzate, eccetto il valore relativo all'altezza massima alla pressione di 1,5 bar, che risulta molto basso: questo minimo si rileva in tutti e tre i parametri ed è causato dall'assenza (o quasi) di goccioline nella parte alta della vite, non raggiunta alle basse pressioni.

7.7.3. Riepilogo risultati

Nella tabella 13 vengono riportati i risultati delle prove appena analizzate; per ogni parametro viene inserito il valore massimo, il valore minimo e il valore medio, al fine di avere una visione completa della situazione.

Prova	**VMD (µm)**			**Area di copertura (%)**			**Densità (gocce/mm^2)**		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
20	644,0	497,9	575,3	57,02	9,78	29,72	0,192	0,041	0,102
19	678,1	498,7	595,1	56,31	2,08	29,05	0,107	0,017	0,058
14	678,2	394,5	596,9	30,41	0,54	14,85	0,085	0,0076	0,051
22	771,9	438,1	615,4	50,17	0,25	17,17	0,039	0,0074	0,023

Tabella 13: riassunto dei risultati dell'ugello laterale con alpha=45°

I VMD medi ottenuti per gli ugelli laterali sono più alti di quelli ottenuti dall'analisi nelle stesse condizioni dell'ugello centrale: questa differenza è dovuta al fatto che su foglio verticale potrebbe esserci un impatto diverso col foglio da parte delle gocce, che quindi potrebbe variare la definizione usata per lo spread factor. Inoltre, essendo il foglio posizionato verticalmente, le gocce che impattano sul foglio stesso tendono a scivolare verso il basso, allungando un po' l'impronta della goccia: per questo motivo si riscontrano dei VMD maggiori rispetto al caso con foglio orizzontale.

7.8. Angolo a 60° e pressione agli ugelli variabile

Le successive analisi effettuate sono quelle con angolo alpha posto a 60°; anche in questo caso si è effettuata un'analisi facendo variare la pressione mantenendo costanti gli altri parametri geometrici.

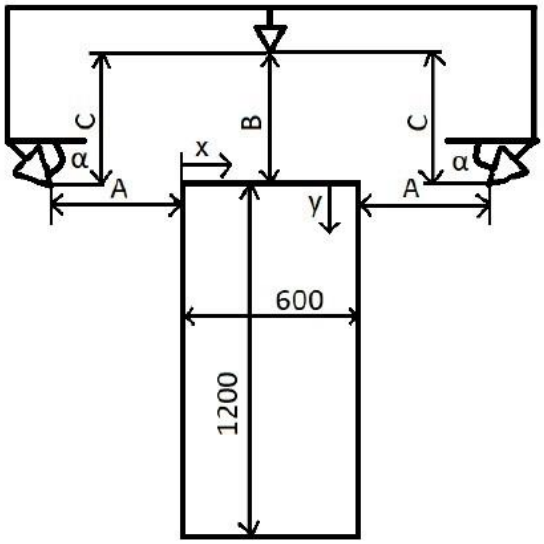


Figura 86: schema simulatore di vigneto (Festa Bianchet, 2022)

In riferimento alla figura, le quote utilizzate sono state mantenute uguali agli altri casi e corrispondono a: A=450 mm, B=450 mm, C=450 mm, mentre appunto alpha è stato impostato a 60°.

Si precisa che anche in questo caso, si è inserito il caso con pressione molto bassa (1.0 bar) perché considerato significativo durante il tempo di volo del drone, mentre non si è inserita la pressione di 3 bar, dato che l'impostazione di una tale pressione al riduttore a monte degli ugelli, risulterebbe inconcludente in quanto tale pressione può essere mantenuta solo per qualche decina di secondi dal serbatoio (come evidenziato nel capitolo 5.2.).

L'analisi sulla pressione di 3 bar è effettuata comunque successivamente per permettere il confronto tra l'alimentazione con serbatoio a vescica e quella con pompa (le prove con pompa sono state effettuate da Tobia Festa Bianchet nel lavoro precedente a questo (Festa Bianchet, 2022) a pressione di 3 bar).

Le pressioni agli ugelli riportate di seguito vanno di pari passo alle pressioni nel serbatoio, seguendo la logica seguente: si imposta il serbatoio ad una pressione alta e simultaneamente si imposta al riduttore il valore di 2.5 bar; una volta che il serbatoio scende al di sotto di questa soglia di pressione, inevitabilmente si abbassa anche la pressione agli ugelli; così, quando quest'ultima raggiunge per esempio il valore di 2 bar, si realizza la prova alla pressione di 2

bar (la numero 25 in questo caso). In questo modo si simula correttamente lo svuotamento del serbatoio durante il suo volo e le prove rispecchiano bene la situazione reale.

In tabella 14 si riportano le prove effettuate con l'angolo costante a 60°:

Numero prova	Pressione ugello (bar)	Angolo alpha (°)	Distanza ugello – foglio (mm)	Tempo di spruzzo (s)
24	2,5	60	450	0,61
25	2,0	60	450	0,63
26	1,5	60	450	0,54
27	1,0	60	450	0,56

Tabella 14: prove effettuate con angolo alpha=60°

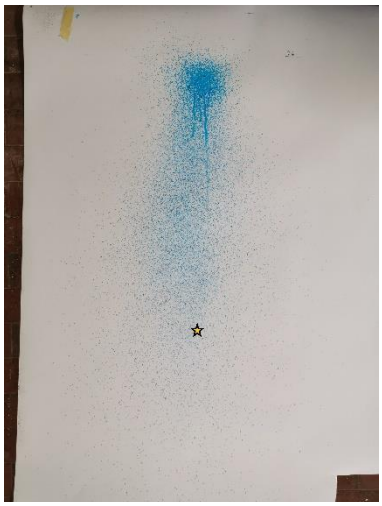


Figura 89: prova 24

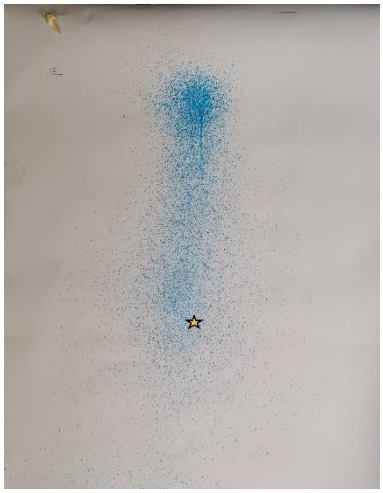


Figura 87: prova 25

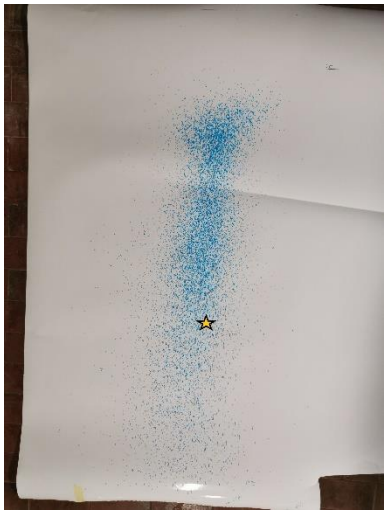


Figura 88: prova 26

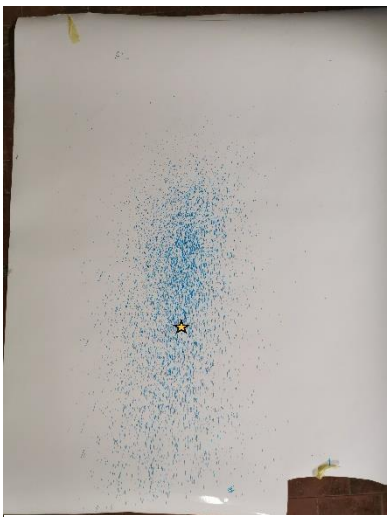


Figura 90: prova 27

Si ricorda che la stellina riportata nelle immagini rappresenta l'asse dell'ugello, che in questo caso con angolo di 60° dista circa 780 mm dal bordo superiore della vite.

Queste immagini, esattamente come fatto per gli ugelli precedenti, sono state elaborate tramite il software ImageJ (come illustrato al capitolo 6.4.) e per farlo le immagini sono state suddivise in selezioni più piccole, al fine di effettuare un'analisi abbastanza precisa. Di seguito sono riportate le immagini appena riportate con le selezioni utilizzate da imageJ per estrapolare i risultati successivamente riportati. Il numero di rettangoli utilizzati è lo stesso usato per il caso con l'angolo a 45°, al fine di avere un confronto più immediato.

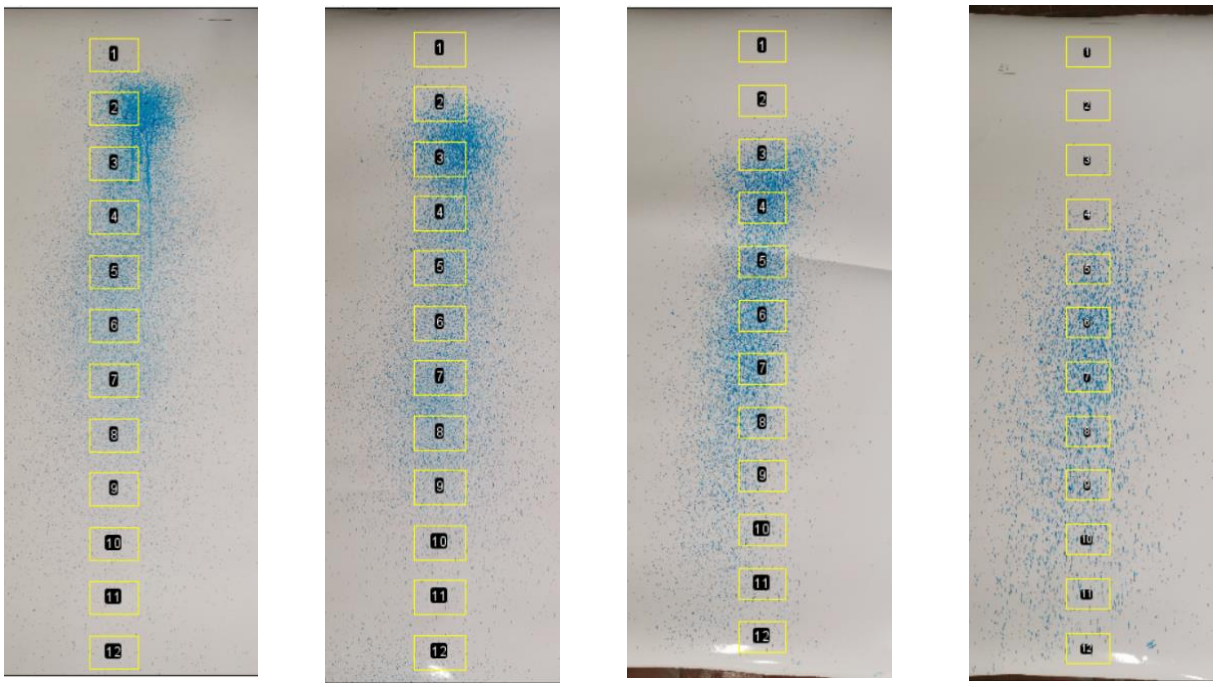


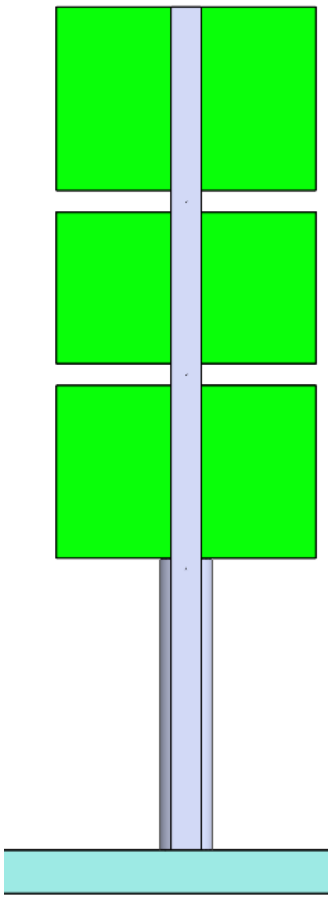
Figura 91: selezioni utilizzate nelle quattro prove

7.8.1. Andamento parametri

Dopo aver riportato le macchie di colore, si analizzano i tre parametri già esposti precedentemente; si precisa che sono stati indicati l'altezza del vigneto sulle ordinate (con a fianco anche un'immagine del simulatore di vigneto che favorisce la comprensione del grafico) e i parametri sull'asse delle ascisse. Questa scelta è stata fatta in quanto risulta immediato comprendere come variano i parametri lungo l'altezza, facendo risultare i grafici più leggibili e comprensibili.

7.8.1.1. VMD

In questo paragrafo è presentata l'analisi del VMD per le prove dell'ugello laterale con angolo di 60° e pressione variabile.



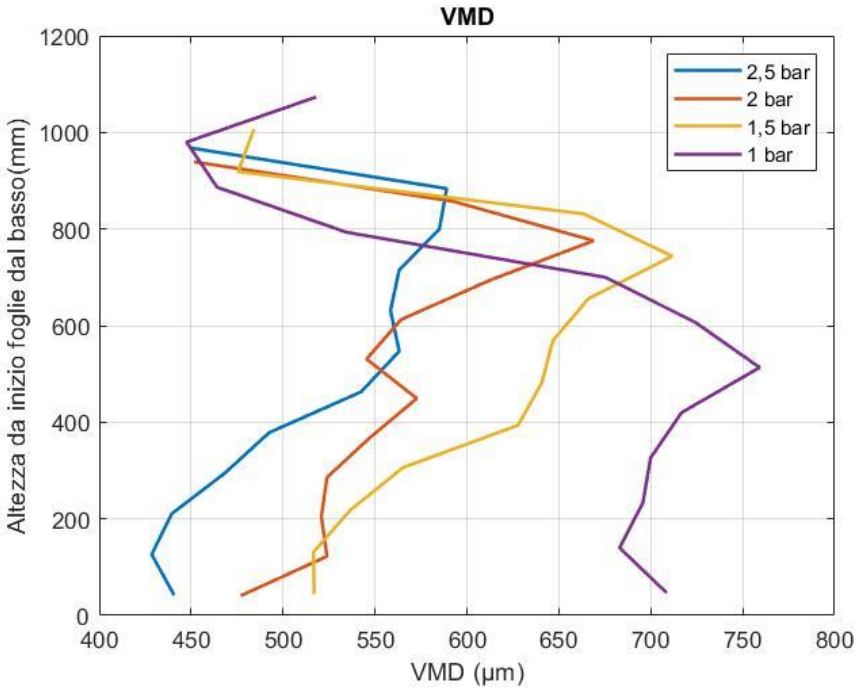


Figura 92: andamento VMD con angolo fisso alpha=60°

Osservando gli andamenti si nota che i massimi sono spostati più verso il basso rispetto al caso analizzato precedentemente con l'angolo a 45°, come ci si aspettava avendo inclinato maggiormente l'ugello. Inoltre, si nota che più la pressione è alta, più il VMD risulta più basso, il che è preferibile. Infatti, il valore massimo di VMD della curva corrispondente alla pressione di 1,0 bar supera il valore di 750 µm, che è decisamente troppo alto. Un'altra particolarità che si può leggere dal grafico è la traslazione dei punti di massimo verso il basso al decrescere della pressione degli ugelli: ciò è spiegabile dal fatto che lo spruzzo uscente dagli ugelli è meno "potente" alle pressioni più basse, e quindi le gocce escono più grandi e si distribuiscono più in basso.

7.8.1.2. Densità di gocce

In questo paragrafo è presentata l'analisi della densità per le prove dell'ugello laterale con angolo di 60° e pressione variabile

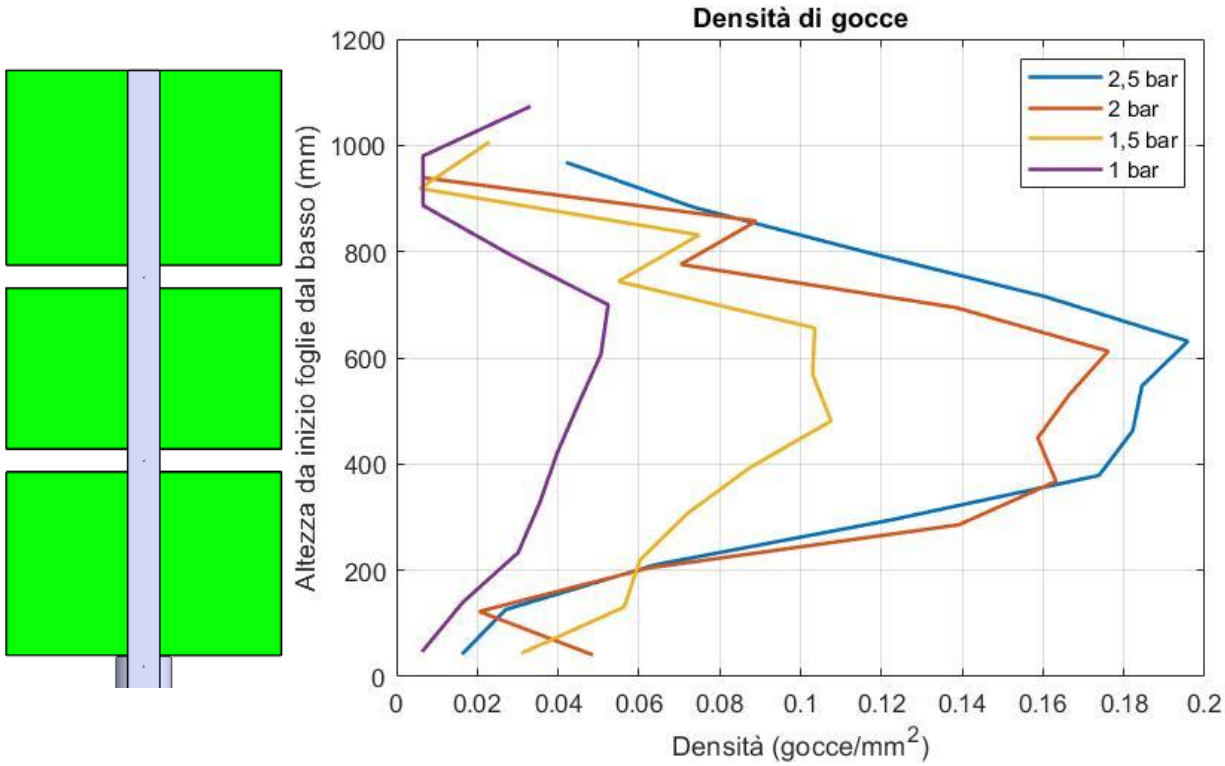


Figura 93: andamento densità di gocce con angolo fisso alpha=60°

Osservando ora le curve rappresentanti la densità di gocce, si nota che, similmente a prima, a pressioni alte la densità delle gocce risulta essere molto più alta, il che denota uno spruzzo più efficace ed omogeneo. Anche in questo caso la curva ricavata con il valore di pressione a 1 bar evidenzia dei valori di densità davvero molto bassi e che si discostano di molto dalle altre curve. Si nota inoltre come il massimo della densità sia a circa metà altezza (600 mm), mentre nella parte alta del vigneto la densità sia praticamente nulla: ciò ci suggerisce che forse gli ugelli sono stati inclinati un po' troppo e non coprono più bene la parte alta del vigneto.

7.8.1.3. Area di copertura

In questo paragrafo è presentata l'analisi dell'area di copertura per le prove dell'ugello laterale con angolo di 60° e pressione variabile

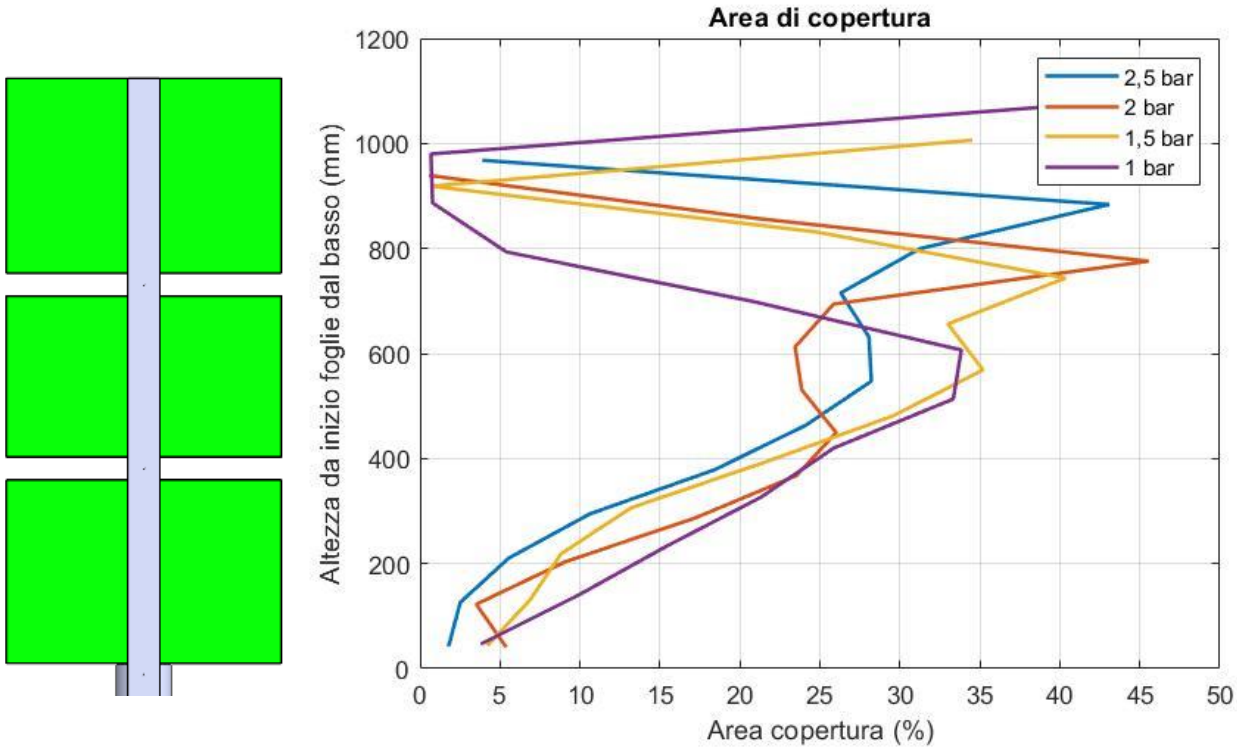


Figura 94: andamento area di copertura con angolo fisso alpha=60°

Come si è osservato già nel caso precedente (angolo alpha=45°) le curve che disegnano l'andamento dell'area di copertura ricalcano l'andamento del VMD. Per le pressioni alte il massimo si manifesta ad un'altezza di circa 800 mm, proprio come nel VMD; a differenza del caso precedente anche qui i massimi sono traslati più in basso, a causa di un angolo di inclinazione dell'ugello maggiore.

Il valore molto alto riscontrato per la curva a pressione di 1 bar all'altezza massima è probabilmente frutto di un'imprecisione dovuta dall'elaborazione dell'immagine su ImageJ: infatti, osservando lo spruzzo sul foglio (riportato con la figura 92), si nota come in alto siano praticamente assenti le goccioline di liquido, e quindi di conseguenza l'area di copertura dovrebbe risultare pari a un valore simile allo zero. Escludendo questo valore, il massimo della curva viola è molto più in basso rispetto al massimo delle altre curve, il che indica di nuovo come questa pressione sia un po' troppo bassa e quindi sarebbe preferibilmente da escludere.

7.8.2. Grafici 3D

Ora si riportano i grafici 3D degli ugelli laterali con angolo a 60° e pressioni variabili lungo l'asse delle ordinate.

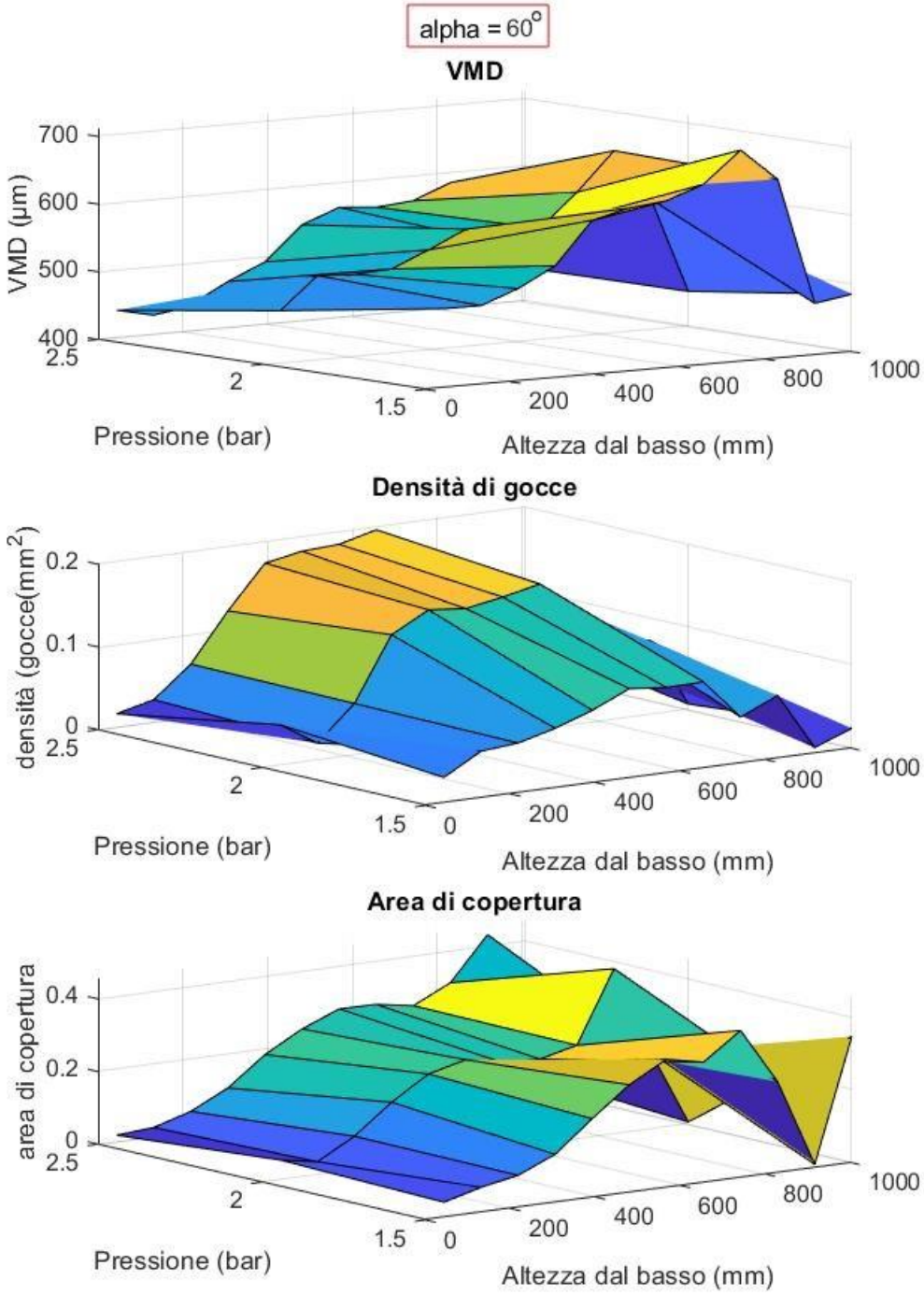


Figura 95: grafici 3D con pressione variabile e angolo fisso alpha=60°

Come ultima disamina si sono realizzati dei grafici 3D con tutti e tre i parametri analizzati, in modo da cogliere bene l'andamento dei parametri in questione al variare della pressione; questi grafici si possono leggere anche immaginando il tempo di volo sull'asse della pressione,

in quanto ad inizio volo la pressione è al valore massimo (2,5 bar in questo caso), mentre andando avanti la pressione agli ugelli diminuisce fino allo svuotamento totale del serbatoio del drone. Si è scelto di non considerare in questi grafici il valore di pressione di 1,0 bar, in quanto si è visto precedentemente che i risultati ottenuti in questo caso non erano soddisfacenti e, se possibile, è meglio evitarli.

Il valore di VMD si vede che col passare del tempo (al diminuire della pressione quindi) aumenta e assume valori più alti, peggiorando la qualità delle goccioline emesse dagli ugelli, che risultano più grandi. Al contrario, il valore della densità di gocce al decrescere della pressione decresce sensibilmente: ciò evidenzia ancora una volta come le prestazioni del drone peggiorano quando la pressione all'interno del serbatoio diminuisce.

7.8.3. Riepilogo risultati

Nella tabella 15 vengono riportati i risultati delle prove appena analizzate; per ogni parametro viene inserito il valore massimo, il valore minimo e il valore medio, al fine di avere una visione completa della situazione.

Prova	**VMD (µm)**			**Area di copertura (%)**			**Densità (gocce/mm^2)**		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
24	589,0	428,5	510,0	43,09	1,78	18,65	0,196	0,016	0,113
25	669,0	451,4	550,0	45,55	0,56	18,75	0,176	0,0066	0,103
26	711,7	475,6	587,7	40,35	0,67	21,07	0,108	0,0058	0,065
27	759,2	447,5	635,6	40,76	0,68	17,65	0,052	0,0063	0,029

Tabella 15: riassunto dei risultati dell'ugello laterale con alpha=60°

I VMD medi ottenuti con questa inclinazione sono in media più bassi rispetto a quelli ottenuti con l'angolo a 45°: anche in questo caso la causa potrebbe essere il diverso impatto col foglio da parte delle gocce, che quindi potrebbe variare la definizione usata per lo spread factor. Si registrano al contrario dei valori di densità più bassi, il che non è vantaggioso per lo spruzzo. Per cercare di unire i buoni risultati di VMD ottenuti in questo caso e quelli di densità ottenuti con l'angolo a 45°, si è deciso di testare il caso con angolo alpha=53°.

7.9. Angolo a 53° e pressione agli ugelli variabile

Le successive analisi effettuate sono quelle con angolo alpha posto a 53°, che equivale a un compromesso tra i due casi precedentemente analizzati; anche in questo caso si è effettuata un'analisi facendo variare la pressione mantenendo costanti gli altri parametri geometrici.

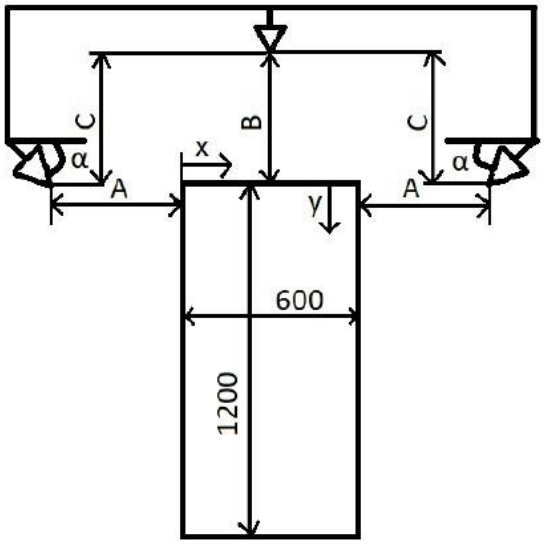


Figura 96: schema del simulatore di vigneto (Festa Bianchet, 2022)

In riferimento alla figura, le quote utilizzate sono state mantenute uguali agli altri casi e corrispondono a: A=450 mm, B=450 mm, C=450 mm, mentre appunto alpha è stato impostato a 53°.

Si precisa che anche in questo caso, si è inserito il caso con pressione molto bassa (1.0 bar) perché considerato significativo durante il tempo di volo del drone, mentre non si è inserita la pressione di 3 bar, dato che l'impostazione di una tale pressione al riduttore a monte degli ugelli, risulterebbe inconcludente in quanto tale pressione può essere mantenuta solo per qualche decina di secondi dal serbatoio (come evidenziato nel capitolo 5.2.).

L'analisi sulla pressione di 3 bar è effettuata comunque successivamente per permettere il confronto tra l'alimentazione con serbatoio a vescica e quella con pompa (le prove con pompa sono state effettuate da Tobia Festa Bianchet nel lavoro precedente a questo (Festa Bianchet, 2022) a pressione di 3 bar).

Le pressioni agli ugelli riportate di seguito vanno di pari passo alle pressioni nel serbatoio, seguendo la logica seguente: si imposta il serbatoio ad una pressione alta e simultaneamente si imposta al riduttore il valore di 2.5 bar; una volta che il serbatoio scende al di sotto di questa soglia di pressione, inevitabilmente si abbassa anche la pressione agli ugelli; così, quando quest'ultima raggiunge per esempio il valore di 2 bar, si realizza la prova alla pressione di 2

bar (la numero 29 in questo caso). In questo modo si simula correttamente lo svuotamento del serbatoio durante il suo volo e le prove rispecchiano bene la situazione reale.

In tabella 16 si riportano le prove effettuate con l'angolo costante a 53°:

Numero prova	Pressione ugello (bar)	Angolo alpha (°)	Distanza ugello – foglio (mm)	Tempo di spruzzo (s)
28	2,5	53	450	0,59
29	2,0	53	450	0,55
30	1,5	53	450	0,49
31	1,0	53	450	0,54

Tabella 16: elenco prove effettuate con angolo fisso alpha=53°

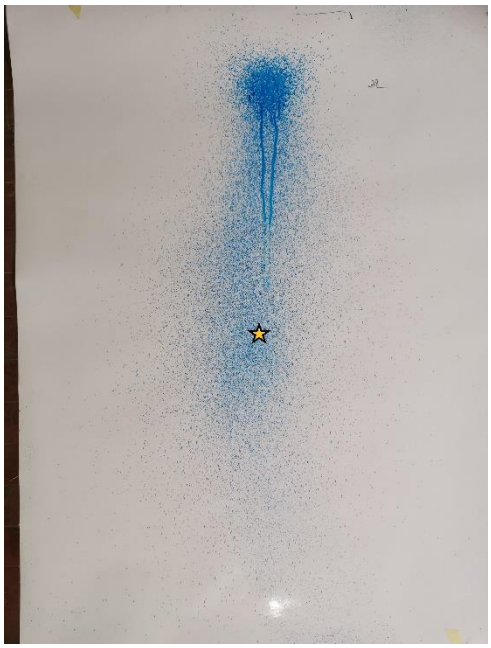


Figura 98: prova 28

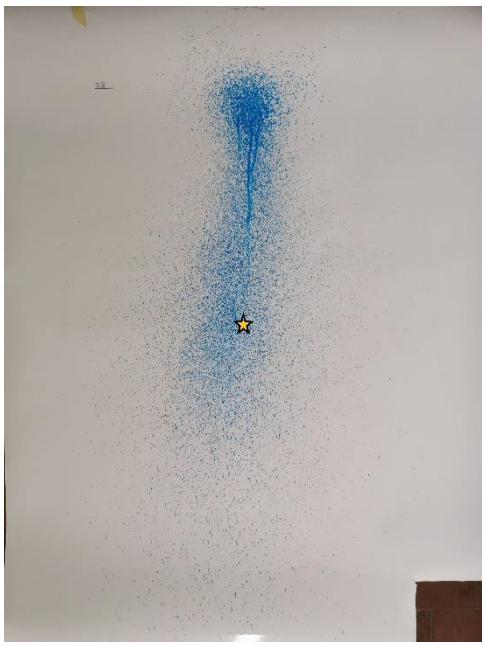


Figura 97: prova 29

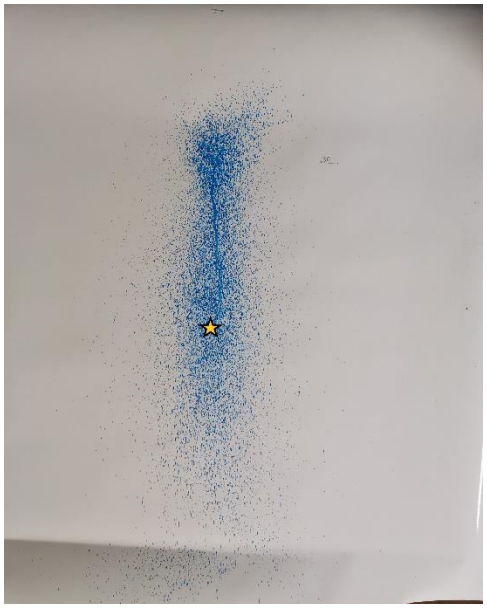


Figura 99: prova 30

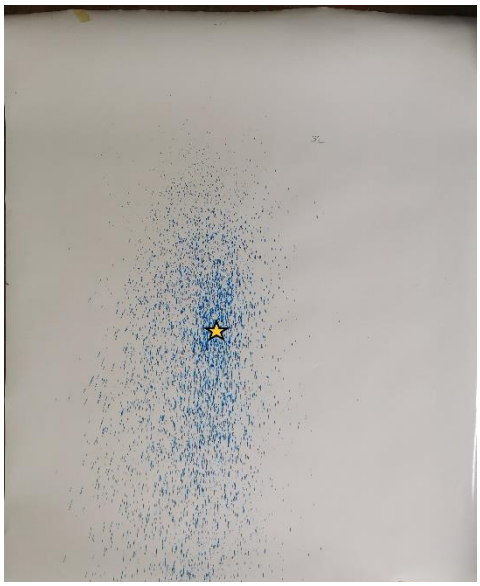


Figura 100: prova 31

Si ricorda che la stellina riportata nelle immagini rappresenta l'asse dell'ugello, che in questo caso con angolo di 53° dista circa 597 mm dal bordo superiore della vite.

Queste immagini, esattamente come fatto per gli ugelli precedenti, sono state elaborate tramite il software ImageJ (come illustrato al capitolo 6.4.) e per farlo le immagini sono state suddivise in selezioni più piccole, al fine di effettuare un'analisi abbastanza precisa

Di seguito sono riportate le immagini appena riportate con le selezioni utilizzate da imageJ per estrapolare i risultati successivamente riportati. Il numero di rettangoli utilizzati è lo stesso usato per i casi precedenti (con angoli di 45° e 60°), al fine di avere un confronto più immediato.

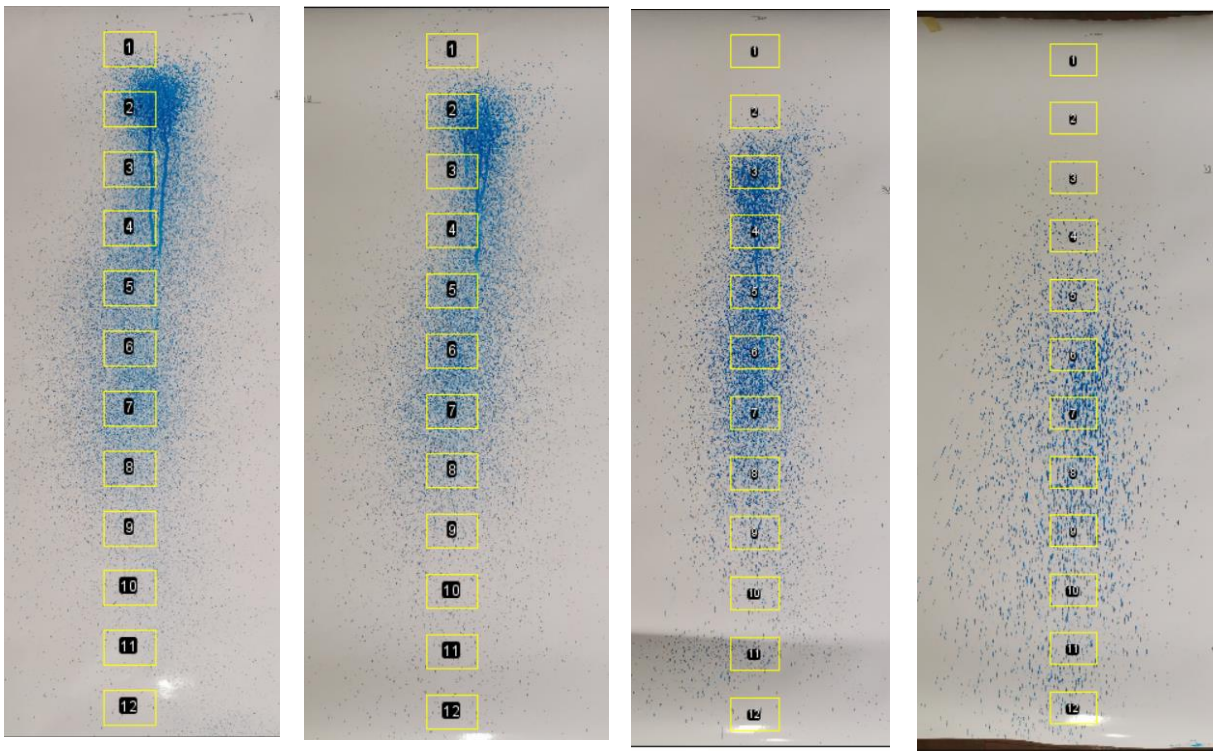


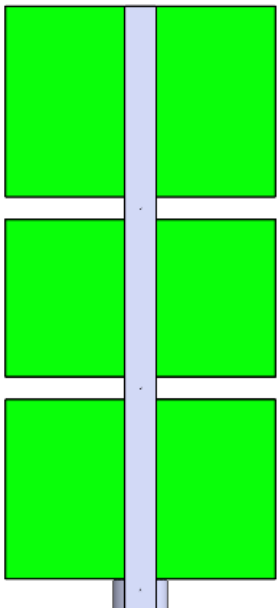
Tabella 17: selezioni utilizzate per i quattro casi con angolo fisso alpha=53°

7.9.1. Andamento parametri

Dopo aver riportato le macchie di colore, si analizzano i tre parametri già esposti precedentemente; si precisa che sono stati indicati l'altezza del vigneto sulle ordinate (con a fianco anche un'immagine del simulatore di vigneto che favorisce la comprensione del grafico) e i parametri sull'asse delle ascisse. Questa scelta è stata fatta in quanto risulta immediato comprendere come variano i parametri lungo l'altezza, facendo risultare i grafici più leggibili e comprensibili.

7.9.1.1. VMD

In questo paragrafo è presentata l'analisi del VMD per le prove dell'ugello laterale con angolo di 53° e pressione variabile.



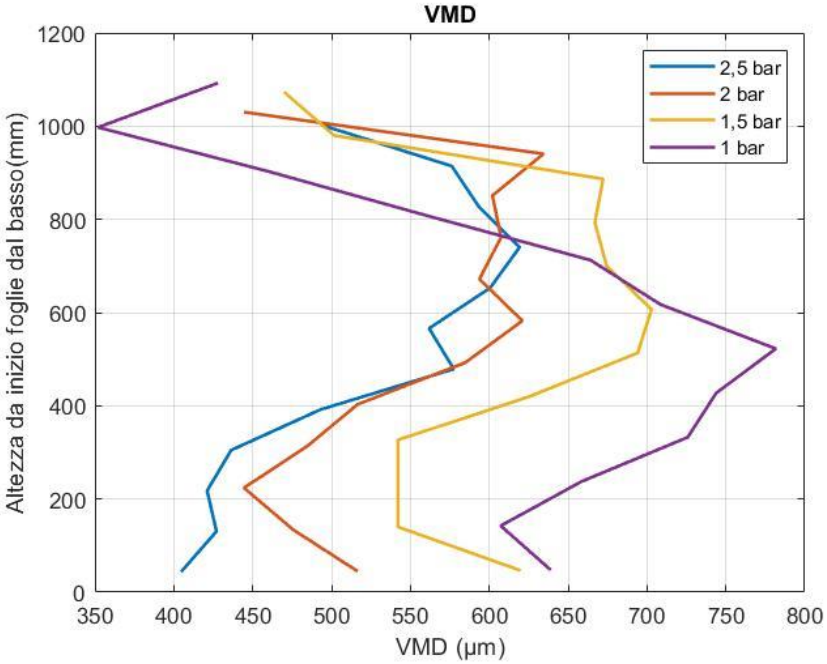


Figura 101: andamento VMD con angolo fisso alpha=53°

Osservando le curve appena riportate del VMD si osserva come gli andamenti siano simili ai casi analizzati in precedenza: in particolare, osservando la curva blu (corrispondente alla pressione di 2,5 bar) si nota come l'andamento sia praticamente equivalente agli altri casi, con la sola eccezione che il punto di massimo si trova più in basso rispetto alla curva ricavata con l'angolo a 45°; anche i valori di VMD sono compresi tra i valori calcolati precedentemente, come ci si aspettava. I valori esatti sono riportati e analizzati nel dettaglio a fine capitolo.

Anche in questa situazione, la curva corrispondente alla pressione di 1,0 bar risulta essere molto diversa dalle altre e raggiunge dei valori molto alti di VMD, il che non risulta essere appropriato.

In generale, l'andamento del VMD risulta essere decrescente man mano che si scende di altezza, eccetto per le altezze più alte dove il diametro delle gocce è molto piccolo: quest'andamento era stato rilevato anche negli altri due casi, con gli angoli di 45° e 60°.

7.9.1.2. Densità di gocce

In questo paragrafo è presentata l'analisi della densità per le prove dell'ugello laterale con angolo di 53° e pressione variabile.

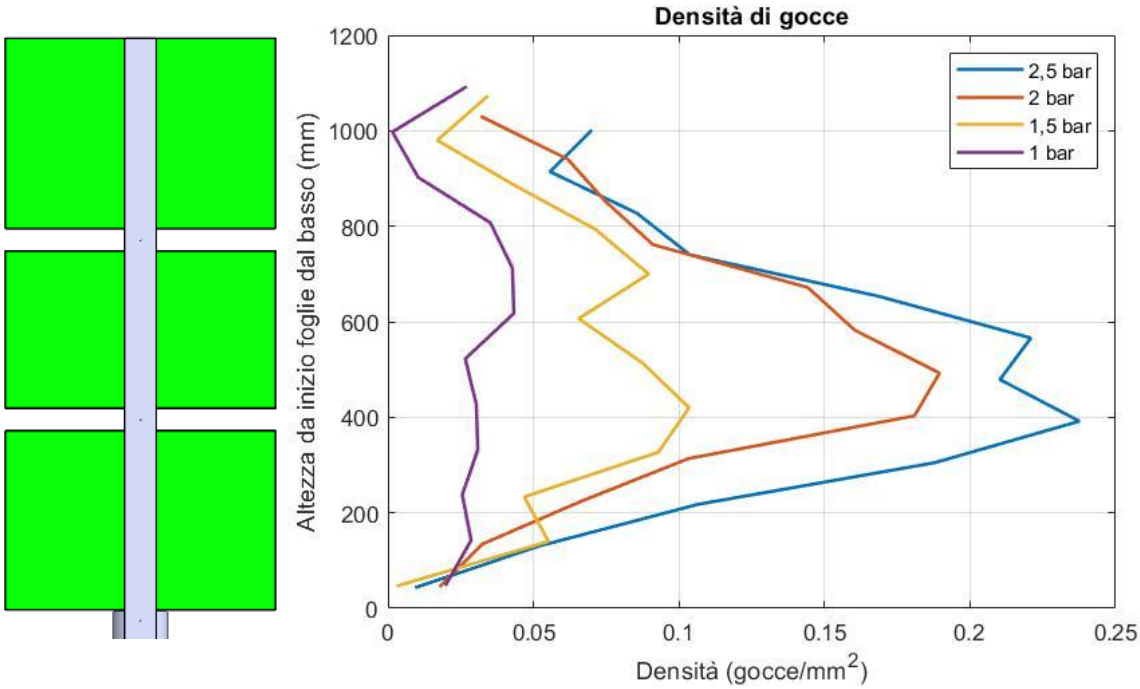
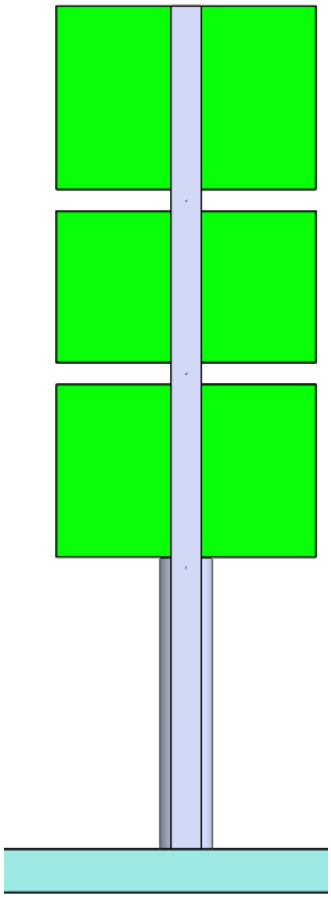


Figura 102: andamento densità di gocce con angolo fisso alpha=53°

Come negli altri casi, su queste curve si nota immediatamente la differenza dei valori assunti dalla densità al variare della pressione: per i valori elevati di pressione, la densità delle gocce è soddisfacente, specialmente nelle aree tra le altezze di 400 e 600 mm, dove ci sono molte gocce con un diametro medio abbastanza contenuto (come si è notato nell'analisi del VMD). Per pressioni più basse invece il valore della densità risulta molto basso a tutte le altezze: infatti osservando la curva viola il valore di densità risulta praticamente costante per qualsiasi altezza.

7.9.1.3. Area di copertura

In questo paragrafo è presentata l'analisi dell'area di copertura per le prove dell'ugello laterale con angolo di 53° e pressione variabile.



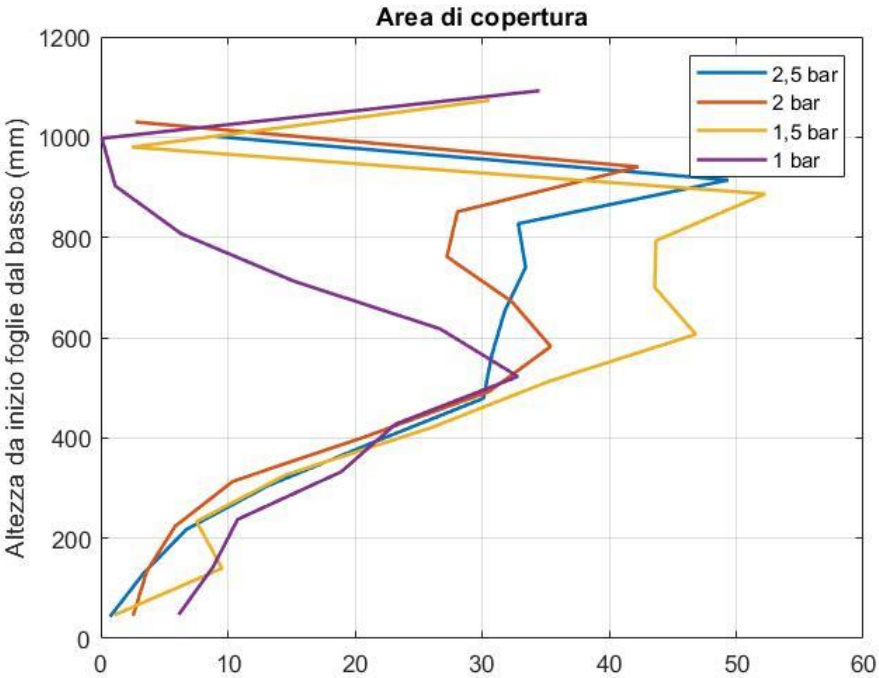


Figura 103: andamento area di copertura con angolo fisso alpha=53°

Per quanto riguarda l'area di copertura l'andamento è molto simile per le pressioni di 2.5, 2 e 1.5 bar, mentre la curva relativa alla pressione di 1 bar risulta essere molto diversa dalle altre, e assume valori bassi. Le restanti tre curve assumono un andamento decrescente al diminuire dell'altezza, tendenza che si era riscontrata anche nei casi precedenti con angoli diversi.

Anche in questo grafico, come era già avvenuto per l'area di copertura con angolo di 60°, ad altezza massima le curve con pressione bassa presentano un picco ingiustificato osservando le foto degli spruzzi: questo potrebbe essere causato da un errore di ImageJ durante l'elaborazione dell'immagine.

7.9.2. Grafici 3D

In questo paragrafo si riportano i grafici 3D dell'ugello laterale con pressione variabile rappresentata sull'asse delle y.

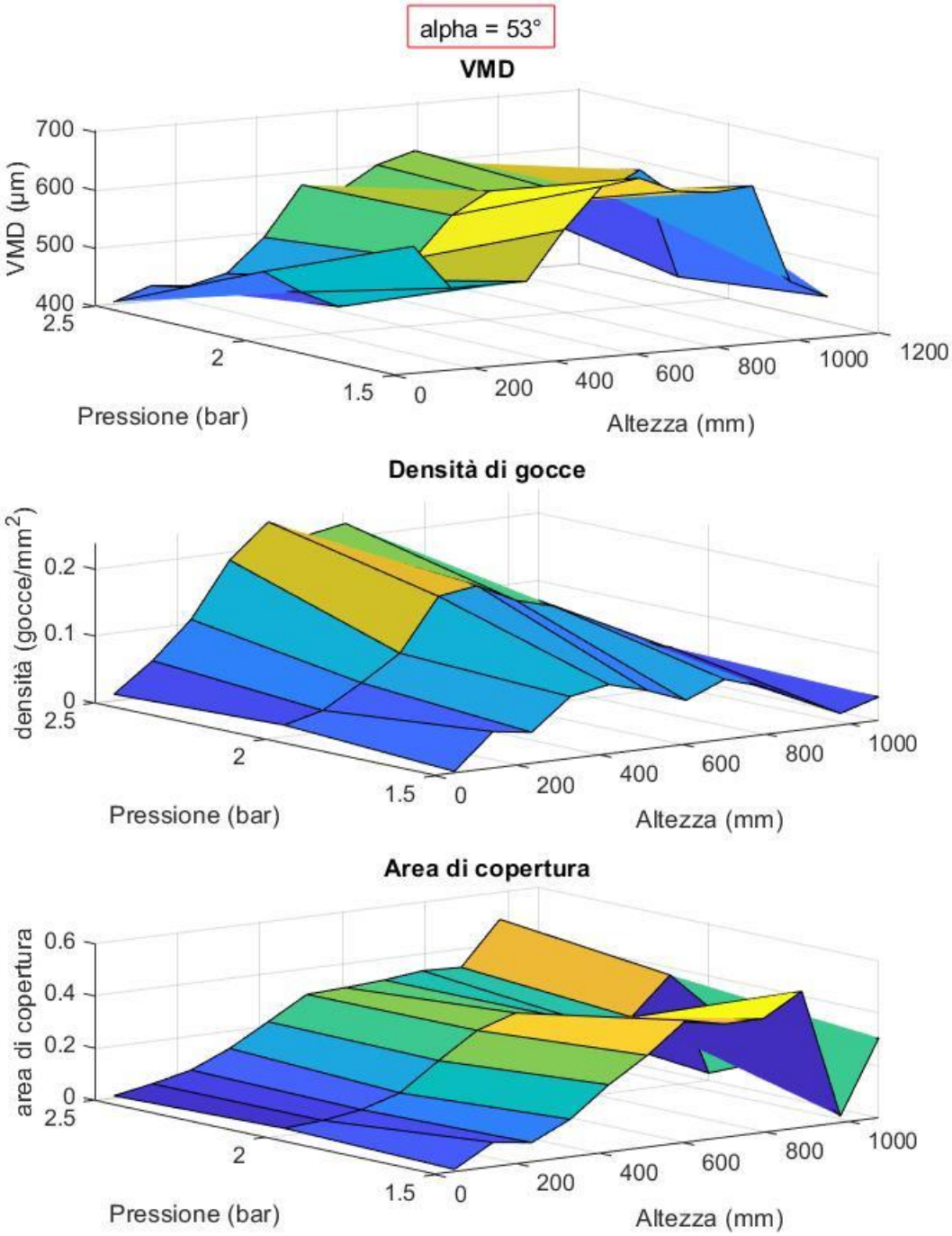


Figura 104: grafici 3D con pressione variabile e con angolo fisso alpha=53°

Come ultima disamina si sono realizzati dei grafici 3D con tutti e tre i parametri analizzati, in modo da cogliere bene l'andamento dei parametri in questione al variare della pressione. Come già illustrato nei casi precedenti, questi grafici si possono leggere anche immaginando

il tempo di volo sull'asse della pressione, in quanto ad inizio volo la pressione è al valore massimo (2,5 bar in questo caso), mentre andando avanti la pressione agli ugelli diminuisce fino allo svuotamento totale del serbatoio del drone. Si è scelto di non considerare in questi grafici il valore di pressione di 1,0 bar, in quanto si è visto precedentemente che i risultati ottenuti in questo caso non erano soddisfacenti e, se possibile, è meglio evitarli.

Gli andamenti dei tre parametri analizzati sono molto simili a quelli già illustrati per gli altri angoli, cambiano solamente i valori e la disposizione dei massimi. Il VMD man mano che la pressione diminuisce assume dei valori crescenti, a causa della potenza minore dello spruzzo. Al contrario, la densità delle gocce a pressioni alte è ad un valore elevato (specialmente in corrispondenza dell'altezza di 600 mm), mentre a pressioni inferiori (che corrispondono a quelle con il serbatoio quasi vuoto) la densità è molto bassa: ciò evidenzia un calo delle prestazioni durante il tempo di volo del drone per quanto riguarda la densità. L'area di copertura non subisce particolari variazioni al variare del tempo (e della pressione): infatti quando la densità delle gocce decresce, aumenta il VMD delle gocce, mantenendo circa costante l'area coperta sul foglio. Chiaramente la situazione con gocce grandi e mal distribuite è molto meno vantaggiosa rispetto al caso di tante gocce più piccole distribuite meglio, in quanto le gocce troppo grosse rischiano di scivolare sulle foglie e cadere a terra, inquinando il terreno sottostante.

7.9.3. Riepilogo risultati

Nella tabella 18 vengono riportati i risultati delle prove appena analizzate; per ogni parametro viene inserito il valore massimo, il valore minimo e il valore medio, al fine di avere una visione completa della situazione.

Prova	**VMD (µm)**			**Area di copertura (%)**			**Densità (gocce/mm^2)**		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
28	619,3	404,6	517,1	49,37	0,72	21,90	0,238	0,0094	0,126
29	634,4	444,5	543,8	42,30	1,54	20,16	0,190	0,0177	0,096
30	702,9	469,9	604,5	49,28	1,07	26,12	0,104	0,0030	0,059
31	781,7	351,9	610,8	34,53	0,09	15,39	0,043	0,0015	0,027

Tabella 18: riassunto dei risultati dell'ugello centrale con angolo fisso alpha=53°

Osservando i valori medi dei tre parametri delle prove con pressione più alta e confrontandoli con quelli riportati in tabella 13 e 15 con gli angoli di 45° e 60°, si nota come i valori ottenuti ora sono intermedi tra quelli delle altre due inclinazioni di ugello: questo risultato rende valide le prove, in quanto l'angolo impostato era intermedio e quindi ci si aspettava una media tra gli altri due valori. Analizzando invece solo i valori tabellati di questa prova, si nota che il VMD medio è crescente, mentre l'area di copertura è variabile e non segue un andamento preciso al calare della pressione: ciò potrebbe essere causato anche dal tempo di spruzzo, che essendo regolato manualmente, può essere soggetto a errori e quindi far variare qualche risultato.

7.10. Analisi con angolo variabile e pressione costante

Per concludere questa sezione si riportano due grafici nei quali la pressione è costante per tutte le prove, mentre a variare è l'angolo alpha, che assume i valori di 45°, 53° e 60°. I valori scelti per la pressione sono 2,0 bar e 3,0 bar, che corrisponde alla pressione alla quale gli ugelli lavorano in maniera ottimale con l'alimentazione della pompa.

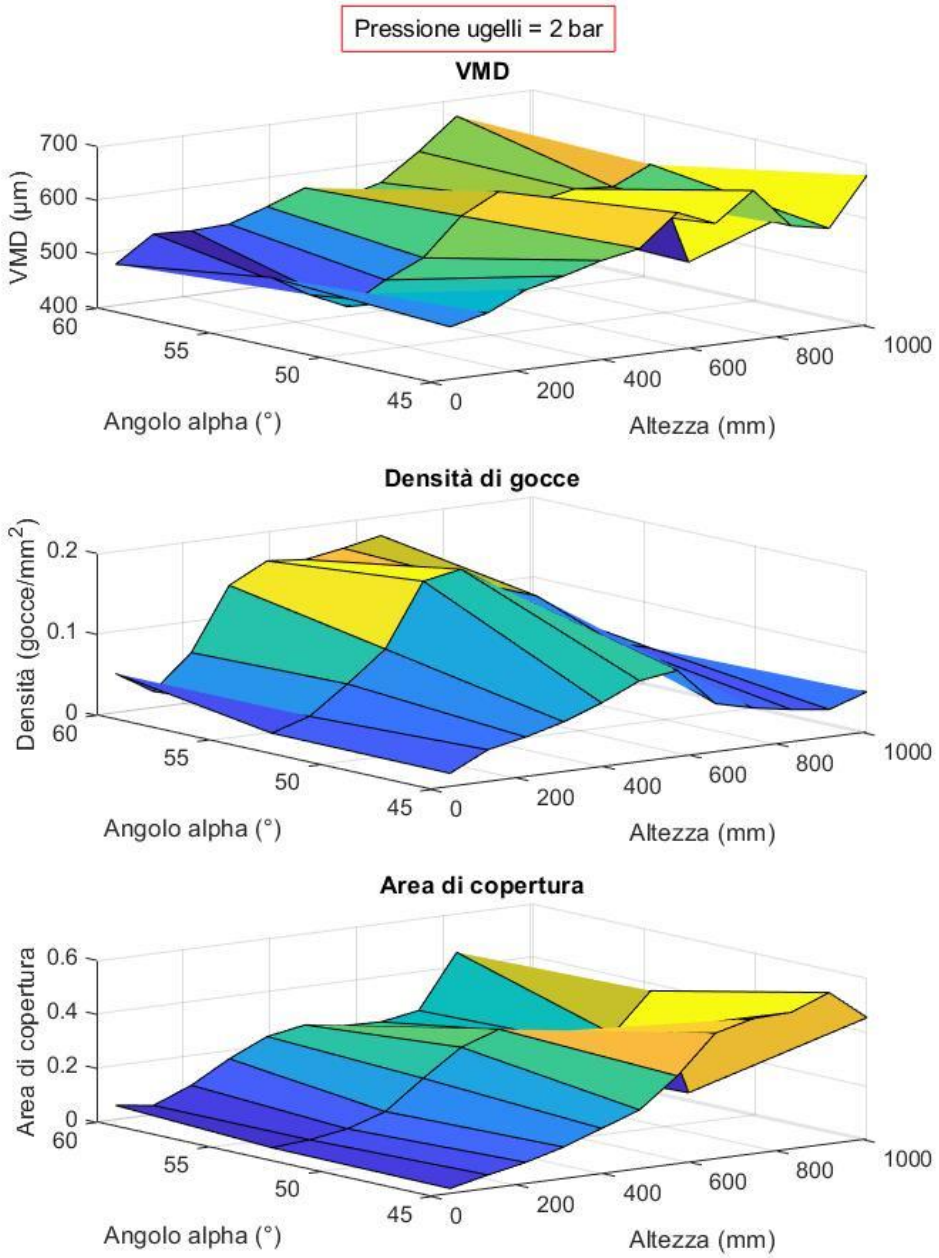


Figura 105: grafici 3D con angolo variabile e pressione fissa a 2 bar

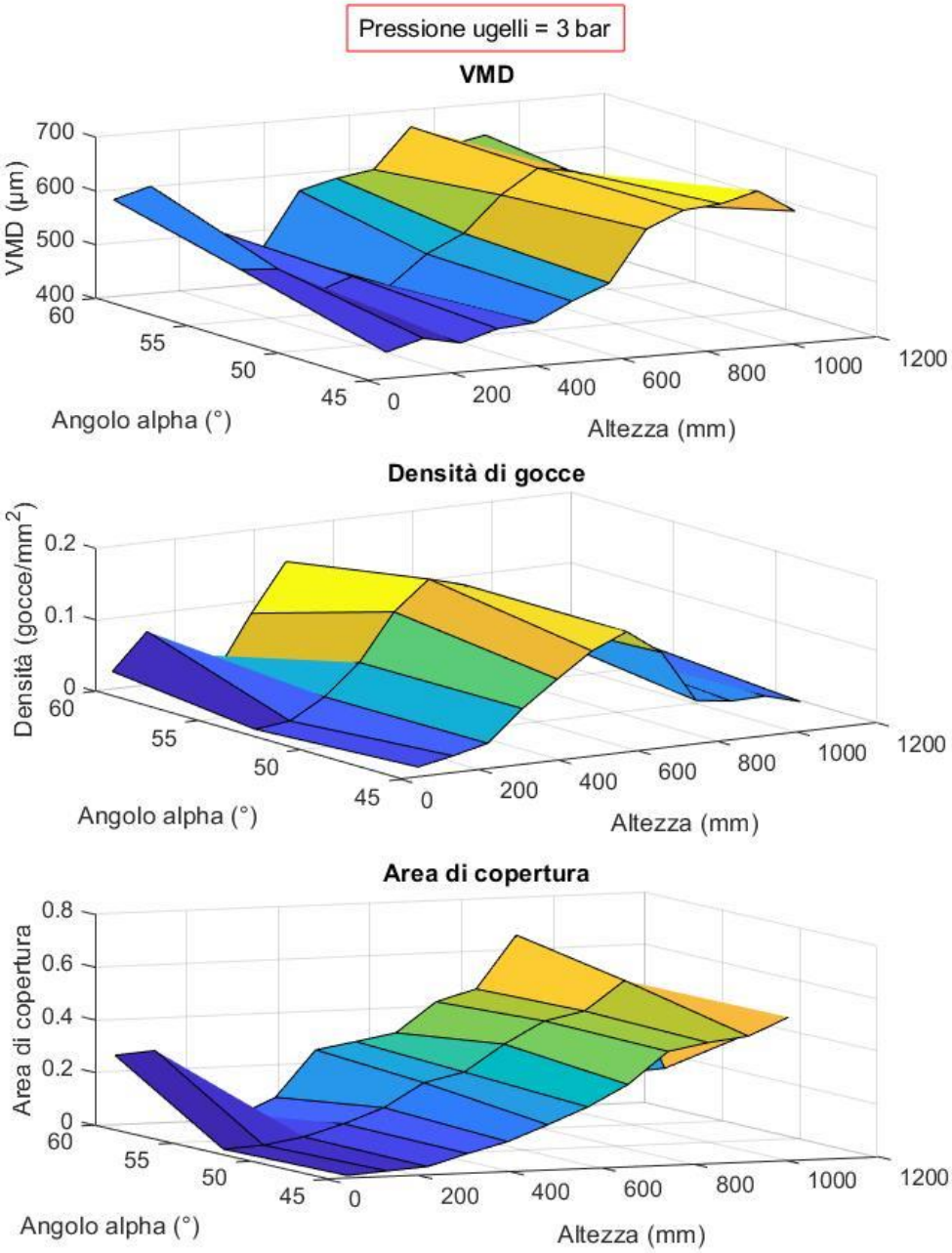


Figura 106: grafici 3D con angolo variabile e pressione fissa a 3 bar

Dai grafici appena riportati si possono notare alcune considerazioni fatte in precedenza. In particolare, per il VMD si può osservare come il massimo per ogni curva si trovi ad altezze minori per angoli via via crescenti: infatti, guardando il caso con pressione agli ugelli di 3 bar, il VMD massimo a 45° si trova all'altezza di circa 900 mm, mentre per il caso con angolo a 60° il massimo è più di 200 mm più in basso, sintomo di un'influenza importante dell'angolo di inclinazione degli ugelli.

Lo stesso fenomeno è riscontrabile anche osservando la curva della densità, dove il valore massimo a 60° si riscontra ad altezze inferiori rispetto al caso con angolo di 45°.

Per l'area di copertura, invece, non si rilevano particolari differenze di distribuzione al variare dell'angolo: l'unica considerazione rilevante è notare come all'altezza massima, il caso con alpha=60° ha un valore ben più basso rispetto al caso con alpha=45°, anche se dalle figure 3D non si osserva così facilmente. Inoltre, per tutte le curve e osservazioni fatte, si nota come i valori ricavati con l'angolo a 53° si pongono a valori intermedi tra i due estremi, validando così i risultati ottenuti.

8. Capitolo 8: Confronto tra alimentazione con serbatoio e con pompa

Dopo aver analizzato dettagliatamente le prestazioni del serbatoio a varie pressioni e con varie angolature dell'ugello, risulta opportuno confrontare i risultati ottenuti con quelli ottenuti nelle medesime condizioni con l'alimentazione della pompa. In questo modo, se i risultati dovessero risultare coerenti, si potrebbero estendere tutte le considerazioni e studi fatti con l'alimentazione con la pompa al caso del drone alimentato con serbatoio. In particolare, negli studi precedenti a questo, effettuati da Antonio Conte (Conte, 2022), Antonio Frate (Frate, 2022) e Tobia Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022), sono stati presi in considerazione molti tipi di ugelli, sia a ventaglio che a cono, ed analizzati nel dettaglio singolarmente con l'alimentazione tramite pompa. Se confrontando i risultati del circuito a tre ugelli con il serbatoio si ottengono dei risultati simili a quelli ottenuti con lo stesso circuito ma con la pompa, tutti gli studi effettuati precedentemente possono essere applicati al caso reale.

Dato che le prove sul circuito a tre ugelli alimentato dalla pompa sono state eseguite alla pressione di 3.0 bar, per fare un confronto corretto sono state effettuate delle prove a 3 bar anche con l'alimentazione tramite serbatoio.

Similmente a quanto fatto finora, si riporta prima il confronto tra i due casi dello spruzzo centrale e successivamente quelli degli ugelli laterali, con gli angoli a 45°, 60° e infine 53°.

Per i grafici, si fa riferimento allo schema già precedentemente illustrato, riportato anche in figura 107.

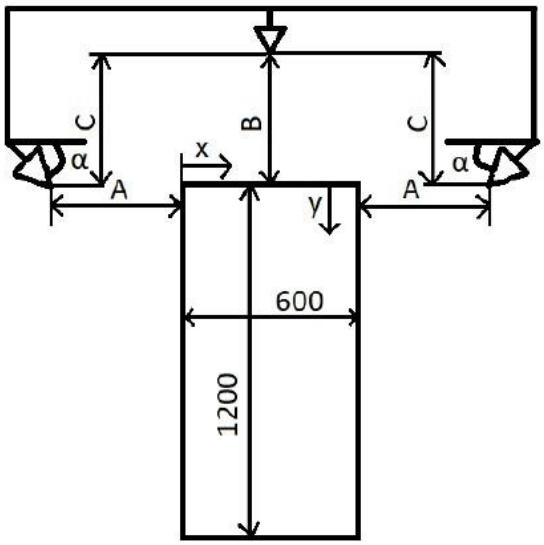


Figura 107: schema del simulatore di vigneto (Festa Bianchet, 2022)

8.1. Confronto ugello centrale

Di seguito si riportano i tre parametri calcolati sia con l'alimentazione della pompa che con quella del serbatoio.

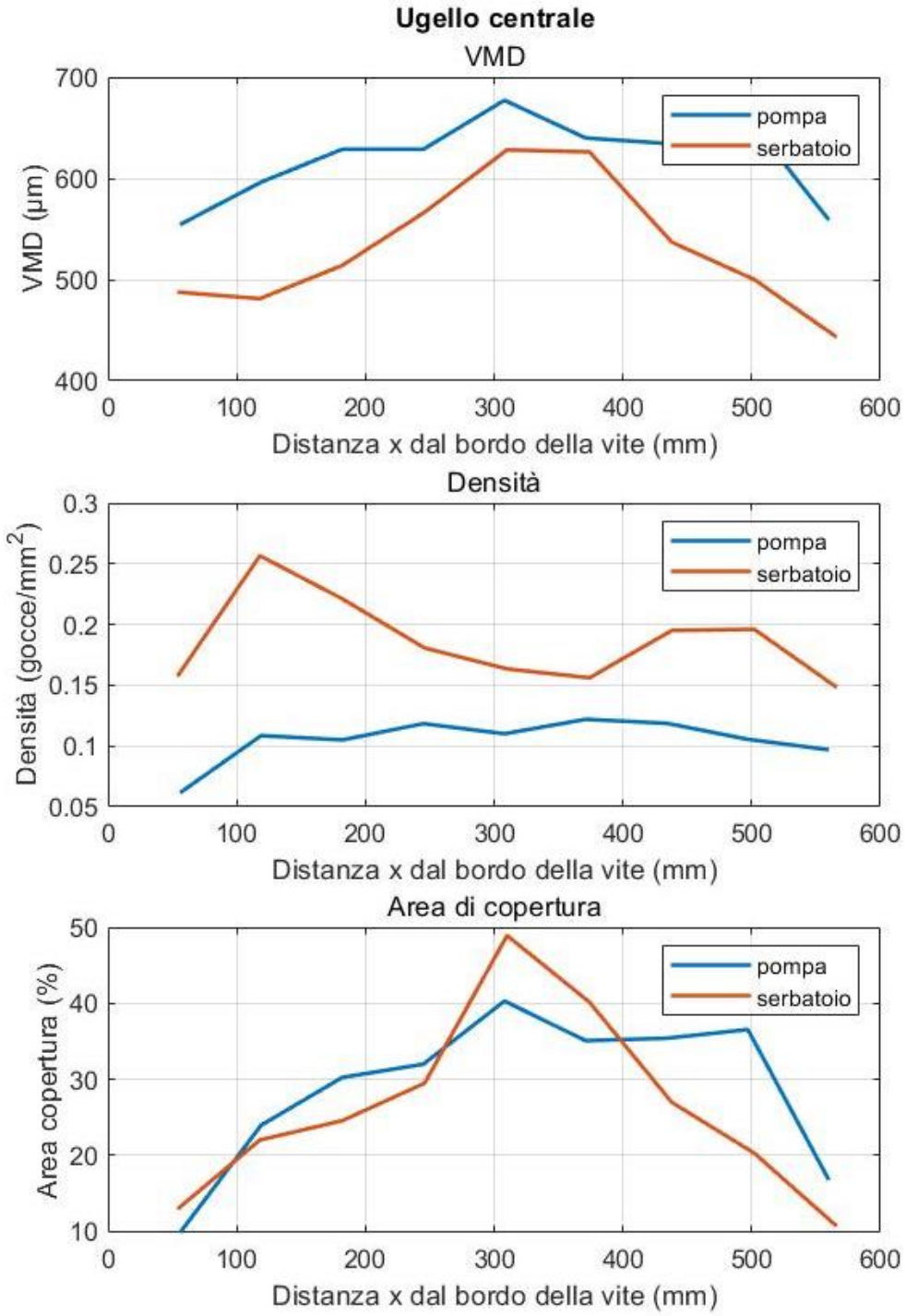


Figura 108: confronto tra le alimentazioni dell'ugello centrale

Osservando l'andamento dei parametri si notano degli andamenti simili ma non perfettamente equivalenti.

In particolare, osservando la curva relativa al VMD si osserva come i risultati ottenuti con il serbatoio sono addirittura migliori rispetto ai risultati ottenuti con la pompa: infatti, i VMD assumono dei valori più bassi, il che indica un diametro medio delle gocce minore, che si avvicina di più ai valori indicati da normativa. L'andamento tuttavia è il medesimo, con il picco che si presenta al centro della sezione analizzata.

Osservando la curva relativa alla densità si nota che la tendenza è opposta rispetto a quella del VMD: il circuito con il serbatoio risulta avere delle densità più alte rispetto a quello con la pompa, il che indica una maggiore uniformità del getto, anche se essa risulta più irregolare al variare della sezione analizzata. In generale però si può considerare il caso ottenuto col serbatoio migliore, in quanto la densità media delle gocce è più alta.

Infine, osservando la curva relativa all'area di copertura, si nota come le due curve siano molto simili, eccetto per il massimo più accentuato per quanto riguarda il caso con serbatoio. L'andamento simile è spiegabile dal fatto che il caso con serbatoio ha VMD più bassi (diametri medi più bassi) e densità più alte, facendo risultare quindi l'area di copertura totale simile al caso ottenuto con la pompa. Anche in questo caso si può notare come l'andamento ottenuto con il serbatoio sia più irregolare rispetto a quello ottenuto con la pompa, come lo era anche negli altri parametri.

8.2. Confronto degli ugelli laterali

Per permettere un confronto corretto con il caso analizzato con la pompa, i grafici riportati in seguito hanno il parametro dell'altezza posto sull'asse delle ascisse, e non in ordinata come era stato posto nell'analisi degli ugelli laterali; inoltre, sempre per permettere il confronto, l'origine del sistema di riferimento è posta in cima alla vite e non nella parte bassa delle foglie, come era stato fatto precedentemente.

8.2.1. Angolo alpha = 45°

In questa sezione si confrontano i due tipi di alimentazione (pompa e serbatoio), mantenendo l'angolo dell'ugello laterale a 45°.

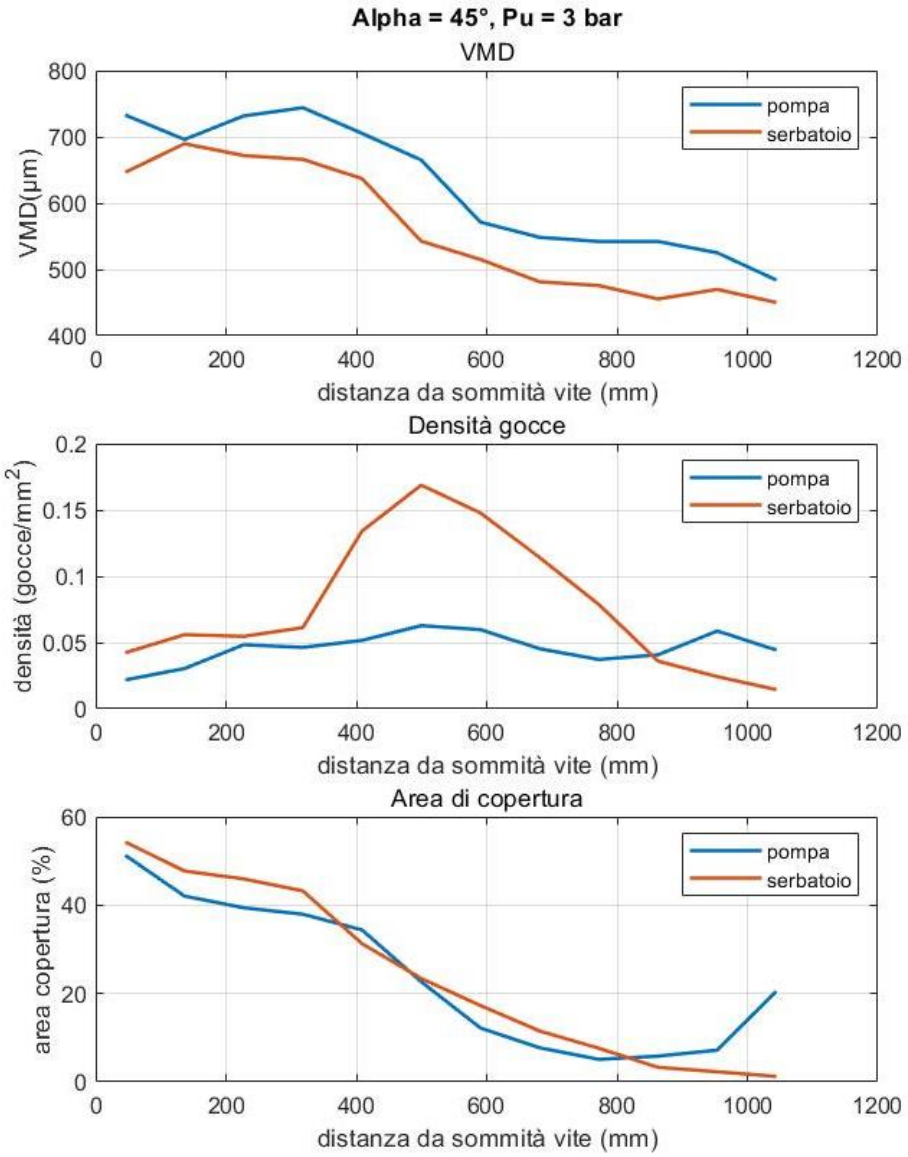


Figura 109: confronto tra le alimentazioni dell'ugello laterale con alpha=45°

Gli andamenti dei tre parametri caratteristici di questi ugelli sono simili a quelli riscontrati per l'ugello centrale. Infatti, anche in questo caso, il VMD risulta essere inferiore nel caso con il serbatoio e quindi le gocce rilevate hanno un diametro in media minore. Viceversa, la densità di gocce anche in questo caso risulta essere maggiore nel caso di circuito alimentato da serbatoio (proprio come si era visto per l'ugello centrale); la distribuzione e l'andamento della densità però sono radicalmente diversi per le due alimentazioni: nel caso analizzato ora con alimentazione tramite serbatoio si osserva un andamento a campana, dove al centro la densità è sensibilmente maggiore rispetto agli estremi (quindi la densità è bassa nella parte superiore

e nella parte inferiore del vigneto), mentre con la pompa la densità appare più o meno costante al variare dell'altezza. Questa differenza non è chiaro a cosa sia dovuta, ma si riscontra che il serbatoio ottiene delle prestazioni migliori, anche se un po' irregolari sull'altezza. Infine, per l'area di copertura i due andamenti si sovrappongono quasi perfettamente: come era accaduto per l'ugello centrale, questo fenomeno è spiegabile perché dove il VMD è basso (caso con serbatoio) la densità è alta, mentre viceversa dove il VMD è alto (caso con pompa) la densità è bassa; ciò comporta che l'area di copertura finale sia abbastanza simile tra i due casi.

8.2.2. Angolo alpha = 60°

In questa sezione si confrontano i due tipi di alimentazione (pompa e serbatoio), mantenendo l'angolo dell'ugello laterale a 60°.

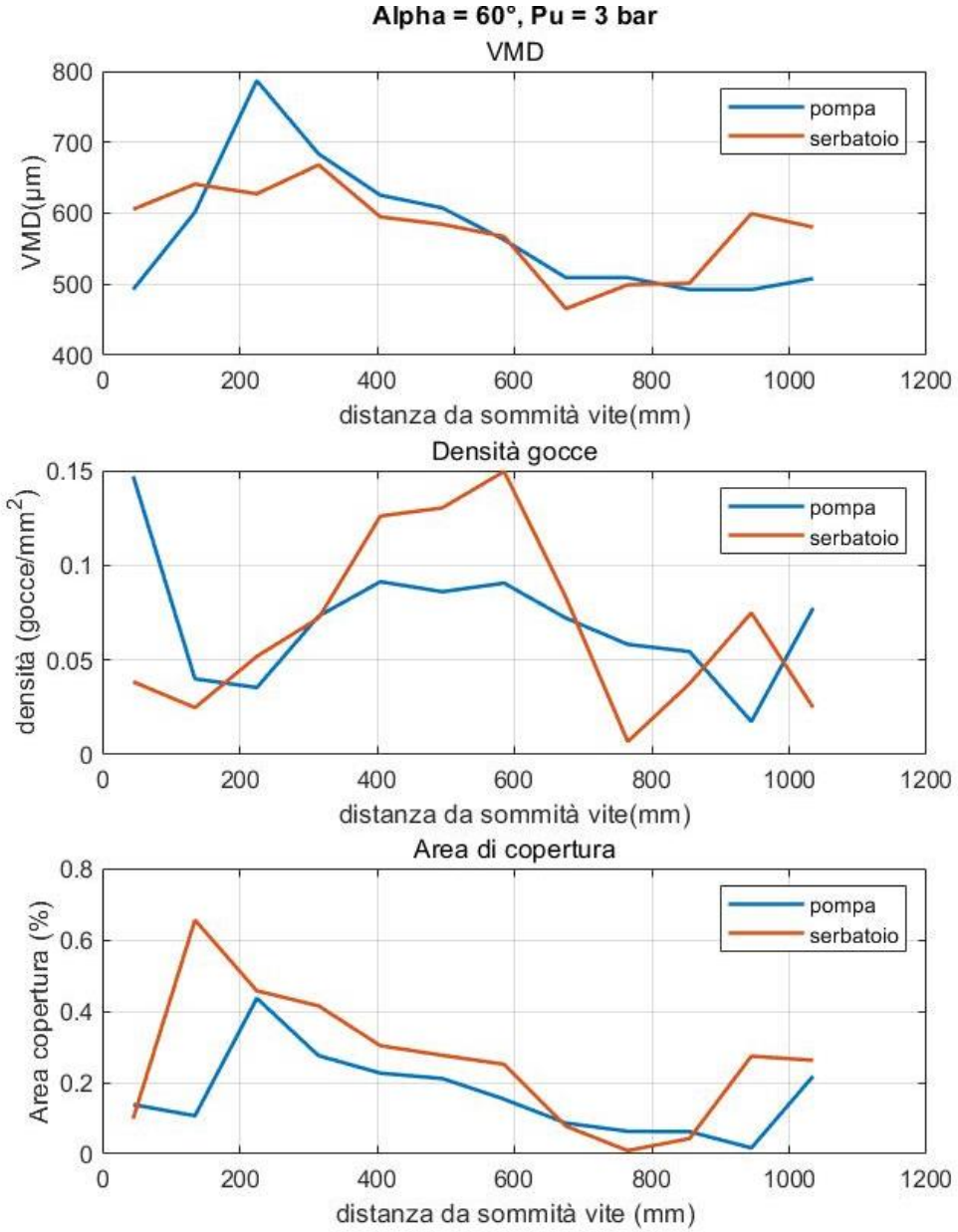


Figura 110: confronto tra le alimentazioni dell'ugello laterale con alpha=60°

Rispetto al caso con angolo alpha=45°, qui gli andamenti dei parametri nei due casi (con pompa o con serbatoio) sono molto più simili, anche se le considerazioni fatte precedentemente rimangono valide. Anche in questo caso si evidenzia un massimo della densità nel caso con serbatoio, che indica una quantità di gocce maggiore all'altezza mediana. VMD e area di copertura invece hanno andamento molto simile nei due casi e talvolta sono addirittura sovrapposti, cosa che indica un buon risultato in fatto di confronto.

8.2.3. Angolo alpha = 53°

In questa sezione si confrontano i due tipi di alimentazione (pompa e serbatoio), mantenendo l'angolo dell'ugello laterale a 53°.

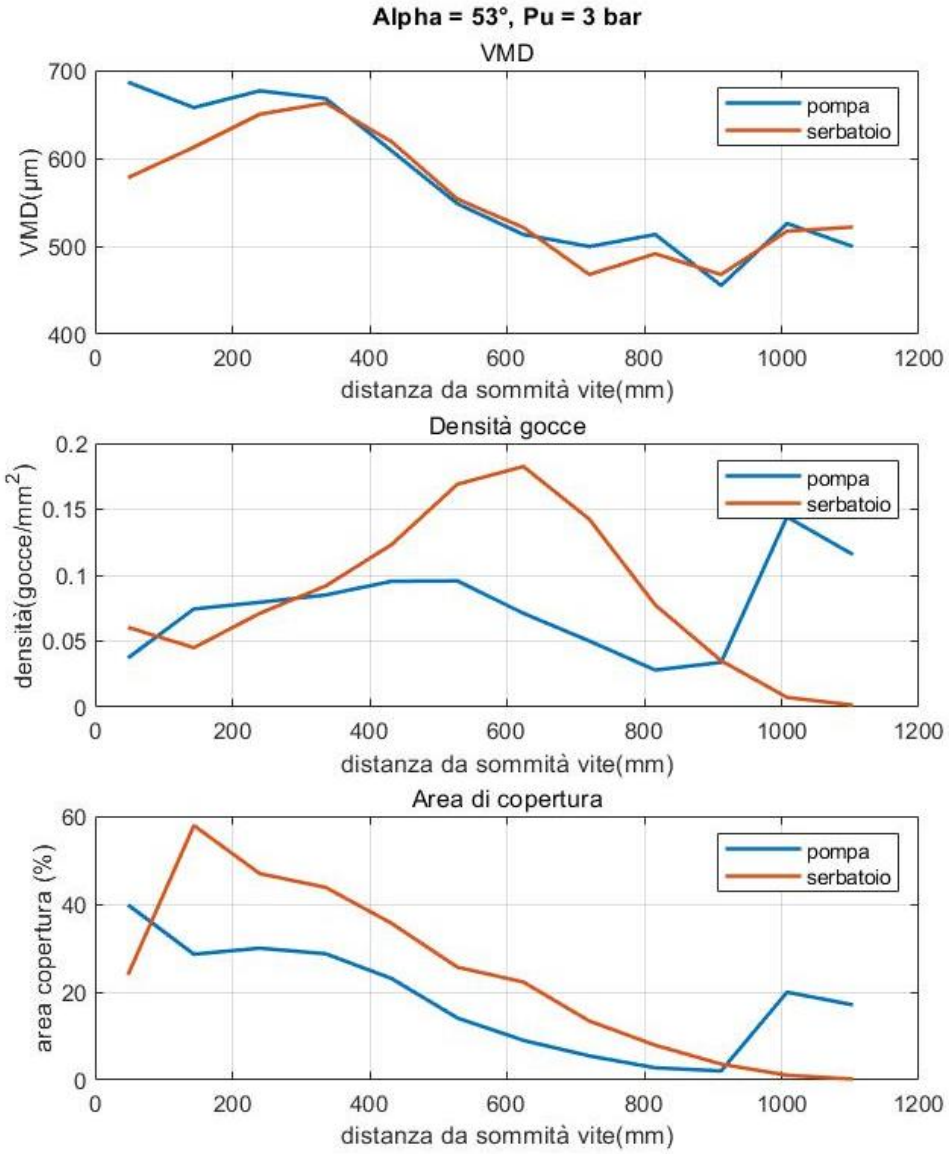


Figura 111: confronto tra le alimentazioni dell'ugello laterale con alpha=53°

Analizzando le curve di quest'ultimo caso, si nota immediatamente come le curve, specialmente del VMD, siano molto simili tra i due casi, come si era riscontrato anche con l'angolo alpha=60°. Le considerazioni fatte precedentemente rimangono valide e questo caso permette di validare i casi precedenti, avendo ottenuto dei risultati in linea con quelli di prima. Anche in questo caso, ad esempio, si osserva che con il serbatoio si ottiene un massimo più marcato della densità di gocce ad un'altezza di poco inferiore alla mediana: questo picco nel caso con angolo alpha=45° si era ottenuto più in alto, come ci si aspettava in quanto l'ugello era indirizzato più verso l'alto.

9. Capitolo 9: Spostamento ugelli laterali a metà altezza

Dato che i risultati ottenuti finora non sono stati completamente soddisfacenti, sia in termini di VMD che di distribuzione irregolare al variare dell'altezza, si è deciso di provare ad abbassare ulteriormente gli ugelli laterali ad un'altezza che corrispondesse a circa metà vigneto, impostando però l'angolo di inclinazione perpendicolare alla parete verticale del vigneto.

Facendo riferimento alla seguente immagine, l'altezza dell'ugello centrale è stata mantenuta costante (B=450 mm) così come la distanza degli ugelli laterale dalla superficie verticale del vigneto (A=450 mm, cioè la massima possibile per non aumentare l'ingombro del drone). Ciò che è stato variato è l'altezza di montaggio dei due ugelli laterali, che sono stati montati 500 mm più in basso di prima, e quindi la lunghezza impostata è C=950 mm; l'ugello è stato abbassato di solo 500 mm invece che 600 mm (che corrisponderebbe a impostare l'ugello a metà altezza del vigneto) perché si è valutato che potrebbe subentrare anche l'effetto della gravità, che quindi farebbe tendere la distribuzione delle gocce più in basso. Inoltre, l'angolo alpha è stato impostato, come già accennato, al valore di 90°. Gli ugelli non sono stati cambiati, e sono sempre i modelli HCF80015 (a cono pieno) al centro e LDC11001 (a ventaglio) di lato.

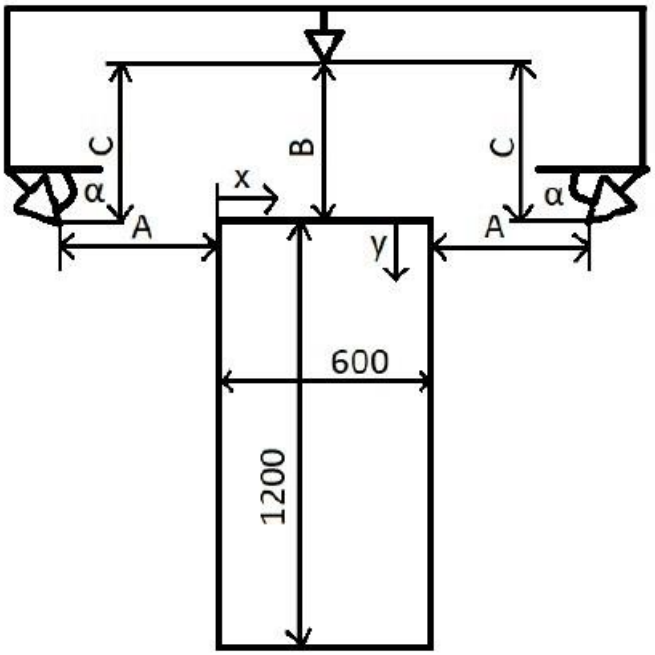


Figura 112: schema del simulatore di vigneto (Festa Bianchet, 2022)

Di seguito, si riporta la fotografia del banco prova in questa nuova configurazione:

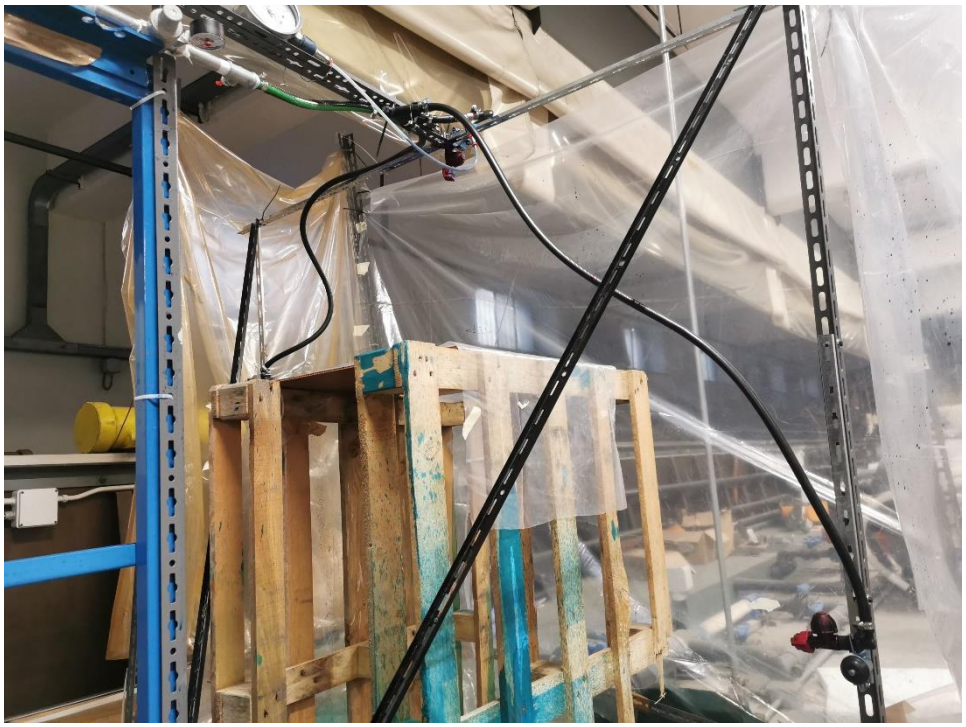


Figura 113: banco prova con ugello laterale abbassato

Figura 114: banco prova con ugello laterale abbassato

Come si può notare dalle due immagini appena riportate, si è prolungata la protesi laterale che sorregge l'ugello laterale in modo tale da raggiungere un'altezza inferiore rispetto ai casi precedenti. Inoltre, si può osservare come l'ugello è posto perpendicolare alla superficie verticale del vigneto, il che indica un angolo alpha=90°.

9.1. Elenco prove

Prove Spruzzo	Ugello centrale	Ugello Laterale	Angolo laterale (°)	Altezza laterale C (mm)	Pressione ugelli (bar)	Pressione regolatore (bar)	Pressione serbatoio (bar)	Tempo di spruzzo (s)
34	no	si	90	950	3	3	3,5	0,56
35	no	si	90	950	2,5	2,5	3,5	0,68
36	no	si	90	950	2	/	2	0,52
37	no	si	90	950	1,5	/	1,5	0,61
38	no	si	90	950	1	/	1	0,47

Tabella 19: elenco prove realizzate con l'ugello abbassato

La procedura di prova seguita per queste prove è la medesima indicata precedentemente (capitoli 6 e 7) e quindi non verrà ripetuta nuovamente. Inoltre si specifica che sono stati rilevati e analizzati solamente gli spruzzi dell'ugello laterale (quindi il foglio verticale), mentre non si è analizzato l'ugello centrale. Questa scelta è stata fatta sostanzialmente per due motivi:

- Il primo è un motivo di praticità, perché il supporto che permetteva di togliere le bottigliette simultaneamente dai due ugelli in questa configurazione non è più funzionale, e quindi sarebbe risultato complesso effettuare le due prove in contemporanea;
- Il secondo motivo è un motivo economico: dato che le condizioni dell'ugello centrale sono le medesime analizzate al capitolo 7 (dell'ugello centrale non si sono modificate né le quote né l'angolo di inclinazione) si è deciso di non utilizzare ulteriore carta fotografica, che è molto costosa, senza togliere nulla all'analisi finale.

Si precisa inoltre che la prova alla pressione di 3 bar è stata effettuata separata dalle altre, come fatto già in precedenza, impostando il riduttore di pressione a 3 bar. Le altre prove, invece, sono state effettuate impostando inizialmente il riduttore di pressione a 2,5 bar e, man mano che il serbatoio perdeva il liquido al suo interno e simultaneamente perdeva di pressione, si sono effettuate le altre prove, senza modificare più il riduttore. Per esempio, una volta che la pressione nel serbatoio ha raggiunto il valore di 2 bar, si è proceduto all'analisi degli spruzzi della prova 35 (che corrisponde proprio alla pressione di 2 bar); in maniera analoga si procede con le pressioni inferiori di 1,5 bar e 1,0 bar.

Di seguito si riportano le immagini degli spruzzi riportati in tabella 19, eccetto la prova 34 (corrispondente alla pressione di 3 bar) che, così come fatto nei casi precedenti al capitolo 7, è stata esclusa dallo studio perché non compatibili all'applicazione reale. Questa prova è analizzata successivamente singolarmente.

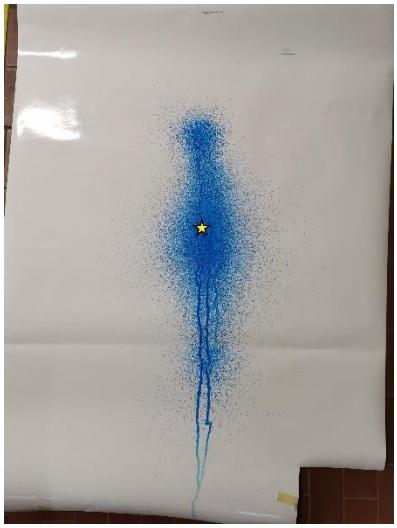


Figura 115: spruzzo della prova 35

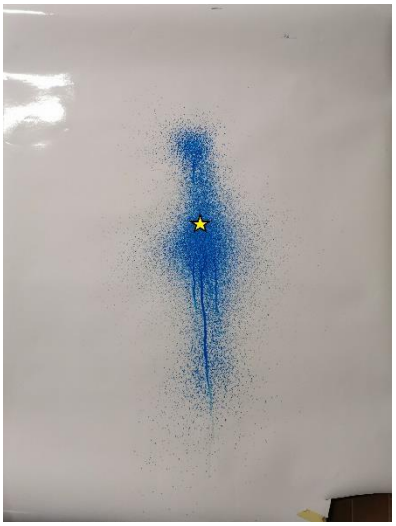


Figura 116: spruzzo della prova 36

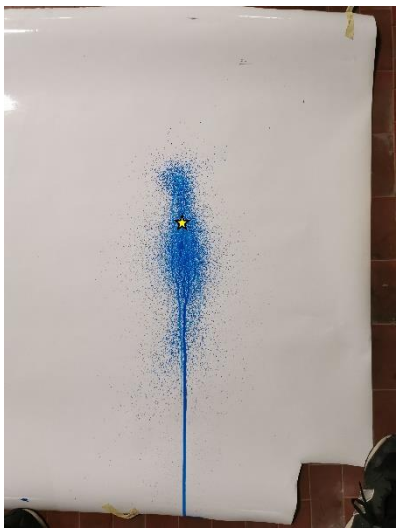


Figura 118: spruzzo della prova 37

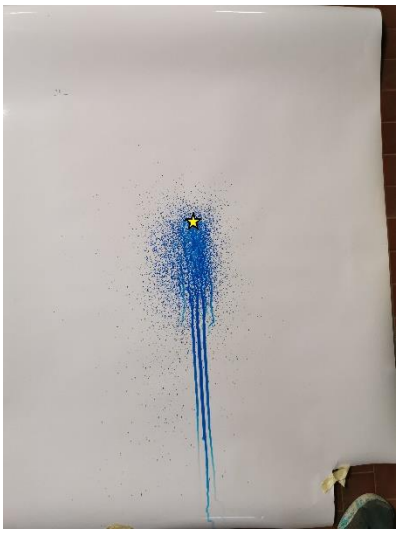


Figura 117: spruzzo della prova 38

Queste immagini, esattamente come fatto per gli ugelli precedenti, sono state elaborate tramite il software ImageJ (come illustrato al capitolo 6.4.) e per farlo le immagini sono state suddivise in selezioni più piccole, al fine di effettuare un'analisi abbastanza precisa. Di seguito sono riportate le immagini appena riportate con le selezioni utilizzate da imageJ per estrapolare i risultati successivamente esposti. Il numero di rettangoli utilizzati è lo stesso usato per il caso degli ugelli laterali precedenti, al fine di avere un confronto più immediato.

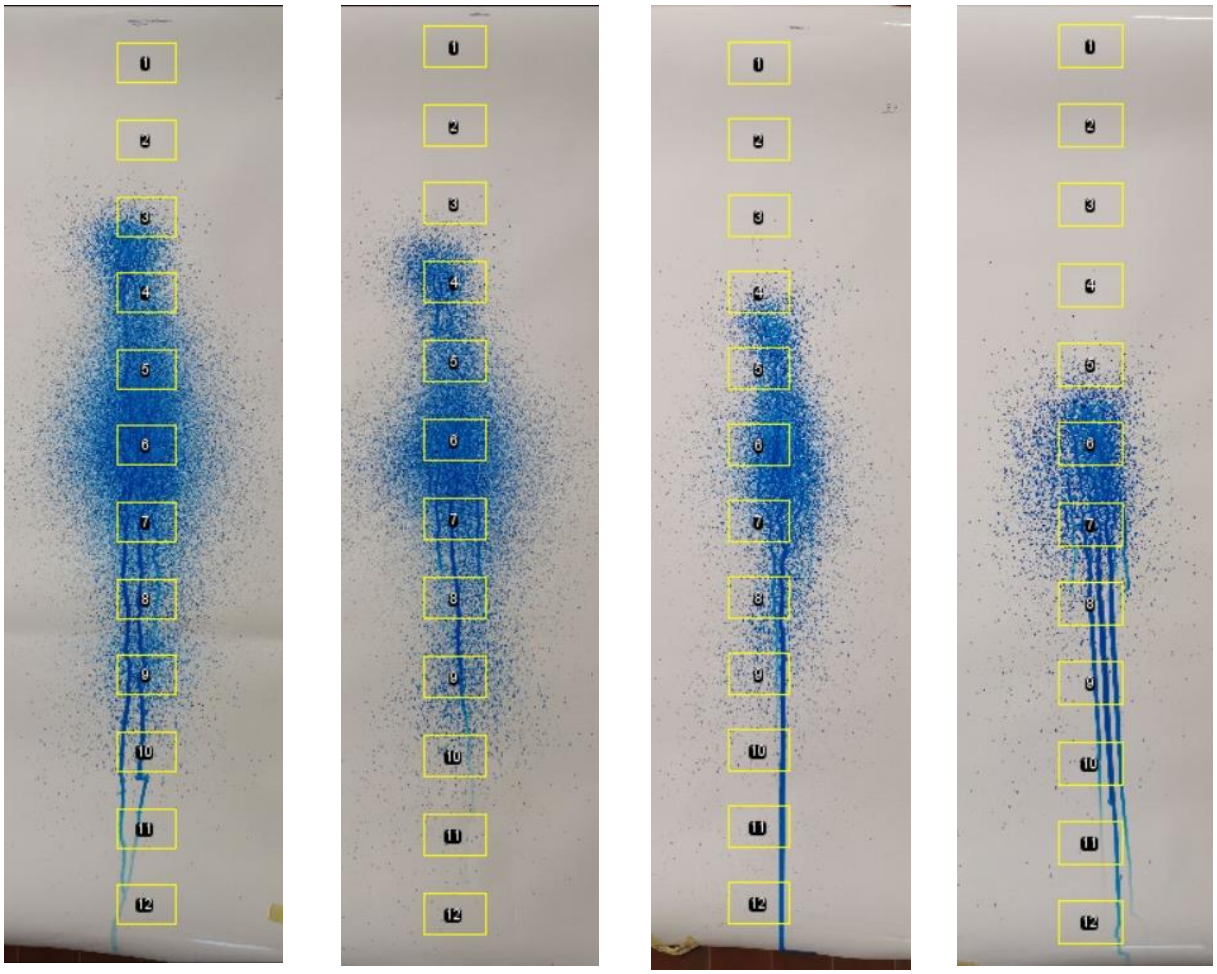


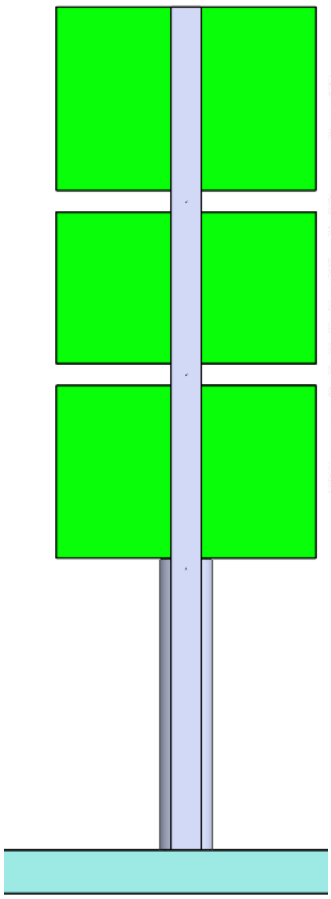
Figura 119: selezioni delle quattro prove

9.2. Andamento parametri

Dopo aver riportato le macchie di colore, si analizzano i tre parametri già esposti precedentemente; si precisa che sono stati indicati l'altezza del vigneto sulle ordinate (con a fianco anche un'immagine del simulatore di vigneto che favorisce la comprensione del grafico) e i parametri sull'asse delle ascisse. Questa scelta è stata fatta in quanto risulta immediato comprendere come variano i parametri lungo l'altezza, facendo risultare i grafici più leggibili e comprensibili.

9.2.1. VMD

In questo paragrafo è presentata l'analisi del VMD per le prove dell'ugello laterale abbassato rispetto ai casi precedenti con angolo alpha=90°.



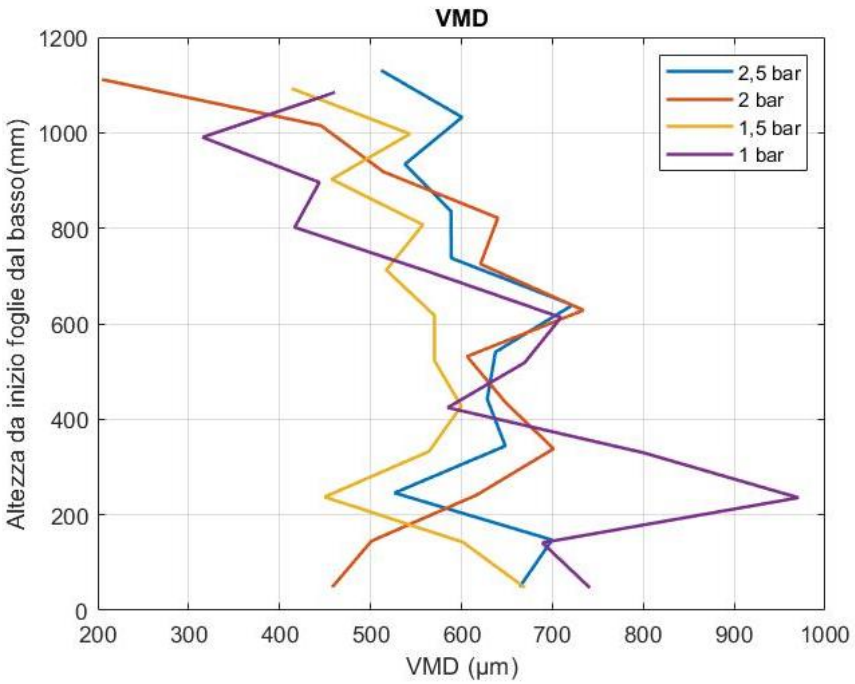


Figura 120: andamenti del VMD con ugello abbassato

Osservando gli andamenti del VMD appena riportati si nota come, rispetto a prima, i valori rimangano più o meno costanti al variare dell'altezza, eccetto per la pressione più bassa (1 bar), dove in fondo si registra un picco molto pronunciato. Questo risultato potrebbe anche risultare positivo, ma se si osservano i valori assunti dal parametro ci si rende conto come essi siano esageratamente grandi rispetto ai valori indicati dalla norma e anche rispetto a quelli ottenuti precedentemente. Per il caso relativo alla pressione di 1 bar, si osservano dei VMD migliori nella parte alta del vigneto, dove le gocce, a una pressione così bassa, arrivano in basso numero e abbastanza piccole; al contrario, nella parte bassa si registra invece un picco che sfiora addirittura i 1000 µm, valore davvero troppo alto e considerato inaccettabile.

9.2.2. Densità di gocce

In questo paragrafo è presentata l'analisi della densità di gocce per le prove dell'ugello laterale abbassato rispetto ai casi precedenti con angolo alpha=90°.

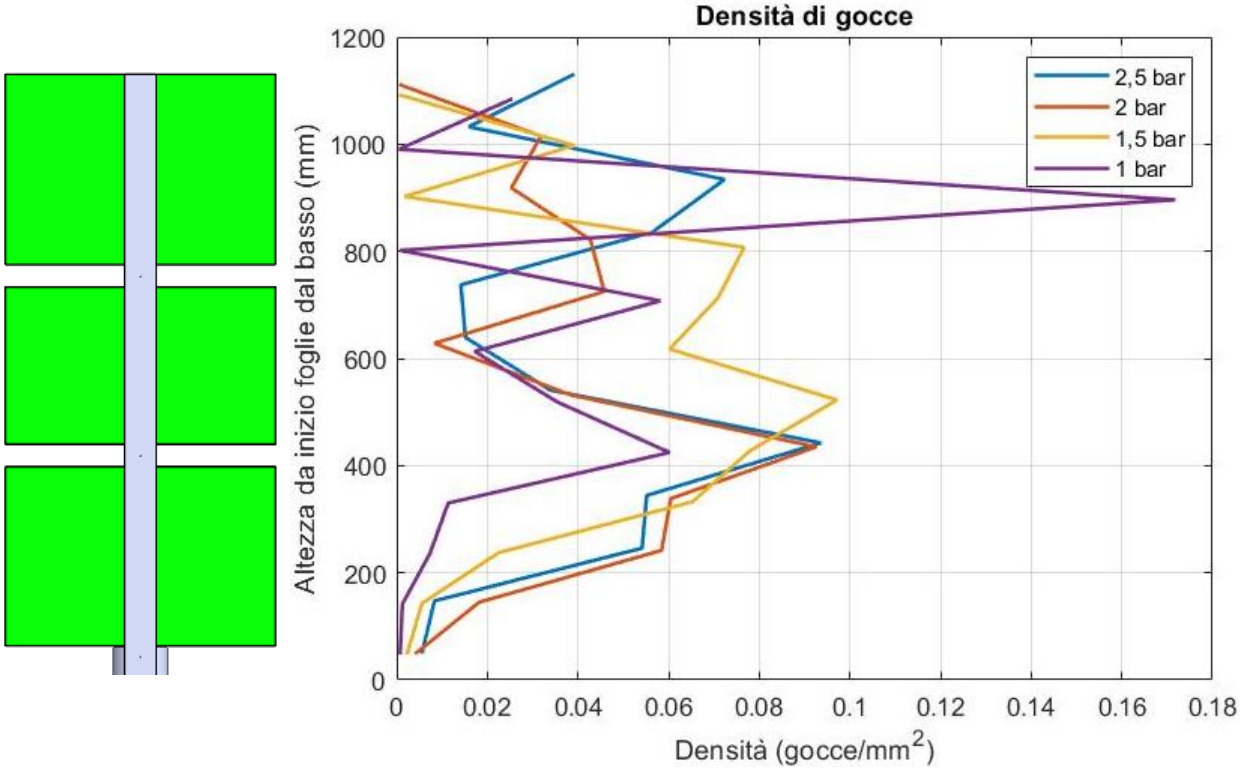


Figura 121: andamenti della densità di gocce con ugello abbassato

Osservando gli andamenti appena riportati, si nota come i valori di densità siano più o meno costanti per tutti i casi, eccetto per il caso alla pressione di 1 bar, che assume un andamento molto irregolare, con un picco davvero molto elevato ad un'altezza di circa 900 mm; questo picco, se si osserva la foto degli spruzzi riportata precedentemente (figura 117), non esiste nella realtà, in quanto a quella altezza non si verificano gocce reali: ciò fa pensare che si possa essere verificato un errore nell'elaborazione tramite software, che può aver interpretato alcune zone d'ombra nella foto come gocce, causando così l'errore.

9.2.3. Area di copertura

In questo paragrafo è presentata l'analisi dell'area di copertura per le prove dell'ugello laterale abbassato rispetto ai casi precedenti con angolo alpha=90°.

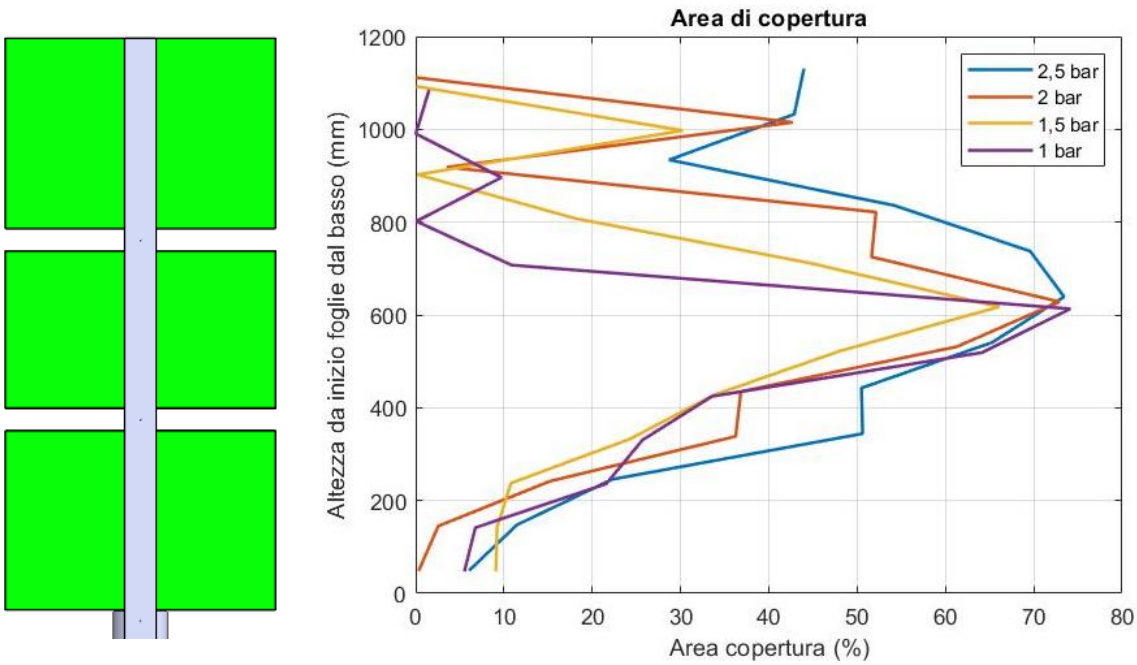


Figura 122: andamenti dell'area di copertura con ugello abbassato

Osservando l'andamento di quest'ultimo parametro si nota subito come il picco di tutte le prove si trovi esattamente a metà altezza; questo risultato era atteso, in quanto l'ugello è posto all'altezza di 700 mm, ma, complice la gravità, lo spruzzo risulta impresso un po' più in basso; non è un caso che con la pressione a 2,5 bar, il massimo sia meglio distribuito anche ad altezze superiori, perché il flusso è più potente e risente di meno dell'effetto della gravità. Si nota inoltre come nel caso della pressione di 1 bar, al di fuori dell'area con il massimo, l'area di copertura sia praticamente nulla in tutte le restanti altezze, il che evidenzia un getto molto concentrato; al contrario, il caso a pressione di 2,5 bar, risulta avere una distribuzione un po' più omogenea, che caratterizza un getto meglio distribuito.

9.3. Grafici 3D

In questo paragrafo si riportano i grafici 3D dell'ugello laterale abbassato con pressione variabile rappresentata sull'asse delle y.

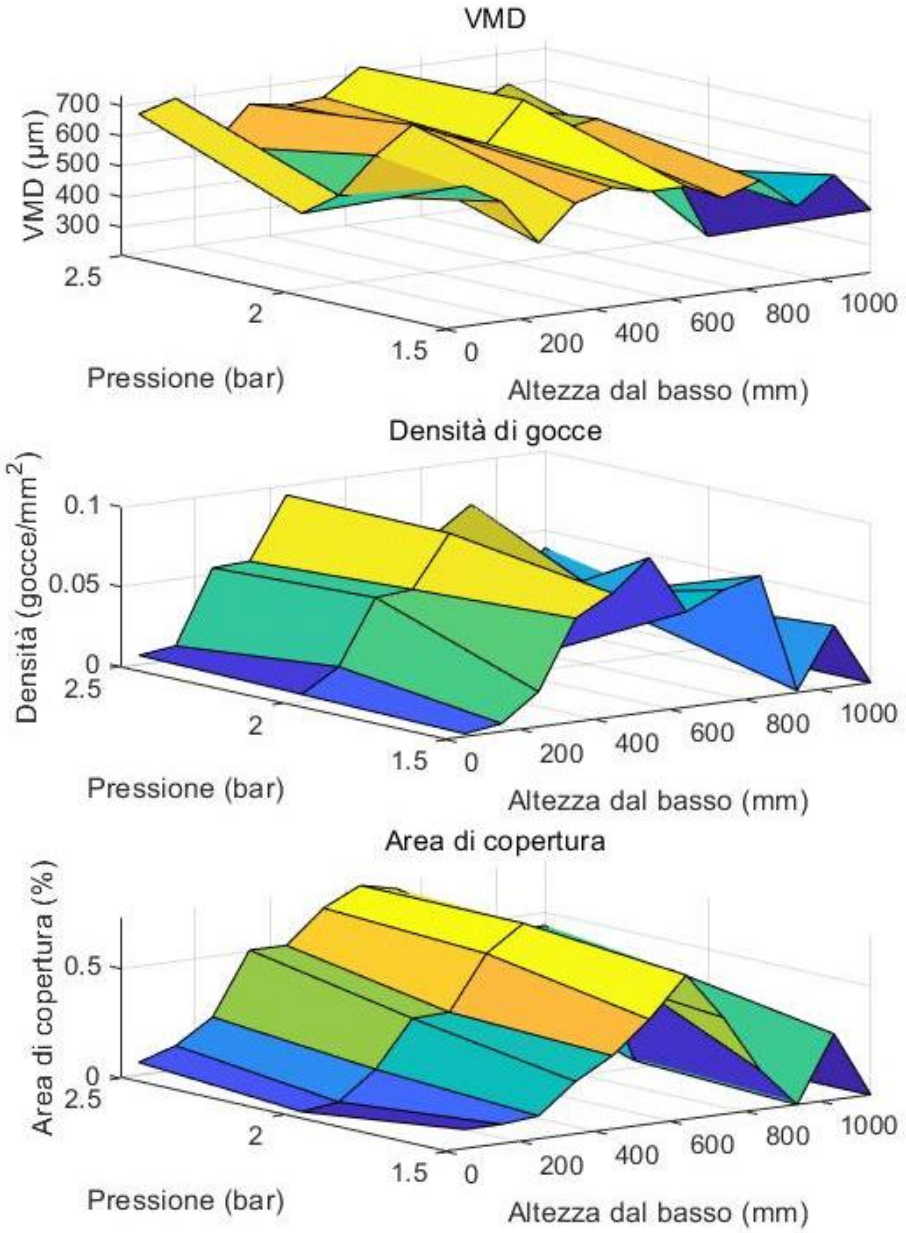


Figura 123: grafici 3D dei parametri con pressione variabile, ugello abbassato

In figura 123 sono riportati gli andamenti dei tre parametri appena descritti al variare della pressione. Come già fatto notare in precedenza, questi grafici possono essere letti come l'evoluzione dei parametri all'avanzare del tempo di volo del drone: infatti, con il riduttore di pressione impostato a 2,5 bar, la pressione assume il valore del riduttore, mentre man mano che passa il tempo, il serbatoio scende sotto questa soglia e quindi scende la pressione, prima

a 2 bar fino ad arrivare a 1,5 bar; similmente ai casi precedenti si è escluso il caso con pressione di 1 bar, ritenuto inadeguato per i valori che si sono presentati. Osservando l'evoluzione dei parametri, in questo caso gli andamenti risultano essere abbastanza costanti al diminuire della pressione nella sezione corrispondente all'altezza intermedia, indice che a quest'altezza la pressione non fa variare eccessivamente i parametri. Alle altezze estreme, invece, si nota come le pressioni inferiori subiscano un calo più marcato rispetto a quelle superiori, indice quindi di uno spruzzo non perfettamente distribuito.

9.4. Riepilogo risultati

Nella tabella 20 vengono riportati i risultati delle prove appena analizzate; per ogni parametro viene inserito il valore massimo, il valore minimo e il valore medio, al fine di avere una visione completa della situazione.

Prova	**VMD (µm)**			**Area di copertura (%)**			**Densità (gocce/mm^2)**		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
35	722,1	511,5	612,8	73,43	6,06	43,25	0,094	0,0056	0,0387
36	734,2	204,5	557,6	72,91	0,78	31,29	0,093	0,0005	0,0356
37	669,7	413,4	542,9	66,09	0,57	24,54	0,097	0,0005	0,043
38	970,6	315,3	613,9	74,14	0,20	21,13	0,172	0,0004	0,033

Tabella 20: riepilogo risultati delle prove appena analizzate

9.5. Confronto con l'ugello laterale in alto con angolo alpha=53°

Prima di riassumere i risultati di queste prove, si è deciso di confrontare le prove effettuate con questa configurazione con un caso analizzato in precedenza, ovvero con gli ugelli laterali posti ad un'altezza corrispondente all'altezza del vigneto e inclinati con un certo angolo alpha; l'angolo alpha utilizzato per il confronto è stato scelto di 53°, in quanto rappresenta la via di mezzo fra i tre casi analizzati.

Il confronto si è deciso di effettuarlo alla pressione di 3 bar, similmente a quanto fatto per il confronto tra alimentazione con serbatoio e con pompa; in questo modo si ha modo anche di analizzare il caso con questa pressione, ignorato precedentemente, anche se nella realtà, con questo serbatoio, non è applicabile.

Di seguito si riporta nuovamente lo schema del simulatore di vigneto, in modo tale che si possa chiarire la differenza tra i due casi.

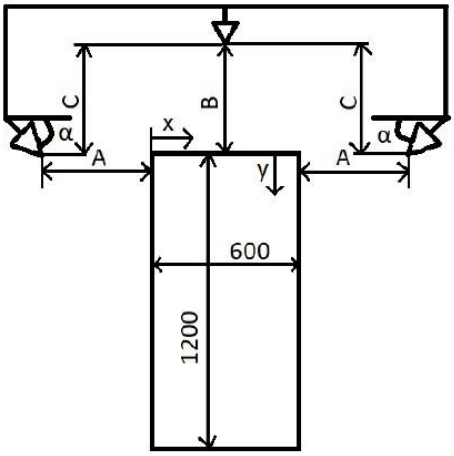


Figura 124: schema simulatore di vigneto (Festa Bianchet, 2022)

	Ugello in alto (prova 32)	**Ugello in basso (prova 34)**
C	450 mm	950 mm
α	53°	90°

Tabella 21: caratteristiche geometriche delle due prove

Figura 126: spruzzo con ugello in alto, prova 32

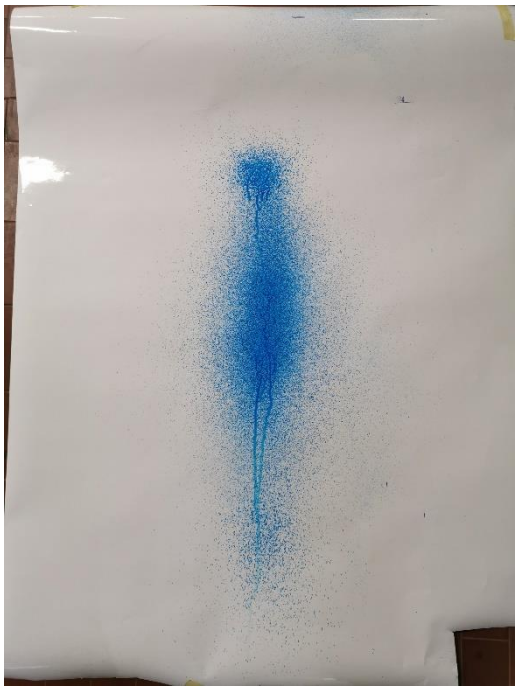


Figura 125: spruzzo con ugello in basso, prova 34

La procedura di analisi tramite software è analoga a quella applicata finora.

9.5.1. Confronto parametri

In questa sezione si confrontano le due configurazioni, una con l'ugello posizionato ad un'altezza pari a quella del simulatore di vigneto e angolo di 53°, mentre l'altra posizionata 500 mm più in basso e con un angolo di 90°.

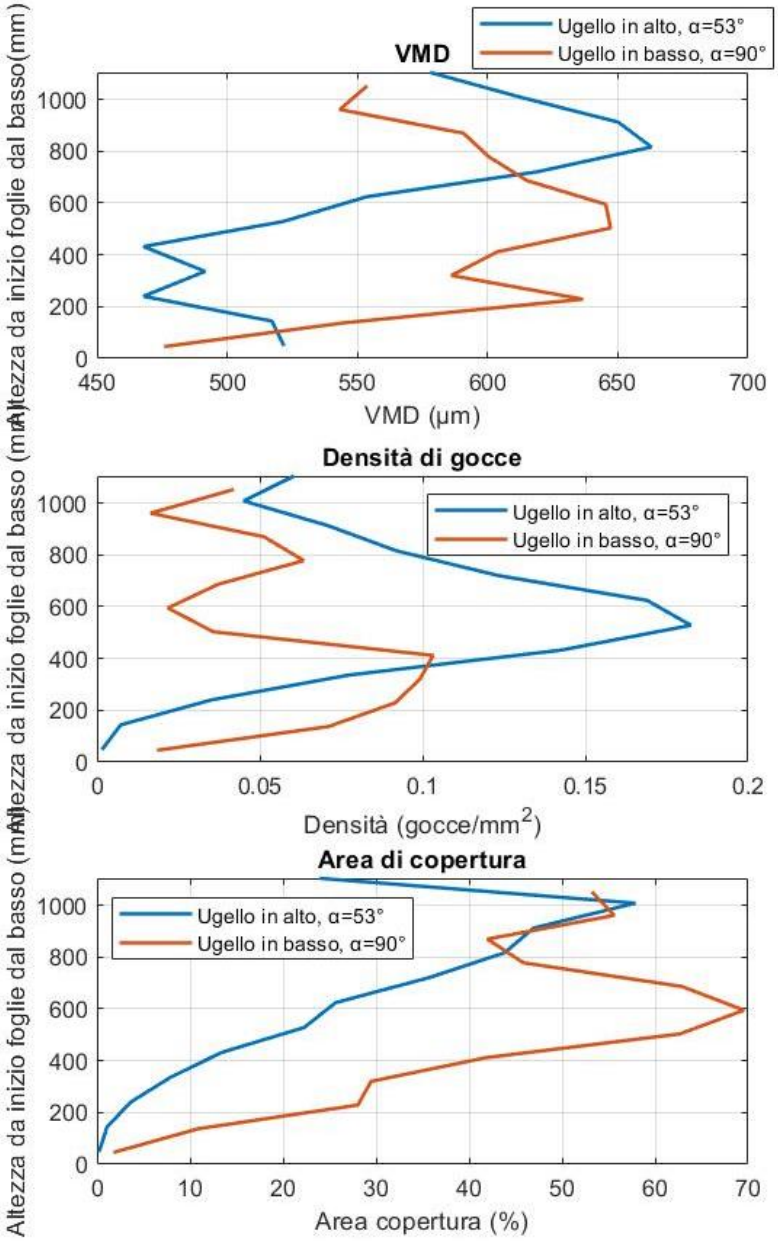


Figura 127: andamento dei tre parametri nelle due configurazioni

Osservando i due andamenti, si nota subito come le due configurazioni portino a dei risultati decisamente diversi. Per prima cosa, è evidente come il caso con l'ugello posto in alto abbia dei massimi di VMD e di area di copertura in sezioni molto alte del simulatore di vigneto, mentre più si scende verso il basso più i valori decrescono a valori più bassi. Al contrario, la distribuzione di VMD e area di copertura nel caso con ugello basso presenta un massimo a

metà altezza, come ci si aspettava. Inoltre, questi due andamenti risultano essere un po' più costanti al variare dell'altezza rispetto al precedente caso, cosa che si ricercava inizialmente; allo stesso tempo, però, i VMD ottenuti risultano essere in media troppo alti, che quindi significa avere delle gocce molto grandi in tutte le altezze del vigneto, col rischio che queste ultime scivolino sulle foglie e finiscano nel terreno, inquinandolo.

Osservando invece il grafico delle densità di gocce, si nota come il caso con ugello in alto presenta delle densità maggiori, cosa che fa preferire questa configurazione all'altra: infatti una densità maggiore significa avere una distribuzione di gocce migliore, e quindi le gocce coprono meglio la superficie laterale del vigneto.

9.5.2. Riepilogo risultati

In definitiva, si può concludere che il tentativo di abbassare l'ugello laterale per migliorare le prestazioni del drone, non ha risolto completamente i problemi che si erano riscontrati; infatti, nonostante sia migliorata la distribuzione delle gocce lungo le varie sezioni (i parametri hanno un andamento più costante rispetto a prima), si sono ottenuti dei valori di VMD in media troppo alti e le densità di gocce sono diminuite rispetto al precedente caso. Quindi, per risolvere anche questi ultimi problemi, sarebbe opportuno allontanare ulteriormente gli ugelli laterali dalla superficie del vigneto: questa soluzione però non è attuabile, dato che la distanza impostata è di 450 mm, che è la massima distanza che garantisce il drone.

In tabella 22 sono riportati i valori massimi, minimi e medi dei tre parametri nelle due configurazioni:

Prova	**VMD (µm)**			**Area di copertura (%)**			**Densità (gocce/mm^2)**		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
32	662,9	467,9	555,3	57,88	0,21	23,53	0,182	0,0015	0,084
34	647,2	475,8	586,9	69,56	1,76	41,98	0,103	0,0164	0,054

Tabella 22: riepilogo risultati nelle due configurazioni, con pressione a 3 bar

Come evidenziato prima, si nota come il valore medio del VMD della prova con ugello abbassato (prova 34) sia più alto dell'altro caso, mentre la densità media è più bassa: ciò permette di concludere che questo tentativo di abbassare l'ugello non risulta particolarmente conveniente, e quindi si ritiene più prestante la configurazione con ugello in alto inclinato di 53°.

10. Capitolo 10: Tabella ugelli

Per concludere questo elaborato, si è deciso di costruire e riportare una grande tabella con tutte le prove effettuate sia sui singoli ugelli, sia sul banco prova con tre ugelli, sia con alimentazione tramite pompa che tramite serbatoio. In questa tabella sono riportate le principali caratteristiche delle singole prove, quali:

- Il numero di ugelli analizzati per la prova;
- Il tipo di ugello utilizzato con relativo codice;
- Il tipo di alimentazione (pompa o serbatoio);
- La posizione del foglio (orizzontale o verticale);
- L'angolo di inclinazione dell'ugello rispetto al foglio;
- La distanza degli ugelli dal foglio;

Inoltre, sono stati inseriti anche i risultati medi dei tre parametri finora analizzati (VMD, area di copertura e densità di gocce) e il range teorico indicato da normativa per il VMD.

Infine, nell'ultima colonna è riportata l'immagine dello spruzzo corrispondente, che permette di capire in maniera più immediata rispetto ai parametri la distribuzione delle gocce sul foglio.

Si precisa inoltre che le prove riportate sono state effettuate nel presente elaborato e anche negli elaborati dei tesisti precedenti Antonio Conte (Conte, 2022), Antonio Frate ((Frate, 2022) e Tobia Festa Bianchet (Festa Bianchet, 2022). I colori diversi delle varie righe indicano dei blocchi di prove effettuate in una certa configurazione mantenuta costante, e quindi è stato ritenuto opportuno evidenziare questa caratteristica mantenendo fisso il colore delle celle.

La tabella è riportata tramite delle immagini, che però, essendo la tabella molto fitta, non permettono una lettura molto chiara; si è deciso comunque di inserire la tabella in quanto essa risulta fondamentale per avere una visione completa e diffusa del lavoro effettuato fino a questo punto. In particolare, le immagini degli spruzzi danno un feedback immediato delle prestazioni degli ugelli, in quanto permettono di capire subito la forma del loro spruzzo e la distribuzione delle gocce.

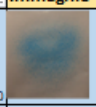
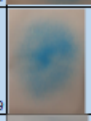
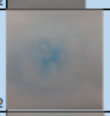
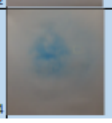
Numero prova	Numero ugelli circuito	Codice ugello	Tipo ugello	Alimentazione	Posizione foglio	Angolo d'incidenza ugello-foglio (°)	Distanza ugello-foglio (m)	Pressione alimentazione (bar)	VMD indicato da catalogo (µm)	VMD (uso del spread factor) (µm)	Area di copertura [%]	Densità gocce [droplet/cm^2]	Immagine
1	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,5	2	106-235	348	39,2	40	
4	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,5	3	106-235	322,5	33,8	45,9	
7	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,5	4	106-235	373,2	44,8	41,9	
2	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	1	2	106-235	328,1	9,4	12,6	
5	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	1	3	106-235	319	12	17,1	
8	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	1	4	106-235	388,2	28,8	23,2	
3	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	1,5	2	106-235	347,5	8	10,2	
6	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	1,5	3	106-235	356,6	18,1	18,2	
9	1	HCF80015	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	1,5	4	106-235	355,1	27,2	24	

Tabella 23: prove singolo ugello HCF80015 con foglio orizzontale (Conte, 2022)

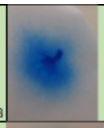
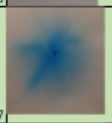
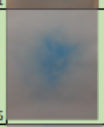
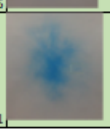
10	1	HCI6001	Cono vuoto	Pompa	Orizzontale	90	0,5	3	106-235	289,9	37,4	56,3	
13	1	HCI6001	Cono vuoto	Pompa	Orizzontale	90	0,5	4	106-235	301,5	46,6	67,7	
11	1	HCI6001	Cono vuoto	Pompa	Orizzontale	90	1	3	106-235	313,1	36,4	39,1	
14		HCI6001	Cono vuoto	Pompa	Orizzontale	90	1	4	106-235	183,1	10,3	186,1	
12	1	HCI6001	Cono vuoto	Pompa	Orizzontale	90	1,5	3	106-235	325,6	32,8	37,5	
15	1	HCI6001	Cono vuoto	Pompa	Orizzontale	90	1,5	4	106-235	404,9	72,4	35,1	

Tabella 24: prove singolo ugello HCI6001 con foglio orizzontale (Conte, 2022)

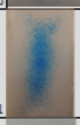
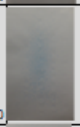
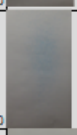
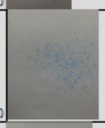
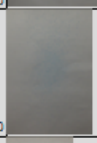
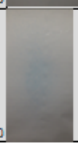
28	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	1,5	106-235	550,7	17,5	3,61E+00	
6	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	3	106-235	536,7	20,4	4,63E+00	
32	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	4	106-235	489,5	25,9	1,26E+01	
68	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	1,5	106-235	608,9	10,3	3,26E+00	
52	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	3	106-235	560,8	6	2,24E+00	
61	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	4	106-235	519,6	11,9	5,45E+00	
84	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	1,5	106-235	615,8	8,3	1,31E+00	
78	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	3	106-235	528	3,5	1,72E+00	
69	1	AFC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	4	106-235	479,4	8,9	4,74E+00	

Tabella 25: prove singolo ugello AFC11001 con foglio orizzontale (Frate, 2022)

23	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	1	106-235	545	31,3	9,20E+00
9	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	3	106-235	524	38,9	1,90E+01
36	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	4	106-235	578,7	39,9	1,30E+01
66	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	1	106-235	453,5	14,2	7,38E+00
53	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	3	106-235	518	27,9	1,63E+01
62	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	4	106-235	541,5	32,4	1,49E+01
83	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	1	106-235	505,8	7,7	4,15E+00
79	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	3	106-235	528,6	32,4	1,74E+01
71	1	LDC11001	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	4	106-235	565,7	32,3	1,31E+01

Tabella 26: prove singolo ugello LDC11001 con foglio orizzontale (Frate, 2022)

20	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	1	106-235	524,1	35,7	1,28E+01
19	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	2	106-235	526,9	38,2	1,74E+01
14	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	3	106-235	545,8	41,9	1,47E+01
38	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,5	4	106-235	534,9	45	1,42E+01
65	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	1	106-235	501,7	9,75	5,74E+00
64	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	2	106-235	443,3	26,5	2,65E+01
54	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	3	106-235	604,3	32,9	9,14E+00
63	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1	4	106-235	608,4	39,8	9,26E+00
82	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	1	106-235	504,2	7,72	4,52E+00
81	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	2	106-235	509	26,6	1,65E+01
80	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	3	106-235	548	32,7	1,48E+01
70	1	WRC110015	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	1,5	4	106-235	568,7	33,9	1,30E+01

Tabella 27: prove singolo ugello WRC11001 con foglio orizzontale (Frate, 2022)

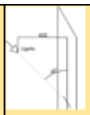
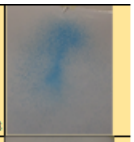
10b	1	HCF80015	cono pieno	Pompa	Verticale	 45	0,4	3	106-235	621,8	22,9	8,48	
3b	1	HCA8001	cono vuoto	Pompa	Verticale	90	0,4	3	106-235	584	20,8	4,32	
	1	HCA8001	cono vuoto	Pompa	Verticale	45	0,4	3	106-235	620 (valore medio tra 5 metodi di spread factor)	12,4	1,94	

Tabella 28: prove singolo ugello HCF80015 con foglio verticale (Festa Bianchet, 2022)

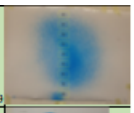
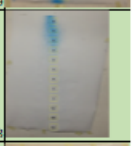
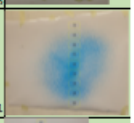
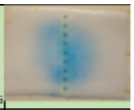
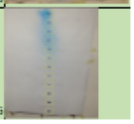
1-2-3	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	672,4	35,3	9	
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,35			559,2	16	5,8	
4	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0	3	106-235	635	30,4	9,1	
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,35			576	20,3	5,7	
5	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	619,8	28,9	10,5	
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			572,6	16,6	7	
6	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	617	28,4	10,6	
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			624	23,9	4,6	
11	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	542,2	21,9	14,6	
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	53	0,45			571,1	18,4	7,6	

Tabella 29: prove a tre ugelli (HCF80015 centrale, LDC11001 laterali) alimentati da pompa (Festa Bianchet, 2022)

7	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	617,7	30	10,3
		2x HCF80015	2x Cono pieno		2x Verticale	45	0,45			582,4	15,9	3,8
10	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	576,1	22	8,2
		2x HCF80015 (laterali)	2x Cono pieno		2x Verticale	60	0,45			549,8	12,7	7,6
8	3	LDC11001 (centrale)	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	635,1	30,7	10,4
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			620,3	20,9	4,6
9	3	LDC11001 (centrale)	Ventaglio	Pompa	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	615,8	26,1	10,2
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			572	15,5	5,3

Tabella 31: prove a tre ugelli con stesso tipo di ugello centrale e laterale alimentati con pompa (Festa Bianchet, 2022)

12	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2	106-235	474,2	17,6	15,4
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			513,9	12,01	8,6
13	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	1,75	106-235	491	16,9	8,9
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			561,5	18,22	9,3
14	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	1,45	106-235	491,1	20,3	11,8
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			513,9	12,01	8,6
16	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	478,5	31,9	36
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			/	/	/
17	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2	106-235	480	27,65	29,2
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			/	/	/

Tabella 30: prove a tre ugelli (HCF80015 centrale, LDC11001 laterali) alimentati da serbatoio

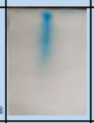
18	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	/	/	/		
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			558,4	24,1	7,78		
19	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2	106-235	/	/	/		
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			595,1	29,1	5,76		
20	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2,5	106-235	429,2	29,2	30,8		
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			575,3	29,7	10,2		
21	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2,8	106-235	486,4	30,4	33,2		
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			547,4	27,9	12,3		
22	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	0,9	106-235	531,4	19,9	10,3		
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	45	0,45			615,4	17,2	2,3		

Tabella 32: prove a tre ugelli (HCF80015 centrale, LDC11001 laterali) alimentati da serbatoio

33	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	493,5	26,2	25,7
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			557,9	26	8,83
24	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2,5	106-235	438,8	20,9	33
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			510	18,7	11,3
25	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2	106-235	449,9	19,9	24,8
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			550	18,8	10,3
26	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	1,5	106-235	475,7	20,7	29,3
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			587,7	21,1	6,5
27	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	1	106-235	/	/	/
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	60	0,45			635,6	17,7	2,9
32	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	3	106-235	/	/	/
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	53	0,45			545,3	23,5	8,4
28	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2,5	106-235	/	/	/
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	53	0,45			517,1	21,9	12,6
29	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	2	106-235	/	/	/
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	53	0,45			543,8	20,2	9,6
30	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	1,5	106-235	/	/	/
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	53	0,45			604,5	26,1	5,9
31	3	HCF80015 (centrale)	Cono pieno	Serbatoio	Orizzontale	90	0,45	1	106-235	/	/	/
		2x LDC11001 (laterali)	2x Ventaglio		2x Verticale	53	0,45			610,8	15,4	2,7

Tabella 33: prove a tre ugelli (HCF80015 centrale, LDC11001 laterali) alimentati da serbatoio

11. Capitolo 11: Confronto con la letteratura

In questa sezione vengono confrontati i valori dei parametri ottenuti nell'elaborato con i valori indicati dalla letteratura. Si analizzano i tre parametri separatamente, in tre paragrafi separati.

11.1. Confronto del VMD

I valori di VMD ottenuti in tutte le prove vanno confrontati con i valori che indica la normativa per gli ugelli utilizzati; per farlo, si riporta di nuovo la tabella riportata al capitolo 3.4.2., che indica la classificazione delle gocce:

Getto	Dimensione delle gocce	Range di VMD (µm)
Molto fine	Piccole	61-105
Fine		106-235
Medio		236-340
Grossolano		341-403
Molto Grossolano	Grandi	404-592

Tabella 34: Classificazione getto secondo ASABE 572.1 (ASABE, s.d.)

Seguendo la classificazione di questa tabella, con i VMD ottenuti in tutti i casi appena analizzati, ci si ritroverebbe ad avere in tutte le situazioni delle gocce che appartengono alla categoria "Grossolane" o superiore, il che va contro le indicazioni delle case produttrici degli ugelli, che indicavano invece il getto come "Fine" (per l'ugello a cono pieno HCF80015) e "Medio" (per l'ugello a ventaglio LDC11001 a pressioni vicine a 1 bar). Questa discrepanza potrebbe essere causata da un'errata correzione del diametro delle gocce (formulazione diversa per lo spread factor ad esempio), che quindi fa risultare più grandi le macchie analizzate sul foglio. Infatti, la casa produttrice degli ugelli, per definire le categorie di appartenenza delle gocce emesse dagli ugelli, ha con ogni probabilità effettuato le prove con la goccia in volo, e quindi "libera" dagli effetti collaterali della collisione col foglio. Inoltre, come spiegato, nell'analisi svolta in quest'elaborato non si tiene conto del fenomeno della coalescenza, che risulta molto impattante specialmente per le prove con foglio verticale, dove le gocce scendono per gravità e tendono a unirsi tra loro, causando dei VMD ancor più alti.

Inoltre, bisogna confrontare le dimensioni delle gocce con quelle indicate da normativa, per garantire che le gocce non subiscano l'effetto della deriva (gocce troppo piccole che vengono portate via dal vento in zone diverse da quelle previste) o dello sgocciolamento (gocce troppo grandi che quindi possono scivolare sulle foglie inquinando il terreno sottostante).

Il VMD deve essere compreso tra i seguenti valori:

$$100 - 150\ \mu m\ < VMD < 350\ \mu m$$

Sotto i 100/150 μm si rischia di avere deriva delle gocce, mentre sopra i 350 μm si può verificare l'effetto del gocciolamento verso terra delle gocce (Sinha, et al., 2022).

I valori di VMD ottenuti in questo elaborato risultano essere sempre superiori al range di accettabilità, spesso anche di parecchio. Questo potrebbe essere causato da vari fattori, quali la sovrapposizione delle gocce sul foglio, fenomeno purtroppo favorito dalla staticità delle prove, quando nella realtà il fenomeno è dinamico in quanto il drone in volo è in movimento, o anche dalla coalescenza delle gocce sul foglio, dalla deformazione che avviene al momento dell'impatto contro il foglio (l'utilizzo dello spread factor spesso non è sufficiente), oppure, nel caso degli ugelli laterali con foglio verticale, allo sgocciolamento delle gocce sul foglio.

11.2. Confronto dell'area di copertura

Per l'area di copertura non esistono dei valori precisi di riferimento, in quanto è un parametro molto variabile e difficile da quantificare. Nonostante ciò, si possono classificare qualitativamente i getti (Mangado, Arazuri, Arnal, Jaren, & Lopez, 2013) seguendo la distinzione riportata nella seguente tabella:

Area di copertura (%)	Giudizio equivalente sulla copertura
0-5	Insignificante
5-20	Sotto dosato
20-50	Ottimo
50-80	Eccessivo
80-100	Sovra dosato

Tabella 35: giudizio equivalente sulla copertura (Grillo, 2023)

Confrontando i valori ottenuti con i range riportati in tabella, si nota come le aree di copertura ottenute in laboratorio rientrino quasi sempre nel range dell'ottimo: ciò presuppone che per quanto riguarda questo parametro, il getto è soddisfacente.

11.3. Confronto della densità di gocce

I range in cui può variare la densità delle gocce sono variabili in base a quale prodotto fitosanitario ci si sta riferendo; in particolare, per i fungicidi le densità dovrebbero essere almeno di 50-70 gocce/cm^2, per gli insetticidi o erbicidi di pre emergenza (maggiore utilizzo per i vigneti) dovrebbero essere almeno di 20-30 gocce/cm^2) e per gli erbicidi post emergenza dovrebbero essere almeno di 30-40 gocce/cm^2 (Grillo, 2023).

I valori di densità ottenuti in questo elaborato risultano soddisfare questi range per gli spruzzi dell'ugello centrale, mentre per gli ugelli laterali i valori sono quasi sempre sotto la soglia minima, specialmente al diminuire della pressione, dove i valori della densità decrescono sensibilmente.

12. Capitolo 12: Conclusioni

In questo elaborato si sono effettuate svariate prove sperimentali al fine di ottimizzare l'utilizzo di un sistema di irrorazione a tre ugelli montato su un drone per l'applicazione di prodotti fitosanitari sui vigneti.

Inizialmente si è costruito il modello Solidworks del drone con le modifiche proposte dai tesisti precedenti, quali la sostituzione del serbatoio con due serbatoi "anti-sloshing" (che garantiscono stabilità al drone durante il volo) e l'applicazione del circuito a tre ugelli installato nella parte inferiore del drone. Per permettere un atterraggio sicuro al drone si è realizzata una base di decollo e atterraggio del drone, che quindi non viene ostacolato dai circuiti che portano agli ugelli laterali.

Dopo aver realizzato virtualmente il drone, si è realizzato il banco prova, sul quale si sono effettuate sostanzialmente due tipologie di prove:

- Prove di riempimento e svuotamento del serbatoio;
- Prove di spruzzo degli ugelli su carta fotografica.

Le prove di svuotamento hanno permesso di capire quanta autonomia ha il drone il volo, avendo imposto il tipo di ugelli utilizzati e le condizioni iniziali di pressione e volume. Infatti, i parametri influenti sui tempi di svuotamento sono il volume caricato inizialmente tramite la pompa, la pressione del serbatoio impostata dal compressore ad aria e la pressione imposta dal riduttore di pressione a monte degli ugelli.

- Per quanto riguarda l'influenza del volume, si è notato come un volume molto alto (7 litri sugli 8 disponibili) peggiori sensibilmente le prestazioni del serbatoio: infatti, in questo caso, la pressione all'interno del serbatoio cala vertiginosamente in pochissimo tempo, peggiorando le prestazioni degli ugelli. Invece, un volume più piccolo migliora le prestazioni del drone, ma cala ovviamente l'autonomia di volo, in quanto il volume viene espulso più rapidamente. Per ottimizzare i vantaggi dei due casi, si è considerato come volume ottimale il volume corrispondente a 4 litri (metà del volume massimo del serbatoio), che garantisce al tempo stesso buone prestazioni del serbatoio e un adeguato tempo di volo.
- Per quanto riguarda l'influenza della pressione del serbatoio, essa non influisce particolarmente sulle prestazioni del serbatoio; comunque, è favorevole avere pressioni il più possibile alte, in modo tale da aumentare i tempi in cui la pressione del serbatoio rimane al di sopra di quella impostata dal riduttore di pressione.
- Per quanto riguarda l'influenza della pressione del riduttore di pressione, essa influisce in maniera marcata sulle prestazioni del sistema; infatti, se si imposta un valore alto al

riduttore (ad esempio 3 bar), si garantiscono ottime prestazioni agli ugelli, ma il tempo di svuotamento cala sensibilmente, e cala anche il tempo in cui la pressione nel serbatoio è maggiore rispetto a quella del riduttore. Al contrario, se si imposta il valore a un valore basso (2 bar), i tempi di svuotamento e l'autonomia del drone crescono, ma peggiorano le prestazioni degli ugelli. Per questo motivo si è deciso di adottare come valore di riferimento 2,5 bar, che garantisce dei tempi di svuotamento accettabili e prestazioni buone degli ugelli.

Le prove di spruzzo invece hanno permesso di analizzare i parametri caratteristici degli ugelli, come il VMD, l'area di copertura e la densità di gocce. Le prove sono state effettuate variando l'angolo di inclinazione dell'ugello laterale, mentre le distanze dal vigneto sono state mantenute costanti per motivi di ingombro del drone. Le procedure sono volte a verificare la variazione dei parametri al diminuire della pressione, fenomeno che si verifica durante lo svuotamento del serbatoio del drone in volo.

Durante queste prove, si è verificato come i valori di VMD anche a pressioni alte (2,5 bar) non rientrino nei valori definiti da normativa, ma sono decisamente più alti: questa discrepanza è dovuta a molteplici fattori, quali la sovrapposizione delle gocce sul foglio (causata da una procedura di prova statica e non dinamica come nel caso del drone), dall'impatto delle gocce sul foglio (l'utilizzo dello spread factor non è probabilmente sufficiente) e dall'analisi che viene effettuata sul getto generico e non sulla singola goccia.

A pressioni molto basse (pressioni di 1 bar) si è notato come le prestazioni degli ugelli siano inaccettabili, in quanto i VMD assumono valori elevatissimi, mentre la densità di gocce e l'area di copertura sono alte in una zona molto circoscritta del foglio, mentre altrove sono praticamente nulle.

Nelle prove degli ugelli laterali, si è visto inoltre come la distribuzione delle gocce sia molto irregolare al variare dell'altezza che si sta analizzando, qualsiasi sia l'angolo di inclinazione dell'ugello: i risultati migliori si sono ottenuti con un angolo di inclinazione di 53°, e per questo motivo si è deciso di indicare questo angolo come angolo di riferimento. Per compensare questa cattiva distribuzione, si è provato ad abbassare a metà vigneto le protesi degli ugelli laterali: anche in questa configurazione, però, i risultati non sono stati molto soddisfacenti e quindi non si ritiene opportuno adottare questa struttura, in quanto significherebbe avere delle protesi di supporto degli ugelli lunghe circa 1 metro, che quindi possono essere ingombranti e fastidiose per il volo del drone.

Per possibili sviluppi futuri, per migliorare le prestazioni del drone sarebbe necessario alimentare gli ugelli a delle pressioni maggiori, garantendo quindi delle gocce più piccole e meglio distribuite: per permettere ciò, sarebbe necessario un serbatoio più prestante, capace di raggiungere pressioni più elevate. Inoltre, sarebbe opportuno installare due

serbatoi, per avere a bordo del drone una buona capacità di liquido, in modo da aumentare l'autonomia; bisogna però tener sotto controllo anche il peso dei serbatoi pieni, che non può sforare il peso massimo trasportabile dal drone. Un'altra possibile soluzione per migliorare la distribuzione delle gocce sulle superfici verticali del vigneto è quella di installare cinque ugelli invece di tre, lasciandone uno centrale e due per ogni lato del vigneto: in questo modo, mettendo un ugello in corrispondenza della sommità del vigneto e uno nella parte inferiore, si potrebbe avere una miglior distribuzione delle gocce, e quindi una densità e un'area di copertura più alte; anche in questa soluzione, però, il problema di avere delle gocce troppo grosse (con dei VMD alti) non scompare, e quindi sarebbe necessario anche qui aumentare le pressioni di esercizio.

Riferimenti

1. ASABE. (s.d.). *ASABE 572.1*. Tratto da https://cdn2.hubspot.net/hub/95784/file-32015844-pdf/docs/asabe_s572.1_droplet_size_classification.pdf

2. ASJsrl. (2021). *ASJ spray jet*. Tratto da https://asjnozzle.it/wp-content/uploads/!Catalogo-ASJ-DC6010-2021-09-COMPLETO-rid.pdf

3. *blw.ch*. (s.d.). Tratto da blw.ch: https://www.blw.admin.ch/blw/it/home/nachhaltige-produktion/umwelt/pflanzenschutzmittel.html#:~:text=I%20prodotti%20fitosanitari%20(PF)%20sono,essi%20devono%20essere%20biologicamente%20attivi.

4. Caleffi. (s.d.). *Caleffi Hydronic Solutions*. Tratto da https://www.caleffi.com/italy/it/catalogo/vaso-despansione-saldato-impianti-sanitari-555702

5. *Cimm SPA*. (s.d.). Tratto da https://www.cimmspa.com/it-it/Prodotti/Vasi-di-espansione-per-riscaldamento/category/style/style

6. Conte, A. (2022). Tesi di laurea magistrale in ingegneria meccanica. *Studio ed ottimizzazione di un circuito irroratore di pesticidi in vigneto tramite droni.* Politecnico di Torino.

7. EGM96. (s.d.). *EGM96 Drone Solution Provider*. Tratto da https://www.egm96.it/servizi-con-droni/agricoltura-precisione/#:~:text=I%20droni%20portano%20dunque%20all,riducono%20grazie%20alla%20tecnologia%20SAPR.

8. Festa Bianchet, T. (2022). Tesi di laurea magistrale in ingegneria meccanica. *Studio sperimentale di un circuito di irrorazione di prodotti fitosanitari per vigneto ed analisi dei risultati.* Politecnico di Torino.

9. Frate, A. (2022). Tesi di laurea magistrale in ingegneria meccanica. *Studio sperimentale di un circuito irroratore di pesticidi in vigneto.* Politecnico di Torino.

10. Grillo, G. (2023). Tesi di laurea in ingegneria meccanica. *Elaborazione di risultati sperimentali derivati da prove su ugelli per agricoltura.* Torino: Politecnico di Torino.

11. Mangado, J., Arazuri, S., Arnal, P., Jaren, C., & Lopez, A. (2013). *Measuring the Accuracy of a Pesticide Treatment by an Image Analyzer.* Tratto da https://www.researchgate.net/publication/275539043_Measuring_the_Accuracy_of_a_Pesticide_Treatment_by_an_Image_Analyzer

12. Persico, M. (2020). Tesi di laurea magistrale in ingegneria meccanica. *Studio e progetto di un banco prova per irrorazione di pesticidi in vigneto tramite droni.* Politecnico di Torino.

13. *Pompa Remco*. (s.d.). Tratto da https://www.aragnet.com/VediMacro/IT/246/Prodotti/?PRD=102809

14. Sinha, R., Johnson, J., Power, K., Moodie, A., Warhurst, E., & Barbosa, R. (2022). *Understanding Spray Attributes of Commercial UAAS as Impacted by Operational and Design Parameters.* Tratto da https://doi.org/10.3390/drones6100281

15. Sky53. (s.d.). *Sky53 Drone Tecnologies*. Tratto da https://sky53.com/droni-in-agricoltura/